

**Synergie tussen dienstregeling en spoorweg infrastructuur:
Een nieuwe benadering van haalbaarheidsanalyses**

Rikus Koops – ARCADIS – rikus.koops@arcadis.nl
Allard Katstra – ARCADIS – allard.katstra@arcadis.nl

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
19 en 20 november 2015, Antwerpen**

Samenvatting

Synergie tussen dienstregeling en spoorweg infrastructuur: een nieuwe benadering van haalbaarheidsanalyses

Bij wijzigingen in het gebruik van een spoorstelsel is het altijd de vraag of de nieuwe combinatie van infrastructuur en dienstregeling een situatie oplevert die in voldoende mate robuust en stabiel is. In deze paper gaan wij op zoek naar een methode die op deze vraag een antwoord kan geven. Het berekenen van de belastinggraad is een bestaande methode die hierop een antwoord geeft, maar deze methode blijkt niet altijd resultaten op te leveren die stroken met de verwachting. Een andere tegenwoordig beschikbare methode, de dynamische simulatie, is complex in uitvoering en geeft zeer gedetailleerde resultaten. Deze methode is daardoor niet altijd toe te passen in de vroege fase van projecten. Wij zijn in deze paper op zoek naar een methode die eenvoudig is wat uitvoering en resultaat betreft en snel met beperkte input uitgevoerd kan worden, maar die tegelijk resultaten oplevert die stroken met de verwachtingen en een betrouwbare uitspraak doen over stabiliteit en robuustheid van een dienstregeling.

Wij doen dit door in eerste instantie uit te gaan van de methode van het berekenen van de belastinggraad aangezien deze de eenvoud van uitvoering heeft die we zoeken. We analyseren op welke punten deze methode niet voldoet aan de verwachtingen. Deze verwachting zijn logische aannames zoals het feit dat de haalbaarheid afneemt als het aantal treinen toeneemt. Vanuit deze vastgestelde manco's gaan we op zoek naar een alternatieve methode die niet complexer is maar wel nauwkeuriger voldoet aan de verwachtingen. Wij leggen uit hoe deze alternatieve methode uitgevoerd moet worden, hoe de resultaten er uitzien en op welke wijze de uitkomsten een uitspraak doen over de haalbaarheid van de dienstregeling. Wij eindigen de paper met een praktijkvoorbeeld waarin wij laten zien op welke wijze uitkomsten van de alternatieve methode verschillen met de berekening van de belastinggraad en we laten zien op welke wijze de alternatieve methode gebruikt kan worden in een wijzigingsproject.

1 Inleiding

Het Nederlandse spoorwegnet behoort al jaren tot de drukst bereden netwerken van Europa. Al vele jaren neemt de intensiteit op het spoorwegnet toe en in de toekomst is een verdere toename van het spoorgebruik, zowel door reizigers als voor goederen, te voorzien. Zo kennen wij onder andere het Programma Hoogfrequent Spoor (PHS), waar op belangrijke spoorcorridors de treinfrequentie van de passagiersdienst verhoogd wordt van vier treinen per uur naar zes treinen per uur. Ten opzichte van deze toename blijft de uitbreiding van de infrastructuur achter en ook in de toekomst zijn grote uitbreidingen niet te verwachten. De toename van het spoorgebruik is in het verleden mogelijk gebleken door de aanwezige infrastructuur beter te benutten en met relatief geringe aanpassingen beter benutbaar te maken. De vraag doemt daarbij op waar de grens ligt van het beter benutten en waar intensiever gebruik van het spoor overgaat op het overbelasten van het systeem. In projecten komt deze vraag zeer vaak naar voren en over het algemeen al in een zeer vroeg stadium. Er is zodoende behoefte aan een methode die inzicht geeft in deze grens. Een methode die bovendien, gezien de fase waarin deze toegepast zou moeten worden, eenvoudig en snel uitvoerbaar moet zijn. Pacht (2002) beschrijft hiervoor twee methodieken. De meest gedetailleerde, een simulatie van de treindienst, voldoet niet aan dit doel, omdat hiervoor veel detailinformatie noodzakelijk is die vaak in een vroege fase nog niet voorhanden is. Deze methodiek geeft daarnaast complexe niet eenvoudig te duiden uitkomsten. De andere methode, een analytische methode waarbij de belastinggraad bepaald wordt, voldoet wat eenvoud en snelheid betreft, maar kent een aantal beperkingen. De vraag die wij ons in deze paper stellen is of er een eenvoudige en snelle methode bestaat die deze beperkingen niet kent en dat een bruikbaar hulpmiddel kan zijn bij het bepalen van de stabiliteit van dienstregelingen.

2 Het probleem

Gaat u eens bij een gemiddelde overweg in den lande staan, bijvoorbeeld de Oranjelaan te Harderwijk. U ziet twee parallelle sporen liggen waar in een uur gemiddeld per richting zo'n tien treinen langs komen. Gemiddeld moet u meer dan 5 minuten wachten voordat er een tweede trein passeert, al deze tijd ligt het spoor er verlaten bij. Het intensiever berijden van dit spoor lijkt geen enkel probleem te geven, er is nog ruimte genoeg. Vergelijkt u dat maar eens met een gemiddelde snelweg.

Het spoorstelsel is echter fundamenteel anders dan het wegstelsel en de waargenomen ruimte verdwijnt als sneeuw voor de zon zodra wij dit stelsel doorgronden. Zo bevindt zich op de gemiddelde snelweg regelmatig de mogelijkheid om uit te voegen en verkeersstromen te splitsen. Het spoorstelsel kent veel minder van dergelijke mogelijkheden en al deze mogelijkheden liggen op de knooppunten van het stelsel. Nog belangrijker is het ontbreken van een mogelijkheid tot inhalen. Inhalen op het spoor kan alleen op daarvoor ingerichte plekken en dient op een exact moment in de tijd uitgevoerd te worden. Een zondagsrijder op de snelweg kunt u eenvoudig passeren, een intercity kan een goederentrein echter alleen inhalen op een daarvoor ingericht inhaalspoor. De tijd die wij tussen de treinen zagen toen wij bij de overweg in Harderwijk stonden, is 30 kilometer verderop, bij het naderen van het knooppunt Zwolle verdwenen.

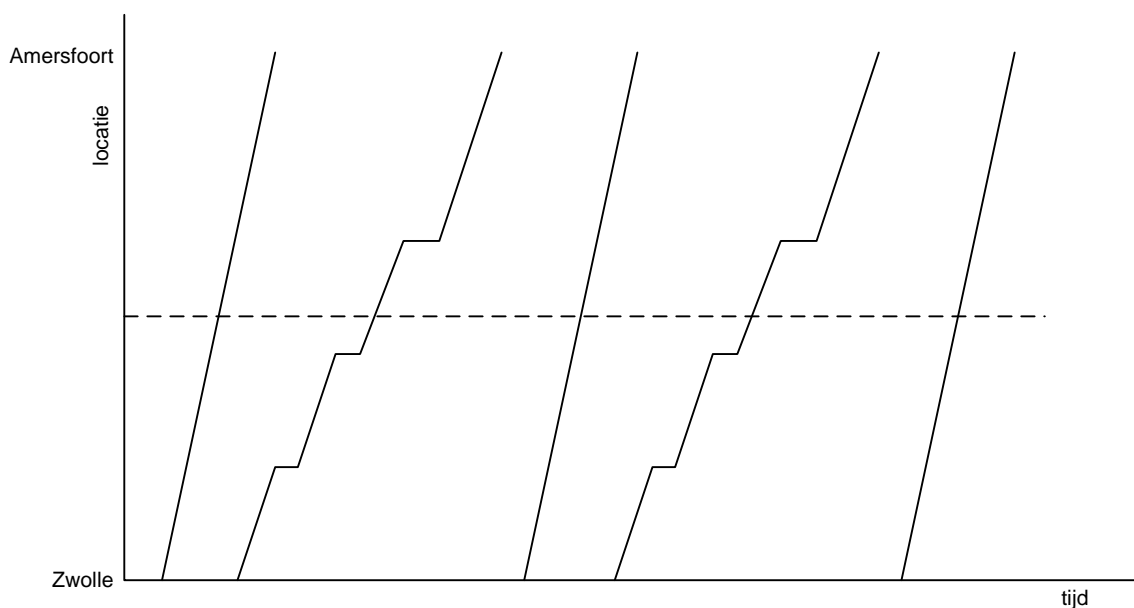
2.1 In essentie

Hoe kunnen wij nu op een onderbouwde en objectieve wijze tot uitdrukking brengen dat het subjectieve gevoel van ruimte dat u op de overweg kreeg, niet juist is en belangrijker nog, hoe kunnen wij objectief vaststellen hoeveel ruimte er nog wel is?

Deze vraag is eenvoudiger te beantwoorden dan u wellicht denkt. De analyse die u bij de overweg uitvoerde was minder foutief dan u zou verwachten. U overzag te Harderwijk een deel van het spoor, u nam waar hoe lang een passerende trein dit deel bezet hield (ongeveer een halve minuut) en hoe lang het spoor daarna onbezet was (ongeveer 5 minuten). Het spoor is zodoende ongeveer 10% van de tijd bezet. Deze analyse is in essentie niet fout, alleen het beschouwde gebied is te gering om een conclusie aan te verbinden. De twee treinen die u zag rijden, zijn namelijk niet onafhankelijk. Ze rijden op hetzelfde spoor van hetzelfde knooppunt naar hetzelfde volgende knooppunt en hebben geen mogelijkheid om elkaar te passeren tot het bereiken van dat knooppunt. Als de eerste trein langzamer rijdt dan de tweede zal de 5 minuten ruimte tussen de treinen snel minder worden bij nadering van het knooppunt, waarmee de 10% al snel 70% wordt. De analyse klopt alleen als wij deze betrekken op een gebied tussen twee knooppunten, waarbij geldt dat op de knooppunten de treinen elkaar moeten kunnen passeren waardoor deze treinen onafhankelijk van elkaar worden. Wij moeten onze analyse dus niet uitvoeren rond de overweg, maar op het baanvak tussen Amersfoort en Zwolle.

2.2 Baanvak benadering

Het baanvak tussen Amersfoort en Zwolle bestaat uit twee sporen, maar voor de eenvoud kijken wij naar één richting en naar één spoor. Op dit spoor rijden een intercity en een stoptrein zonder inhaling. Wij kunnen het gebruik van de lijn zichtbaar maken door middel van een tijd-weg diagram.



Figuur 1

Wij zien als eerste lijn een intercity vertrekken te Zwolle die zonder te stoppen in een bepaalde tijd naar Amersfoort rijdt. De tweede lijn is de sprinter die een aantal keren stopt, dit zijn de horizontale delen van de lijn waarbij de locatie niet wijzigt maar de tijd wel doorgaat.

Wij zien nu ook waarom onze waarneming in Harderwijk, de stippellijn in het tijd-weg diagram, nu correct was. De ruimte die wij zagen tussen twee treinen neemt door het snelheidsverschil toe of af en zorgt er voor dat wij minder ruimte hebben dan wij dachten. Als wij dus willen weten waar de grens ligt op het baanvak, moeten wij deze relatie tussen de treinen meenemen. Wij moeten dus niet alleen kijken naar de infrastructuur op het baanvak, maar ook naar de relatie tussen de treinen. Wat wij dus willen is een methode waarbij wij een gewenste dienstregeling kunnen toetsen op haalbaarheid op een bepaalde infrastructuur.

3 De grens tussen haalbaar en niet-haalbaar

Voordat wij verder gaan moeten wij vaststellen waardoor de grens tussen een mogelijke en een onmogelijke, ofwel tussen een haalbare en een niet-haalbare treindienst, wordt gevormd. Door de beperkingen die de infrastructuur vormt is het noodzakelijk om in een dienstregeling vast te leggen in welke volgorde treinen rijden. Deze volgorde wordt vastgelegd in een treindienst. Het spoorstelsel eist dus een vaste volgorde, maar doordat passagiers ook nog willen weten hoe laat een trein vertrekt, ligt ook de tijdligging vast. Immers een overgroot deel van de treinen is een passagierstrein. In het gewenste gebruik ligt dus het aantal treinen, de volgorde en de tijdligging vast.

3.1 Eisen aan een haalbare dienstregeling

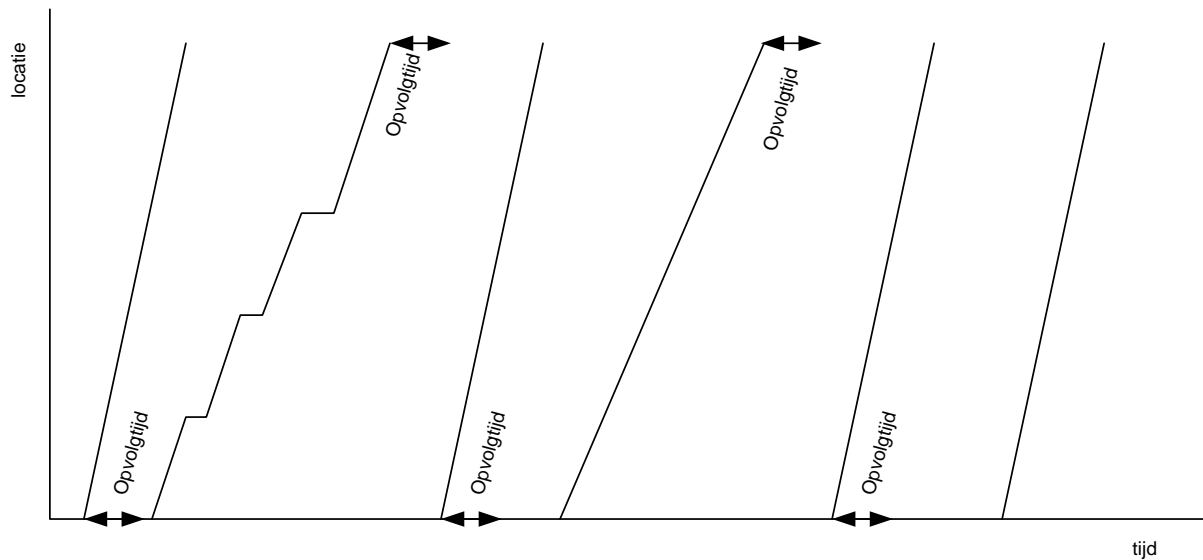
Een treindienst is op het meest minimale niveau mogelijk als:

- Het gewenste aantal treinen kan rijden in een bepaald tijdvenster en,
- Deze treinen kunnen rijden met de gewenste snelheid en,
- Deze treinen kunnen rijden in en een vooraf vastgestelde volgorde en,
- Deze treinen kunnen rijden in regelmatige tijdintervallen.

De eerste drie criteria zijn vanzelf duidelijk, het laatste criteria is een aanpassing van de tijdligging. Over het algemeen ligt niet de tijdligging vast, reizigers dienen alleen vooraf te weten wat de tijdligging is. Deze tijdligging dient echter wel zodanig regelmatig te zijn, dat ze elk uur hetzelfde is en dat dezelfde treinen binnen dit uur op vaste intervallen rijden.

Of een dienstregeling haalbaar is op dit minimale niveau op een gegeven infrastructuur is theoretisch met een eenvoudige methode aantoonbaar. Op basis van de treineigenschappen kunnen wij de rijprofielen van de treinen bepalen. Wij weten dan hoe lang elke trein een deel van de infrastructuur bezet houdt. Wij kunnen op basis hiervan ook bepalen wanneer na een eerste trein een tweede trein kan rijden zonder dat deze door de eerste in zijn rijprofiel gehinderd wordt, wij noemen dit opvolgtijd. Als wij twee treinen op deze afstand in tijd laten rijden dan kunnen deze rijden met de door ons gewenste snelheid. Vervolgens kunnen wij de door ons gewenste treinen, in de door ons gewenste volgorde, op door ons gewenste tijden in een dienstregeling plaatsen. Als er vervolgens geen enkele trein binnen de minimale opvolgtijd hoeft te vertrekken in onze

dienstregeling, dan is onze dienstregeling haalbaar en voldoet aan de door ons gestelde minimale eisen.



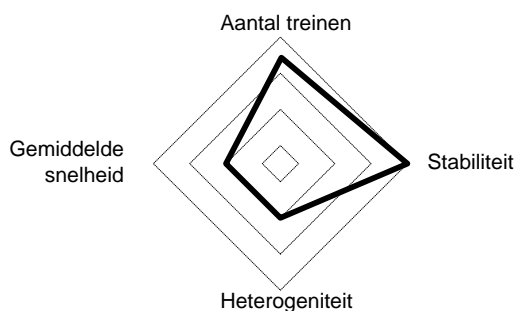
Figuur 2

Echter, voor een stabiele dienstregeling is deze minimale grens niet voldoende. Zodra een trein door omstandigheden niet kan voldoen aan zijn tijdligging dan zal de tijdligging van de volgende trein mogelijk worden beïnvloed, die vervolgens de volgende trein kan beïnvloeden en zo verder. Een vertraging van één trein zal veel andere treinen doen vertragen. Het mag duidelijk zijn dat er naast de minimale eisen nog een eis moet zijn:

- Een vertraging van een trein mag niet leiden tot een verschuiving van alle (of een groot aantal) volgende treinen.

3.2 Relatie tussen haalbaarheid, robuustheid en stabiliteit

Wij zijn dus op zoek naar de haalbaarheid van de dienstregeling en naast de minimale eisen van haalbaarheid moeten wij daarbij uitspraak doen over de robuustheid of stabiliteit. De vertaalslag die wij daarbij maken dat robuustheid of stabiliteit uitgedrukt kan worden in de mate van marge in een dienstregeling. Om aan te geven waardoor deze stabiliteit wordt beïnvloed, verwijzen wij naar het model van de capaciteitsbalans (UIC, 2004).



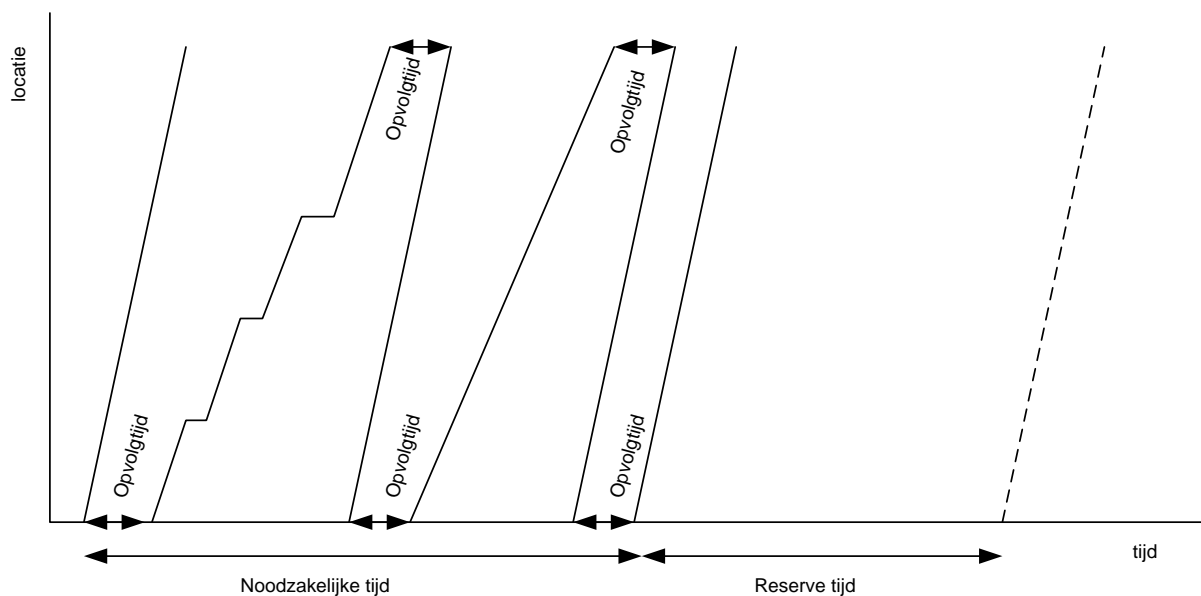
Figuur 3 Capaciteitsbalans (UIC, 2004)

In dit theoretische model wordt de balans tussen vier factoren weergegeven, namelijk het aantal treinen op de corridor, de gemiddelde maximale snelheid, de heterogeniteit en

de stabiliteit. Het verband tussen deze factoren wordt weergegeven in de lijn tussen de factoren. Deze lijn zal, zonder infrastructurele wijzigingen, altijd dezelfde lengte behouden. In deze balans is te zien dat de stabiliteit afhankelijk is van het aantal treinen, de gemiddelde snelheid en de homogeniteit in de dienstregeling. Deze theoretisch benadering zal verderop in de paper worden aangehaald.

4 Bestaande methode: de belastinggraad

Er bestaat een methode om de marge in de dienstregeling te bepalen die in de lijn ligt van onze analyse bij Harderwijk: de baanvak belastinggraad. Deze methode is gebaseerd op het idee van dienstregelingcompressie (Pachl, 2002), hierbij wordt gekeken hoeveel tijd minimaal nodig is om de door ons gewenste treinen in de door ons gewenste volgorde te laten rijden. Er wordt dus niet meer gekeken naar de exacte tijdligging, maar alleen naar de volgorde en wij comprimeren de dienstregeling tot een minimale tijd. Wij kijken hoeveel tijd voor deze gecomprimeerde dienstregeling noodzakelijk is en wij kijken hoeveel tijd wij beschikbaar hebben. Hiermee hebben wij een maat voor de hoeveelheid totale marge in de tijd gezien.

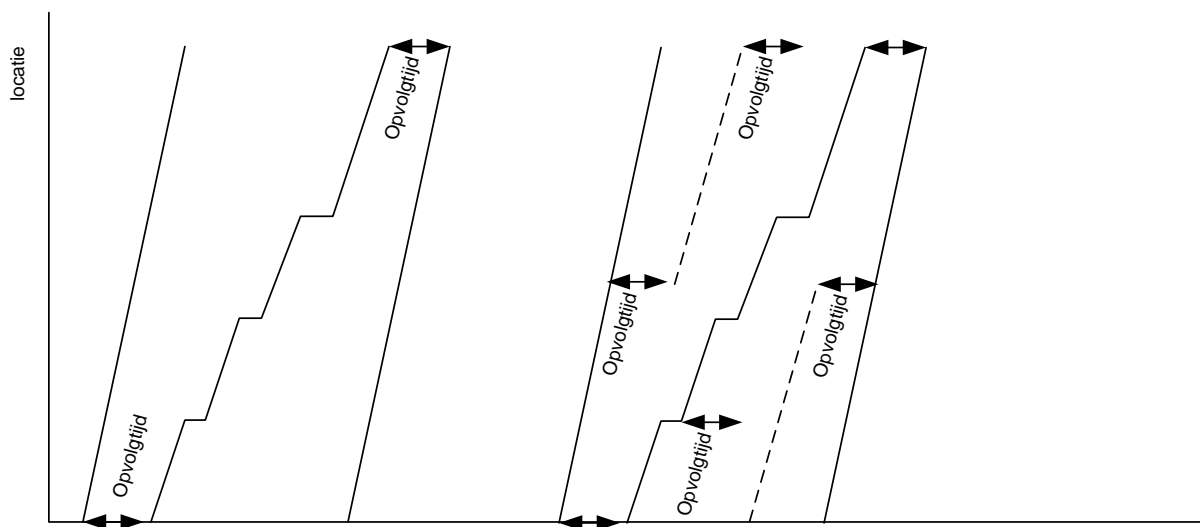


Figuur 4

De noodzakelijke hoeveelheid tijd delen wij op de totale beschikbare tijd en deze verhouding, uitgedrukt in procenten, noemen wij de belastinggraad. Bij 100% belasting is de beschikbare tijd net voldoende en is er dus geen enkele marge. Bij 70% is er per tijdseenheid 30% marge, bijvoorbeeld in een uur is er in totaal 18 minuten marge. De UIC heeft in 2004 een werkwijze gepubliceerd om deze methode te standaardiseren (UIC, 2004).

Een aantal opmerkingen zijn er te maken. Ten eerste moet duidelijk zijn dat de belastinggraad geen uitspraak doet over de tijdligging van de treinen. Het kan dus voorkomen dat de belastinggraad voldoende laag is terwijl er toch niet voldaan wordt aan de hiervoor gestelde eisen, met name de tijdligging en de marge ten opzichte van deze tijdligging.

Ten tweede is het probleem met de belastinggraad dat er geen objectieve maat gegeven kan worden wat de maximale grenswaarde is. Alhoewel een toename in de belastinggraad een aanduiding is voor minder marge, hoeft dit nog niet te leiden tot een onstabiele dienstregeling. Hier komt bij dat een grenswaarde in de belastinggraad zich niet één op één verhoudt tot een grenswaarde aan de marge per trein. Het is denkbaar dat een baanvak een belastinggraad heeft van 73% met een dienstregeling met 4 treinen en een ander baanvak een zelfde belastinggraad heeft met een dienstregeling met 8 treinen. De marge per trein is in het eerste geval 4 minuten en in het tweede geval slechts 2 minuten. Ten derde en wellicht wel de belangrijkste opmerking: de belastinggraad doet alleen een uitspraak over het kritieke pad. Niet alle treinen in een dienstregeling beïnvloeden de belastinggraad. Om dit laatste duidelijk te maken verwijzen wij naar onderstaand figuur.



Figuur 5

In dit figuur zijn twee series treinen weergegeven die beide dezelfde belastinggraad geven, de bepalende serie treinen zijn dezelfde. In het tweede geval zijn echter twee extra treinen ingevoegd. Deze treinen hebben geen invloed op de belastinggraad maar kunnen en zullen zeer waarschijnlijk wel een negatieve invloed op de stabiliteit van de dienstregeling hebben.

De belastinggraad onderkent zodoende niet de invloed van de exacte tijdigging van de treinen, doet geen uitspraak over de marge per trein en neemt niet in alle gevallen de invloed van het aantal treinen mee. Het eerste is niet onoverkomelijk. Wij kunnen stellen dat een haalbare dienstregeling aan zowel de eis met betrekking tot belastinggraad als aan de eisen met betrekking tot exacte tijdigging moet voldoen. Het tweede en derde is fundamenteel voor de wijze waarop de belastinggraad wordt berekend, en kan niet eenvoudig wegnomen worden. Vraag is vervolgens of er een methode is die wel rekening kan houden met deze extra treinen.

5 Alternatieve methode

Onze zoektocht gaat uit naar een alternatieve methode die de eenvoud heeft van de belastinggraadmethode, maar niet de nadelen van deze methode kent.

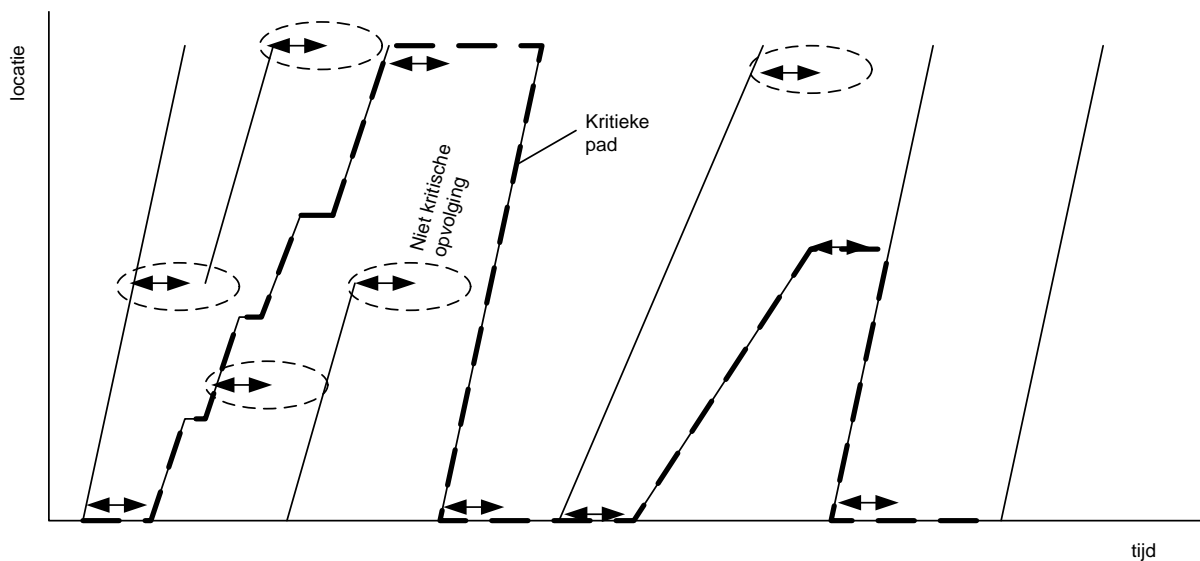
Deze methode moet een uitspraak doen over de stabiliteit van een dienstregeling. Om te toetsen of deze methode correct is grijpen wij terug naar de capaciteitsbalans. Op basis van de factoren geschetst in de capaciteitsbalans doen wij een aantal aannames die intuïtief logisch lijken en waar deze methode aan moet voldoen:

- De stabiliteit van een dienstregeling neemt af als wij meer treinen toevoegen.
- Een dienstregeling is stabiel (of flexibel) als een trein zonder grote effecten op de gehele dienstregeling verschoven kan worden.
- De stabiliteit van een dienstregeling neemt toe als treinen meer overeenstemmen in rijgedrag (harmoniseren).

Een alternatieve methode voor het berekenen van stabiliteit moet aan deze aannames voldoen.

5.1 Beschrijving van de alternatieve methode

Laten wij bij het zoeken naar een alternatief beginnen op het punt waarbij bij de belastinggraadberekening mis gaat, namelijk de compressie. Door compressie wordt alleen het kritieke pad in rekening gebracht. Wij moeten dus een methode vinden die geen gebruik maakt van compressie en toch een uitspraak doet over de marge in de dienstregeling.

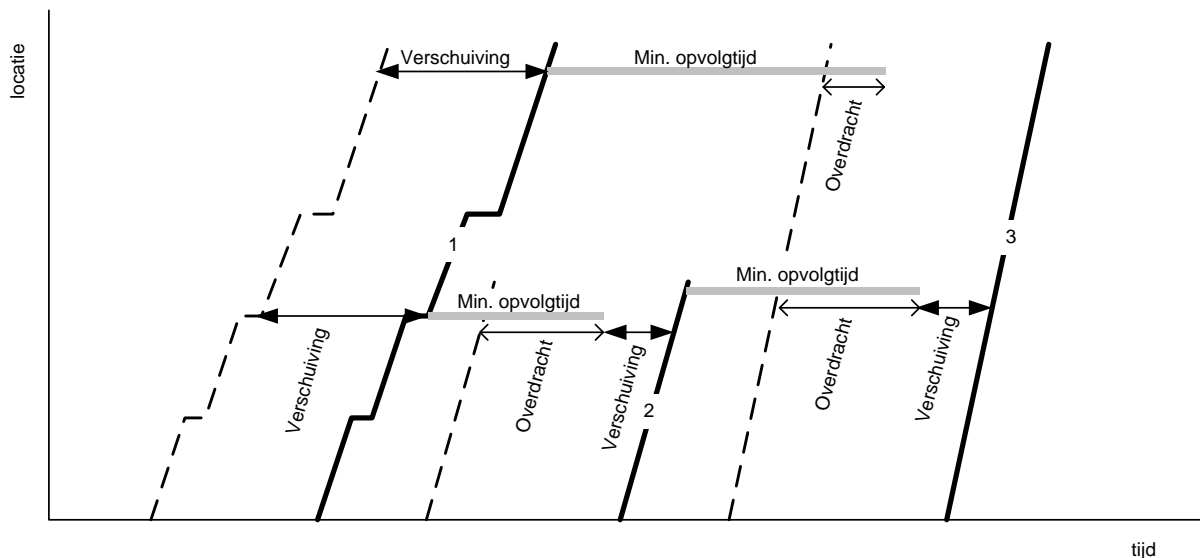


Figuur 6

Wij hebben een methode nodig die de invloed van alle marges in de dienstregeling meeneemt. Wij kunnen de compressie achterwege laten en de deelmarges analyseren, maar wij zullen in dit geval wederom alleen uitspraken doen over de kritische opvolgen. Wij moeten zodoende een methode vinden die ook de niet-kritische opvolgingen (gestippeld omcirkeld) meeneemt, maar hoe is dit mogelijk aangezien de invloed van de kritische zich altijd eerder doet gelden?

Onze tweede aanname voor de eisen aan een stabiliteitstoets kan ons helpen. Wat wij dienen te onderzoeken is wat het effect van een verschuiving is van elke trein op de gehele dienstregeling. Wij moeten dus naar een methode die steeds grotere verschuivingen in het systeem aanbrengt en toetst op het gevolg. Wij kunnen niet werken met vaste verschuivingen, die voor elke trein in de dienstregeling hetzelfde zijn, omdat wij dan wederom alleen de kritische opvolgingen zien. Wij moeten dus

willekeurige verschuivingen op iedere trein aanbrengen en vaststellen wat het totale effect van deze verschuivingen is. Deze verschuivingen zullen wij langzaam opvoeren. Onderstaande figuur geeft het voorbeeld van een dergelijke stap.



Figuur 7

In de figuur zien wij een opvolging van drie treinen, gestippeld is de geplande tijdligging en de doorgetrokken lijn de werkelijke tijdligging ten gevolge van de aangebrachte verschuiving. Deze verschuiving ligt tussen 0 en een opgegeven maximum. Met grijs is de minimale opvolgtijd tussen de treinen aangegeven. Indien de tijdligging zodanig is dat de verschuiving van een trein invloed heeft op de geplande tijdligging van de volgende trein, dan krijgt deze volgende trein een extra overgedragen verschuiving.

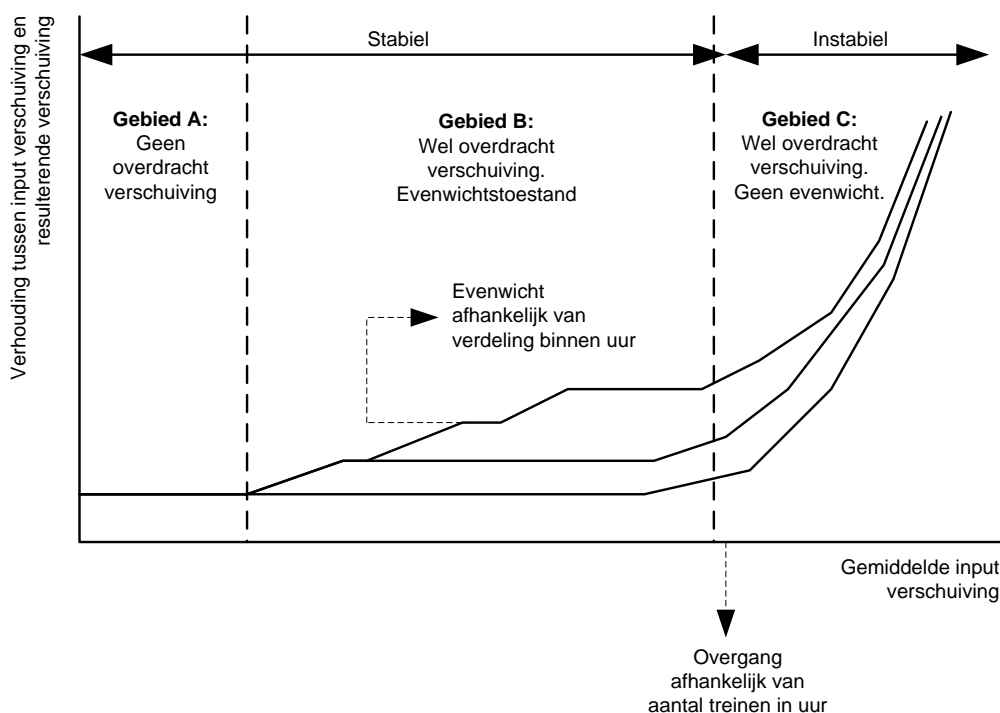
Door deze manier van aanbrengen van verschuivingen kunnen wij de waarde van elke marge in de dienstregeling tussen treinen, ook treinen die niet in het kritische pad liggen, toetsen. Wij moeten alleen nog een uitdrukkingvorm vinden om de mate van haalbaarheid of stabiliteit uit te drukken. Wij kunnen bijvoorbeeld na een aantal intervallen kijken of de maximale verschuiving beperkt is gebleven. Dit geeft immers aan dat de dienstregeling verstoringen kan opvangen binnen deze intervallen. Een andere mogelijkheid blijkt echter eenvoudiger te bepalen en een vergelijkbaar resultaat te geven, namelijk nagaan hoe een ingevoerde verschuiving zich verhoudt tot de resulterende verhouding. Wij delen kort gezegd de som van alle resulterende verschuivingen door de som van alle ingebrachte verschuivingen. Is deze verhouding groot, dan worden er veel verstoringen doorgegeven en kan binnen de dienstregeling niet alles opgevangen worden.

Hiermee hebben wij een voorstel van een alternatieve methode. Wij gaan uit van een gewenste dienstregeling en maken gebruik van de gewenste tijdligging. Hierop brengen wij verschuivingen naar achteren aan in de tijdligging die per trein kunnen variëren tussen 0 en een maximum tijd. Stapsgewijs verhogen wij deze maximum waarde. Bij elke stap berekenen wij de verhouding tussen de totale verschuiving die wij inbrengen en de totale verschuiving die wij als resultante krijgen.

5.2 Resultaat van alternatieve methode.

Zoals uit het voorgaande blijkt, is de uitkomst van een analyse met deze alternatieve methode geen getal, zoals bij de belastinggraad, maar een diagram. In het diagram is de gemiddelde ingevoerde verschuiving op de horizontale as geplaatst (dit komt overeen met de totale lengte van alle rode blokjes). De verhouding tussen deze ingevoerde verschuiving en de resulterende vertraging is op de verticale as geplaatst. Als deze verhouding 1 is, wil dit zeggen dat er geen overdracht plaatsvindt en dat elke trein alleen verschoven wordt door zijn eigen door ons ingevoerde verschuiving. Indien deze verhouding hoger is, bijvoorbeeld 3, wil dit zeggen dat de totale verschuiving driemaal de ingevoerde verschuiving is.

Indien wij vervolgens met deze alternatieve methode een aantal situaties doorrekenen dan zien we dat er diagrammen ontstaan die er uit zien als onderstaande figuur.



Figuur 8

Als wij in detail gaan kijken hoe een diagram eruit ziet, dan kunnen wij drie gebieden onderkennen.

- In gebied A vindt geen overdracht plaats, de verhouding blijft 1. Het systeem wordt niet extra verstoord en is stabiel.
- In gebied B vindt wel overdracht plaats maar niet ongebeheerst. Het systeem kan de overgedragen vertragingen op zeker moment absorberen en voorkomen dat deze alsmaar oplopen. Het systeem is verstoord maar blijft stabiel.
- In gebied C kan het systeem de overgedragen verschuivingen niet meer absorberen en zullen deze alsmaar toenemen. Het systeem is instabiel.

Het meest van belang is de grens tussen stabiel en instabiel. Deze blijkt niet te koppelen aan een maximale waarde van de verhouding, omdat deze laatste afhankelijk is van de evenwichtstoestand in gebied B. Deze kan bijvoorbeeld 2 maar ook 4 zijn.

Een betere overgang kan bepaald worden als wij kijken naar de helling van de grafiek. Uit een aantal praktijksituaties blijkt dat een hellingshoek van boven de 45 graden een goede indicator is voor de grens tussen stabiel en instabiel.

Minder van belang maar in sommige gevallen wel interessant is de reeds genoemde evenwichtstoestand in gebied B. Bij een zeer gelijkmatig verdeeld aantal treinen zal dit evenwicht gelijk blijven aan 1 en verdwijnt dit gebied nagenoeg geheel. Bij een ongelijke verdeling zullen de grote "gaten" in tijd tussen de treinen de evenwichtstoestand bepalen.

Als wij teruggaan naar de aannames waaraan onze alternatieve methode moest voldoen, dan zien wij dat deze methode daar daadwerkelijk aan voldoet.

- De stabiliteit neemt af als wij het aantal treinen verhogen. Het kantelpunt tussen stabiel en instabiel schuift op naar links.
- De stabiliteit wordt getoetst door elke trein een zekere verschuiving te geven en de mate van verschuiving is een maat voor de stabiliteit.
- Bij harmonisering zal de rijtijdcomponent in de opvolgtijden afnemen waardoor grotere verschuivingen kunnen worden opgevangen. De stabiliteit neemt toe.

Wij hebben met de nieuwe methode dus een methode die aansluit bij wat wij intuïtief verwachten. Deze methode doet uitspraak over het moment van instabiel worden en de mate van verstoring voordat het systeem instabiel wordt.

5.3 Bepalen van de grens van stabiliteit

Het doel dat wij ons stelden aan het begin van deze paper hebben wij bereikt.

Wij hebben een methode die een uitspraak doet over de haalbaarheid van dienstregelingen, die dit doet op een snel uit te voeren wijze en die beter aansluit op onze verwachtingen dan de methode met belastinggraad. Er staat voor een praktische toepassing nog een obstakel in de weg, de vraag waar wij de grens leggen tussen haalbaar en niet haalbaar. Bij de methode van de belastinggraad is dit ook een openstaand punt. De UIC doet wel een voorstel, afhankelijk van het vervoersconcept en de geëvalueerde tijdsperiode ligt deze grens tussen de 70 en 85% (UIC, 2004). Deze grens is echter niet meer dan een richtlijn die niet door alle spoorbedrijven wordt onderschreven. Dit ontslaat ons echter niet van de vraag waar de grens ligt bij onze nieuwe methode.

Een eerste stap tot een antwoord hierop kan zijn om aan te sluiten bij de UIC normering. Stel wij gaan uit van een maximale belastinggraad van 80% en een normaal te beschouwen gebruik van een baanvak, bijvoorbeeld een kwartierdienst met sprinters en intercity's. De maximale marge in tijd per trein is in dit geval 1,5 minuten. Als elke trein anderhalve minuut verschoven wordt, zal de belastinggraad 100% zijn. Als geen enkele trein een verschuiving krijgt boven deze anderhalve minuut, dan zal de treindienst binnen het uur gereden kunnen worden. Dit lijkt zodoende een goede aanname voor de grens tussen stabiel en instabiel.

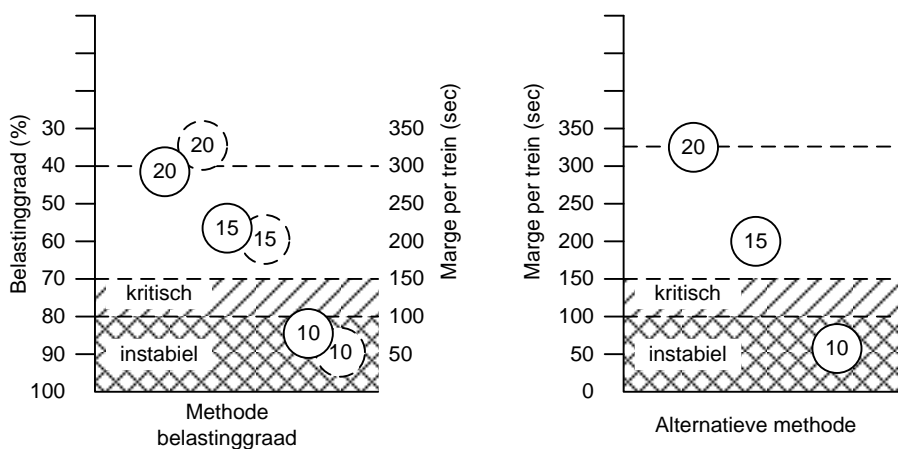
Op basis van bovenstaande kunnen wij de definitie formuleren dat de stabiliteit van een dienstregeling voldoende wordt genoemd als elke trein in dit systeem een verschuiving krijgt tussen de 0 en de 90 seconden en het diagram geen stijging van boven de 45 graden laat zien.

Met klem wijzen wij erop dat deze maximale verschuiving van 90 seconden niet direct gerelateerd kan worden in een maximale vertraging in het werkelijke spoorstelsel. Dit is ook de reden waarom wij in het voorgaande consequent hebben gesproken over verschuiving en niet over vertraging. Bij vertragingen in het werkelijke spoorstelsel zullen treinen niet meer rijden conform hun oorspronkelijke rijprofiel. Treinen zullen worden bijgestuurd of treinen zullen langzamer gaan rijden. Hierdoor ontstaat er meer ruimte in de tijd om verstoringen op te vangen. Daarom hebben wij hier gekozen voor een aanname die uitgaat van de belastinggraad en geen aanname hebben gedaan die gebaseerd is op werkelijke vertragingen.

6 Praktijkvoorbeeld

Wij hebben de nieuwe methode besproken en er is aangegeven waar de grens ligt tussen een stabiele en een niet-stabiele dienstregeling. Wij kunnen nu met fictieve praktijkvoorbeelden eens nagaan hoe het toepassen van deze methode er uit zou kunnen zien.

Eerst nemen wij hiervoor als beginsituatie een baanvak waar wij elke twintig minuten met een sprinter en een intercity rijden. De vervoerder wil de treindienst intensiveren en wil op dit baanvak een kwartierdienst invoeren. Daarnaast wil de vervoerder uitzoeken wat er in de toekomst nodig is om een tien-minuten dienst te kunnen rijden. Deze vraag onderzoeken wij zowel met de methode van de belastinggraad als met de nieuwe methode.



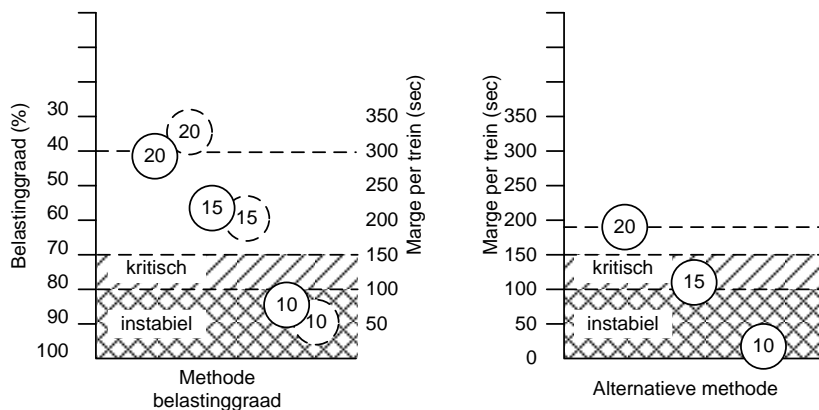
Figuur 9

De uitkomst geven wij weer in bovenstaande diagrammen, links de uitkomst van de methode met de belastinggraad. De cirkels geven de drie soorten dienstregeling aan (20 minuten, 15 minuten en 10 minuten frequentie). De linker as geeft de stabiliteit van de dienstregeling uitgedrukt in belastinggraad. Als extra hebben wij de stabiliteit ook uitgedrukt in de maximale verschuiving per trein in seconden. Dit zijn de gestippelde cirkels in het diagram, op de rechter-as zijn de bijbehorende waarden aangegeven. Bij de berekening van deze marge is alleen naar de treinen in het kritische pad is gekeken. De grens tussen stabiel en instabiel is gelegd op 80%. De stabiliteit is kritisch tussen 70% en 80%. Rechts is op vergelijkbare wijze de uitkomst van de nieuwe methode weergegeven. Uit deze eerste analyse blijkt dat stabiele kwartierdienst mogelijk is, een

tien-minuten dienst kan niet stabiel gereden worden. Bij een kwartierdienst neemt de stabiliteit wel sterk af.

Beide methoden geven een vergelijkbare uitkomst. De mate van afname van stabiliteit is gelijk en ook de score van de dienstregelingen komt overeen.

In tweede instantie verandert de vervoersvraag. Er moeten extra treinen rijden die tot een station halverwege het baanvak rijden en extra treinen die daar starten. Het aantal treinen wordt dus hoger. Deze treinen kunnen zodanig ingepast worden dat ze niet in het kritieke pad liggen. Ook deze gewijzigde situatie wordt geanalyseerd.

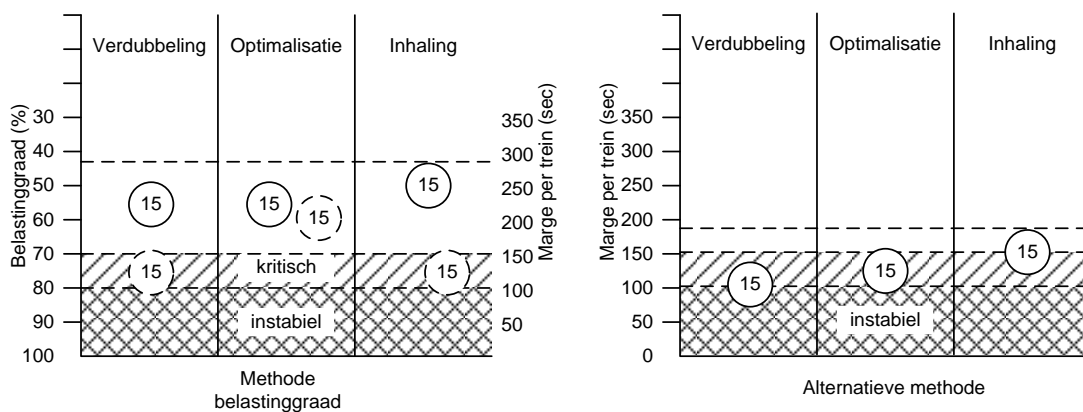


Figuur 10

De methode met de belastinggraad laat geen verschil zien (het linker plaatje is identiek aan het linker plaatje in figuur 7). Dit is ook te verwachten omdat de extra treinen niet in het kritieke pad liggen. De omrekening naar marge per trein is ook in dit geval alleen berekend voor de treinen in het kritieke pad. Bij de alternatieve methode zien wij wel verschil. De stabiliteit neemt in voor alle dienstregelingen af. De beginsituatie met een frequentie van 20 minuten is veel minder stabiel, de kwartierdienst wordt zeer kritisch. De tien-minuten dienst blijft instabiel.

Beide methoden geven hier dus een zeer verschillende uitkomst.

Om aan de vervoersvraag te kunnen voldoen worden een aantal oplossingen bedacht. Een gedeeltelijke verdubbeling, een optimalisatie van diverse opvolgtijden en een inhaalmogelijk bij het station halverwege. De tien-minuten dienstregeling wordt niet meer bekeken, omdat deze zeer moeilijk haalbaar blijkt.



Figuur 11

Wij zien wederom verschillen tussen beide methoden. Bij de alternatieve methode zitten alle varianten in het kritieke gebied maar zien wij wel een betere prestatie van de latere varianten. De verdubbeling lijkt niets toe te voegen.

Bij de belastinggraad zien wij echter dat alle varianten stabiel zijn en min of meer gelijk scoren, alhoewel de laatste variant iets beter scoort. Als wij echter kijken naar de marge per trein dan zien wij grote verschillen. Bij de spoorverdubbeling en de inhaling verandert namelijk het kritische pad in de dienstregeling en neemt het aantal treinen in dit kritische pad toe. Wij zien zodoende dat bij dezelfde belastinggraad de stabiliteit, uitgedrukt in marge per trein, plotseling sterk afneemt.

Uit dit voorbeeld blijkt dat de resultaten van beide methoden vergelijkbaar zijn als alle treinen die rijden in het kritieke pad liggen. Als dit niet het geval is, ontstaan verschillen omdat de baanvakbelasting deze treinen niet meeweegt. Verder blijkt dat het omzetten van de baanvakbelasting naar een hieruit resulterende marge per trein in het kritische pad en geheel andere uitkomst kan geven aangezien dit aantal treinen kan verschillen per variant. De baanvakbelasting is dus niet één op één te vertalen naar een marge per trein.

7 Afronding

Wij begonnen deze paper met de vraag of het mogelijk was om inzicht te krijgen in de ruimte die de infrastructuur biedt om intensievere dienstregelingen te faciliteren. De wens hierbij was om een methode te vinden die eenvoudig en snel uitvoerbaar was, in een vroeg stadium van projecten waar nog niet altijd alle detailinformatie beschikbaar is en die een heldere en intuïtief te begrijpen uitkomst geeft.

Wij hebben allereerst de reeds beschreven methode van de belastinggraad bekeken en gezien dat deze een aantal beperkingen kent waardoor ze niet in alle gevallen uitspraken doet die stroken met de verwachting. Op basis van deze beperkingen zijn wij op zoek gegaan naar een alternatieve methode die deze beperkingen niet kent en deze hebben wij gevonden in de hier beschreven methode. Met dezelfde brondata en met vergelijkbare eenvoud en snelheid kunnen wij met deze methode een nauwkeuriger antwoord geven op de vraag van de haalbaarheid van een dienstregeling. Deze methode is geen vervanging voor een gedetailleerde simulatie, maar heeft een eigen karakter die deze methode een eigen functie geeft in met name de vroege stadia van een project.

8 Referenties

Pachl. (2002). *Railway operation and control* (1st ed.). Mountlake Terrace, WA, USA: VTD Rail Publishing.

UIC. (2004). *UIC Leaflet 406 - Capacity* (1st ed.). Paris, France: International Union of Railways.

UIC. (2013). *UIC Leaflet 406 - Capacity* (2nd ed.). Paris, France: International Union of Railways.