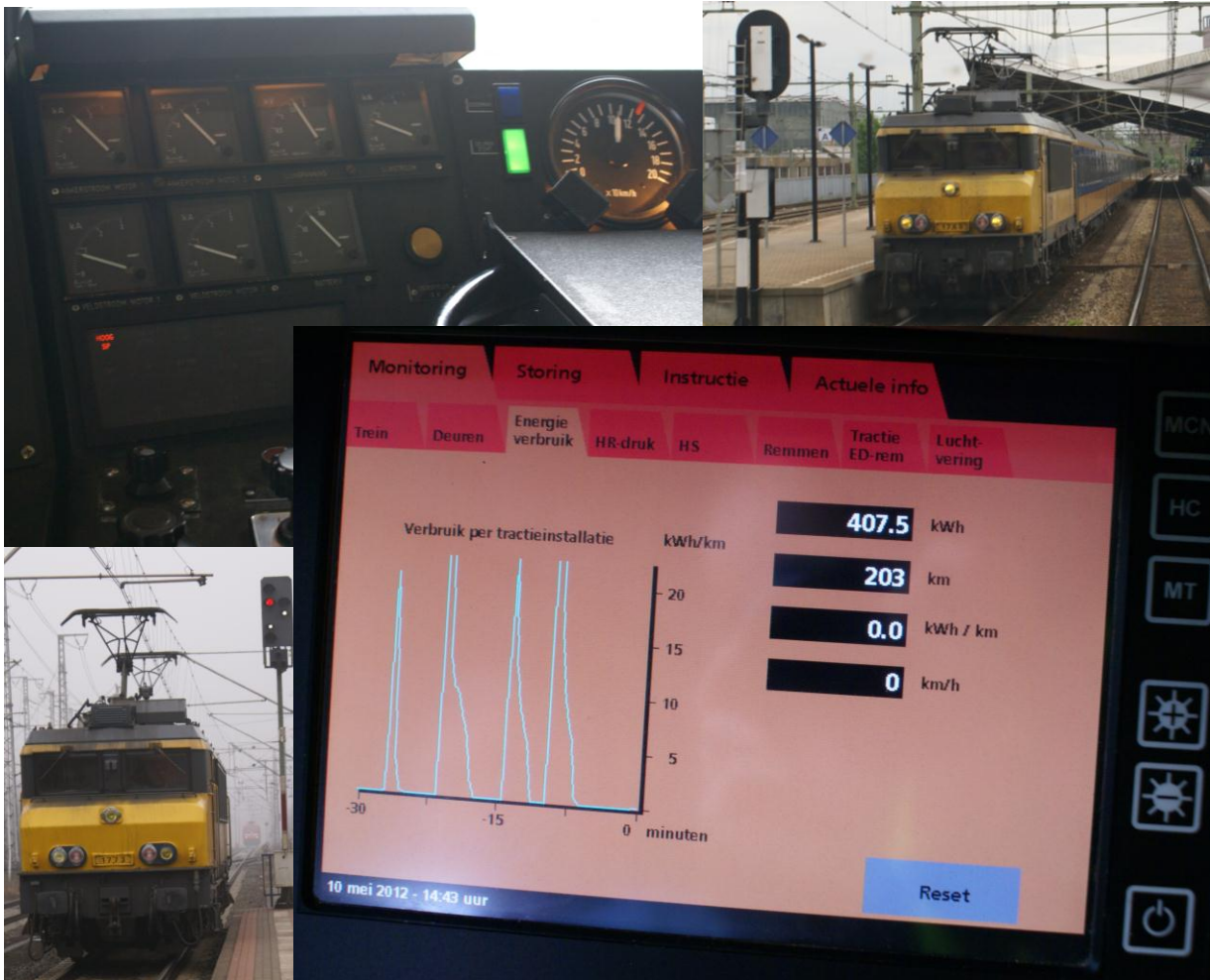


# Rijtijdspeling in treindienstregelingen: energiezuinig rijden versus robuustheid

*Onderzoek naar het ontwikkelen van een model dat de energieoptimale rijstrategie van een trein bepaalt*

G.M. Scheepmaker, BSc

(4102061)





*MSc thesis Civiele Techniek*

# Rijtijdspeling in treindienstregelingen: energiezuinig rijden versus robuustheid

---

*Onderzoek naar het ontwikkelen van een model dat de energieoptimale  
rijstrategie van een trein bepaalt*

G.M. Scheepmaker, BSc

(4102061)

Nederlandse Spoorwegen (NS) Reizigers, afdeling Materieel & Energie  
Utrecht, 24-1-2013

Afstudeercommissie:

Prof. Dr. Ir. B. van Arem	(TU Delft afdeling Transport & Planning)
Em. Prof. Dr.-Ing. I.A. Hansen	(TU Delft afdeling Transport & Planning)
Dr. R.M.P. Goverde	(TU Delft afdeling Transport & Planning)
Ir. P.B.L. Wiggenraad	(TU Delft afdeling Transport & Planning)
Ir. R.S. Luijt	(NS Reizigers afdeling Materieel & Energie)
Dr. R.R.P. van Nooyen	(TU Delft afdeling Watermanagement)



## Voorwoord

Deze masterscriptie is opgesteld als afsluiting van de Master (MSc) Civiele Techniek aan de Technische Universiteit (TU) Delft. Dit rapport vormt de verslaglegging van het onderzoek naar de optimalisatie van de verdeling van de rijtijdspeeling voor treinen bij de Nederlandse Spoorwegen (NS) Reizigers. De reden voor dit onderzoek is dat op dit moment niet expliciet rekening wordt gehouden met energiezuinig rijden (EZR) in de dienstregeling. Het onderzoek is uitgevoerd van 1 april 2012 tot en met 4 februari 2013.

Tijdens mijn stage bij ProRail, waar ik mij bezig hield met het ontwerpen van de basisuurpatronen (BUP) van de dienstregeling 2013, merkte ik heel sterk dat het dienstregelingontwerpproces en de -analyse mij erg aanspraken. Daarnaast heeft het treinmaterieel van kleins af aan mijn interesse. De afstudeeropdracht bij NS Reizigers voorziet in beide onderwerpen, vandaar dat deze afstudeeropdracht mij heel erg aanspreekt. Het mooie van deze opdracht is bovendien dat er een prachtige koppeling zit tussen de theorie en de praktijk.

Al met al had deze masterscriptie niet tot stand kunnen komen zonder de hulp van vele personen. Allereerst wil ik mijn beide dagelijkse begeleiders ontzettend bedanken. Dr. Rob Goverde, vanuit de TU Delft, wil ik heel erg bedanken voor het geduld en de tijd die hij altijd vrij maakte om mij te helpen als ik vragen had of vast liep met mijn onderzoek. Daarnaast wil ik Ir. Ralph Luijt, vanuit NS Reizigers, ontzettend bedanken voor de mogelijkheden die ik binnen NS Reizigers heb gekregen om mijn onderzoek uit te kunnen voeren. Dankzij Ralph Luijt is tevens een grote jongensdroom van mij realiteit geworden, namelijk meegaan met de machinisten op de bok.

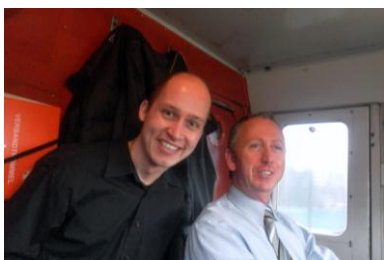
Ten tweede wil ik de overige leden van de afstudeercommissie bedanken voor de hulp, tijd en inspanning om mij te helpen met het afstuderen. Ook vanuit het bedrijfsleven zijn er veel mensen die mij hebben geholpen. Allereerst wil ik de machinisten van NS Reizigers bedanken voor de vele ritten die ik met hen mee heb mogen maken. Tevens wil ik ook de andere mensen binnen Lloyd's Register Rail Europe B.V., Movares, NS Reizigers, ProRail, Royal HaskoningDHV, TTG Europe, TU Delft, TU Dresden en de Universiteit van Zuid-Australië bedanken voor hun hulp en informatie.

Ten derde wil ik de vele vrijwilligers bedanken voor het uitvoeren van de GPS metingen. Hoewel ik zelf de data (nog) niet heb gebruikt, zijn ze heel erg van belang voor vervolgonderzoek. Daarbij wil ik specifiek mijn moeder en Jonathan van den Helder bedanken, vanwege de vele metingen die zij hebben gedaan.

Ten vierde wil ik ook mijn verloofde (Kim Pilon), mijn familie en mijn vrienden ontzettend bedanken. Zij hebben mij heel erg geholpen tijdens het afstuderen met wijze raad, advies en feedback op mijn geleverde werk. Ten slotte wil ik bovendien God heel erg bedanken en Hem de eer geven met mijn afstudeerverslag, want zonder Hem was dit alles niets geworden (Joh. 15:5).

Delft, 24-1-2013

Gerben Scheepmaker



## Samenvatting

### *Aanleiding*

In opdracht van de Nederlandse Spoorwegen (NS) Reizigers is onderzoek verricht naar de mogelijkheden om energiezuinig rijden (EZR) beter in de treindienstregeling te integreren. De aanleiding voor dit onderzoek is het feit dat energiezuinig rijden op dit moment nog niet optimaal in de dienstregeling wordt meegenomen. De reden hiervan is dat de rijtijdspeling niet optimaal verdeeld is. De rijtijdspeling is de extra rijtijd boven op de minimale rijtijd tussen twee dienstregelpunten.

### *Doel- en vraagstelling*

Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een model waarmee het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid voor treinen en de daarbij behorende rijtijdspelingverdeling bepaald kunnen worden; rekening houdend met de gewenste robuustheid, de mogelijkheden om energiezuinig te rijden en de gewenste punctualiteit in de dienstuitvoering.

De doelstelling is vertaald naar de volgende hoofdvraag van het onderzoek: welke stappen moeten worden gezet zodat er een model ontstaat waarmee het uitrolmoment en de kruissnelheid bepaald worden en daarmee de rijtijdspeling zo goed mogelijk verdeeld wordt?

### *Theoretisch kader en praktische achtergronden*

Energiezuinig rijden wordt pas door een machinist uitgevoerd als het veilig is op het spoor, de trein op tijd rijdt en er rijtijdspeling is. EZR is sterk gewenst, omdat het verschillende voordelen met zich mee brengt. Zo verminderen door EZR de CO<sub>2</sub> uitstoot en de kosten voor het energieverbruik. Daarnaast worden er kosten bespaard voor het beheer en onderhoud van materieel en infrastructuur, doordat de snelheid van de trein over het algemeen lager is waardoor er minder slijtage optreedt. Tevens is daardoor de geluidshinder minder. Ten slotte verbetert EZR het comfort van de treinreizigers en de conducteurs, bijvoorbeeld als de trein minder vaak met de maximumsnelheid door afbuigende wissels heen rijdt.

EZR is een thema dat in de spoorgeschiedenis in Nederland een aantal keren sterk naar voren is gekomen. Op dit moment wordt door NS Reizigers de UZI-methode (Universeel Zuinig rijden Idee) geleerd aan machinisten bij de opleiding en bij de herinstructie. Deze methode stelt dat de machinist zo vlot mogelijk versnelt tot de gewenste snelheid en vervolgens op het juiste moment de tractie uitschakelt. Daarnaast is onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om beter anticiperend te rijden door middel van RouteLint, waarmee informatie over de locatie en vertraging van omliggende treinen wordt getoond. Tevens heeft ProRail in Nederland samen met TU Dresden onderzoek gedaan naar een 'Driver Advisory System' (DAS) genaamd BEA ('Basic Energy Analysis'). BEA bepaalt de energieoptimale rijstrategie en probeert daarmee het tractie energieverbruik te minimaliseren. Zowel het project RouteLint als BEA zijn uiteindelijk niet verder gekomen dan een pilot, doordat partijen binnen de projecten niet verder wilden gaan met de ontwikkeling van de systemen.

Ook in het buitenland wordt veel onderzoek gedaan naar het energiezuinig rijden van treinen, waarbij het zich sterk richt op het 'Driver Information System' (DIS) en het DAS. Australië is op dit gebied de koploper. Daar is inmiddels al een concreet DAS ontwikkeld dat verkrijgbaar is als commercieel product onder de naam 'Freightmiser' of 'Energymiser'. Het systeem berekent de energieoptimale rijstrategie en is gebaseerd op de optimale besturingstheorie. Daarnaast vindt in Zweden en Zwitserland onderzoek plaats naar 'Traffic Management System' (TMS), waarmee getracht wordt om op netwerk niveau het energieverbruik bij treinen te minimaliseren. Ten slotte is het toepassen van elektrodynamische (ED) remmen een onderwerp waar veel aandacht aan wordt besteed in het buitenland. Hiermee wordt energie terug gewonnen tijdens de remfase

van een trein. De voordelen hiervan zijn groter naarmate er sprake is van een hogere bovenleidingspanning en heuvelachtig gebied.

Niet alleen de railsector doet onderzoek naar EZR, ook bij andere vervoersmodaliteiten als wegverkeer, scheepvaart en luchtvaart wordt hier de nodige aandacht aan besteed. De verschillende modaliteiten schrijven allemaal een kruis- (constante snelheid) en uitrolfase voor om energie te kunnen besparen. Het verschil is echter dat de voordelen van uitrollen in de railsector erg groot zijn, omdat de wrijvingsweerstand tussen stalen wielen en stalen rails veel kleiner is dan bijvoorbeeld tussen rubber banden en asfalt. Hierdoor kan een trein veel langer uitrollen. Ook is het bij treinen en vliegtuigen gewenst om met EZR zo snel mogelijk te accelereren, terwijl dit bij wegverkeer en scheepvaart niet gewenst is, vanwege de slechte verbranding in de motor.

De rijtijdspeling wordt op dit moment door de planners verdeeld tijdens het dienstregelingsontwerpproces in het dienstregelingsontwerpprogramma Donna. De verdeling gebeurt daarbij in principe volgens de plannormen en indien dat niet kan volgens de afkeurnormen die omschreven staan in de Netverklaring. Het dienstregelingsontwerpproces verloopt op dit moment echter niet ideaal. Ten eerste blijken niet alle conflicten die tijdens het plannen ontstaan, automatisch door Donna gedetecteerd te worden. Daarnaast is Donna nog niet gevalideerd, waardoor er afwijkingen bestaan tussen de theorie en de praktijk. Ook blijken de randvoorwaarden die meegegeven worden aan het ontwerp niet altijd haalbaar te zijn. Ten slotte leidt het straktrekken van de dienstregeling tot ongewenste resultaten. Hierbij wordt de speling zoveel mogelijk voor de knoopstations geplaatst waar de punctualiteit wordt gemeten. In de praktijk blijkt de dienstregeling vaak niet haalbaar, waardoor de machinisten het vertrouwen in het ontworpen treinpad verliezen en hun eigen tijden gaan aanhouden. Hierdoor hinderen ze andere omliggende treinen en is EZR niet (goed) mogelijk. Daarnaast voert NS Reizigers onderzoek uit naar de verbetering van de rijtijdspeling. Zo heeft zij het model SOM ('Stochastic Optimization Model') ontwikkeld, dat een cyclische dienstregeling zoekt met zo min mogelijk gewogen vertraging, gegeven een verstoringsscenario. Op dit moment is echter niet duidelijk wat de gevolgen van de herverdeling van de rijtijdspeling volgens SOM zijn op het totale energieverbruik van de treinen.

### *Data*

Om het model te ijken, te verifiëren, te valideren en de modelresultaten in de praktijk te bestuderen is er data nodig. Verschillende databronnen zijn hiervoor beschikbaar. Uiteindelijk is besloten om de volgende data te gebruiken: energiegegevens per materieeltype geleverd door Lloyd's Register Rail Europe B.V., de dienstregeling uit Donna en de bandbreedtegrafiek die per dienstregelpunt informatie geeft over de punctualiteit uit Trento.

Het model heeft daarnaast inputdata nodig. Ten eerste is infrastructuurdata noodzakelijk. Deze wordt geleverd vanuit Infra Atlas en Wegkennisbank. De materieeldata is afkomstig van de internetapplicatie TreinPlein. Ten derde komt de data van de dienstregeling uit de basisuurpatroon dienstregeling van 2012 uit Donna. De gegevens met betrekking tot de punctualiteit komen tot slot uit Trento.

### *Methode*

Het gedrag van een trein wordt beschreven door verschillende vergelijkingen. De rijtijd van een trein wordt bepaald door materieeleigenschappen en infrastructuurkenmerken. De materieeleigenschappen bepalen uiteindelijk de trekkracht, de remkracht en de treinweerstand. Daarnaast zorgen de infrastructuurkenmerken voor de baanweerstand. Deze weerstanden tezamen geven de totale weerstand die op een trein werkt. Het verschil tussen de trekkracht en de totale weerstand bepaalt het trekkrachtoverschot en samen met de massa van de trein dus de versnelling van de trein. Vervolgens wordt het gedrag van een trein omschreven door vier rijregimes, te weten: accelereren, constante snelheid ('cruisen'), uitrollen



en remmen. Met deze rijregimes worden twee rijstrategieën afgeleid: de tijdoptimale en de energieoptimale rijstrategie. Bij de tijdoptimale rijstrategie gaat het erom dat een trein zo snel mogelijk van A naar B rijdt en dat gebeurt met de rijregimes acceleratie, remmen en eventueel 'cruisen'. Bij de energieoptimale rijstrategie rijdt een trein dezelfde afstand, alleen dan met zo min mogelijk tractie-energieverbruik gegeven de beschikbare tijd uit de dienstregeling. Hierbij vormt het rijregime uitrollen een wezenlijk onderdeel. Met behulp van de optimale besturingstheorie is de energieoptimale rijstrategie bepaald. Het algoritme dat in MATLAB is toegepast bepaalt het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid gegeven de tijd van de dienstregeling aan de hand van het feit dat vanuit de theorie bekend is hoe de optimale rijstrategie eruit ziet.

Dit onderzoek is gekoppeld aan een ('kwart minuten') pilot van NS Reizigers. In deze pilot doet zij onderzoek of het aanbieden van nauwkeurigere tijdseenheden leidt tot een meer robuuste dienstregeling en betere resultaten in termen van EZR dan de huidige dienstregeling. De tijdseenheid die in de pilot gekozen is, is kwart minuten (15 s). De pilot is uitgevoerd op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen voor de sprinterserie 7400 en is gekoppeld aan dit afstudeeronderzoek door een case studie. Hierbij wordt de dienstregeling die volgt vanuit het model in de praktijk getest.

### Resultaten

Het model is stap voor stap in MATLAB opgebouwd en geanalyseerd voor het traject Utrecht Centraal – Rhenen voor de sprinterserie 7400 met materieeltype SLT VI. Allereerst is het model gekalibreerd (geijkt) aan de hand van het materieeltype VIRM 1 IV. De modelresultaten zijn vergeleken met gegevens van Lloyd's Register Rail Europe B.V. Zij hebben in opdracht van NS Reizigers in 2009 enkele energieberekeningen gedaan voor de verschillende rijregimes voor verschillend type materieel. Uit de analyse blijkt dat de resultaten van het model in het algemeen goed overeen komen met de gegevens van Lloyd's Register Rail. De grootste afwijkingen zijn te wijten aan het feit dat de gegevens voor het model van materieel uit TreinPlein gebaseerd zijn op nieuwe coëfficiënten voor de trekkracht en de treinweerstand, terwijl de gegevens van Lloyd's Register Rail gebaseerd zijn op de oude coëfficiënten.

Naast de kalibratie is het model geverifieerd, waarbij is onderzocht in hoeverre de modelresultaten overeen komen met de werkelijkheid en hoe de energieoptimale rijstrategie zich ten opzichte van de UZI-methode verhoudt. Hieruit blijkt dat het model resultaten oplevert die aan de verwachtingen voldoen en dat het algoritme het theoretisch optimum goed benadert. Het model is toegepast op het traject Utrecht Centraal – Rhenen. Gegeven de dienstregeling uit Donna zijn er slechts een beperkt aantal trajectdelen waar energiezuinig gereden kan worden. De energieoptimale rijstrategie levert een besparing op van 19,6% (€ 8,39 per rit) ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie op dit gehele traject. De UZI-methode maakt een besparing mogelijk van 15,1% (€ 6,46 per rit) ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie op het complete traject. In theorie blijkt dat er nog een extra besparing mogelijk is van 5,3% (€ 1,93 per rit) op het traject Utrecht Centraal - Rhenen als de energieoptimale rijstrategie in plaats van de UZI-methode wordt toegepast. Ten slotte is de rijtijdspeeling uniform herverdeeld op het traject en is opnieuw gekeken naar de mogelijkheden van energiezuinig rijden, zonder omliggende treinen te hinderen. Hieruit blijkt dat er nog een extra besparing (bovenop de hiervoor genoemde besparingen) mogelijk is van 9,4% (€ 3,22 per rit) voor de energieoptimale rijstrategie en 5,5% (€ 2,01 per rit) voor de UZI-methode op het totale traject. Deze analyse toont daarmee aan dat het straktrekken van de dienstregeling ongunstig is voor energiezuinig rijden.

Ten derde is een validatie uitgevoerd om te toetsen in hoeverre de modelresultaten overeen komen met de praktijk. Daaruit blijkt dat het model resultaten oplevert die goed met de praktijk overeen komen. De resultaten van het model en de bandbreedtegrafiek van Trento tonen aan dat de tijdoptimale rijstrategie uit Donna niet haalbaar is. Zo blijkt uit beide dat de trein te laat op station Driebergen-Zeist aankomt. Hetzelfde blijkt uit de analyse van de rijtijden en de



dienstregeling uit Donna en van de 'kwart minuten' pilot. Donna genereert rijtijden die veelal lager zijn dan het model voorspelt. De reden hiertoe is mogelijk het feit dat Donna geen rekening houdt met baanweerstand voor reizigerstreinen, waar het model wel rekening mee houdt. Ook is Donna nog niet gevalideerd.

Vanuit de pilot van NS Reizigers zijn enkel tussenresultaten bekend, doordat deze pilot nog niet is afgerond op moment van schrijven van dit onderzoek. Uit de tussenpeiling blijkt dat de dienstregeling tot en met Driebergen-Zeist strak is ingelegd en de tijden niet haalbaar zijn voor machinisten. Ook blijkt dat de meeste machinisten het gebruik van kleinere tijdseenheden als een verbetering zien, doordat het een betere referentie voor het tijdspad geeft. Het advies van machinisten is wel om meer referentiepunten in de vorm van locaties weer te geven om hun tijdspad beter te kunnen controleren.

Het model is tevens toegepast in de praktijk. Daarbij zijn de modelresultaten vertaald naar een concreet dienstkaartje voor de machinist. Uit de test blijkt dat het model werkt in de praktijk. Wel blijkt dat de materieeleigenschappen treinweerstand en remstand 1 volgens het Automatische treinbeïnvloeding (ATB) systeem mogelijk te conservatief zijn opgesteld. Zo rolt de trein in de praktijk langer uit dan het model stelt en daarnaast is de remkracht in remstand 1 in de praktijk minder fors dan het model aangeeft. Daarbij dient wel opgemerkt te worden dat er sprake is van redelijk ideale omstandigheden tijdens de praktijkmeting, terwijl de parameters van het materieel rekening houden met minder gunstige omstandigheden. Bovendien is er slechts één meting verricht en kunnen de uitspraken dus niet meteen generaliseerd worden.

### *Conclusies*

Uit dit onderzoek wordt geconcludeerd dat het mogelijk is om een werkend model op te bouwen in MATLAB. Dit model bepaalt de energieoptimale rijstrategie door het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid te berekenen, vanuit het gegeven dat bekend is hoe de oplossing van de energieoptimale rijstrategie eruit ziet. Het model geeft resultaten die dicht bij het theoretische optimum liggen met betrekking tot het energieverbruik. Daarbij houdt het model rekening met de gewenste robuustheid en de gewenste punctualiteit in de dienstuitvoering. De resultaten van het onderzoek laten zien dat er aanzienlijke energiebesparingen mogelijk zijn door gebruik te maken van de UZI-methode in plaats van tijdoptimaal rijden (15,1% energiebesparing oftewel € 6,46 per rit). Deze energiebesparingen zijn nog groter indien de energieoptimale rijstrategie wordt toegepast (19,6% energiebesparing oftewel € 8,39 per rit). Jaarlijks zijn er op het traject Utrecht Centraal – Rhenen voor de treinserie 7400 besparingen mogelijk van bijna € 26.400 indien de energieoptimale rijstrategie in plaats van de UZI-methode wordt toegepast (5,3% energiebesparing oftewel € 1,93 per rit). Bovendien laten de resultaten van het onderzoek zien dat een uniform verdeelde rijtijdspeling extra energiebesparingen oplevert en zorgt voor een verbetering van de punctualiteit ten opzichte van de methode van het straktrekken van de dienstregeling. De extra besparing die jaarlijks mogelijk is door het uniform verdelen van de rijtijdspeling is bijna € 44.000 voor de energieoptimale rijstrategie (9,4% energiebesparing oftewel € 3,22 per rit) en is bijna € 27.500 voor de UZI-methode op alleen het traject Utrecht Centraal – Rhenen (5,5% energiebesparing oftewel € 2,01 per rit).

### *Aanbevelingen*

Op basis van de conclusies worden de volgende aanbevelingen gedaan:

1. Laat het idee van het straktrekken van de dienstregeling los. Dit wordt sterk aanbevolen, omdat hierdoor de punctualiteit verbetert en de mogelijkheden voor energiezuinig rijden toenemen.
2. Valideer Donna. Onderzoek hiernaar wordt sterk aanbevolen, om zo de ontworpen dienstregeling beter met de praktijk te laten overeenkomen.

3. Onderzoek de mogelijkheden om bij de planning van de dienstregeling EZR mee te nemen. Uit het onderzoek is gebleken dat er op dit moment geen aandacht aan EZR wordt besteed tijdens de planfase van de dienstregeling, terwijl uit dit onderzoek blijkt dat er aanzienlijke besparingen mogelijk zijn met EZR. Aanbevolen wordt om onderzoek te doen naar hulpmiddelen waarmee tijdens de planfase rekening met EZR gehouden kan worden.
4. Onderzoek de mogelijkheden om de UZI-methode verder te verbeteren. Uit het onderzoek is gebleken dat de energiebesparingen bij NS Reizigers vergroot kunnen worden door naast het optimale uitrolmoment, ook de optimale kruissnelheid te integreren in de UZI-methode. Dit komt doordat hiermee de energieoptimale rijstrategie beter wordt benaderd. Vervolgonderzoek hiernaar wordt sterk aanbevolen.
5. Onderzoek de gevolgen van SOM op het totale energieverbruik van treinen. NS Reizigers doet onderzoek naar de toepassing van dit model bij het ontwerpen van de dienstregeling. De gevolgen van de ontworpen dienstregeling op het totale energieverbruik van treinen zijn echter nog niet duidelijk. Aanbevolen wordt om hiernaar vervolgonderzoek te doen.
6. Voer meer praktijkmetingen uit en (her)ijk mogelijk de parameters van het model. Op dit moment is er slechts één praktijkmeting uitgevoerd van het model. Om betrouwbare wetenschappelijke uitspraken te kunnen doen is het noodzakelijk om meerdere metingen uit te voeren. Uit de enkele meting is gebleken dat de praktijkresultaten gunstiger zijn dan de theorie. Als dit ook uit andere metingen blijkt, wordt aanbevolen om opnieuw de treinweerstandcoëfficiënten te analyseren en mogelijk te (her)ijken en daarnaast grondig onderzoek te doen naar de remkracht.
7. Valideer het energieoptimale deel van het model. De energieoptimale rijstrategie in het model is nog niet gevalideerd. Aanbevolen wordt om aan de hand van energiemetingen het model te valideren.
8. Analyseer de verzamelde GPS data. Voor het onderzoek zijn veel GPS metingen op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen verricht. Deze data is nog niet verwerkt en geanalyseerd. Aanbevolen wordt om in vervolgonderzoek deze data uit te werken. Mogelijk kan de data gebruikt worden om correctiefactoren in Trento te valideren of om de uitrolmomenten in het model te ijken.
9. Onderzoek de mogelijkheden naar de optimale rijdspelingverdeling. Het model kan uitgebreid worden naar een versie die de optimale verdeling van de rijdspeling bepaalt, zodat de dienstregeling robuust is en de mogelijkheden voor energiezuinig rijden optimaal zijn.
10. Implementeer de wiskundige formules van de optimale besturingstheorie in MATLAB. Vervolgonderzoek hiernaar wordt aanbevolen, om te onderzoeken of deze alternatieve methode, waarbij MATLAB direct de wiskundige differentiaalvergelijkingen vanuit de theorie toepast, sneller een oplossing genereert dan de ontwikkelde methode in het model.

## Summary

### *Motivation*

Commissioned by the Dutch Railways Operation (NS Reizigers) research has been conducted on the possibilities to better incorporate energy-efficient train operation into the timetable. The motivation for this research is based on the fact that energy-efficient operation is not yet optimally included in the timetable design. This is because of the fact that the running time supplement is not optimally divided. Running time supplement or slack time is the running time above the minimal running time between two timetable points.

### *Objective and research questions*

The objective of the research is to develop a model which determines the optimal coasting point and the optimal cruising speed for trains and the associated running time supplement distribution; taking into account the desired robustness, the possibilities for energy-efficient operation and the desired punctuality during the execution of the timetable.

The objective is translated towards the following main research question: which steps have to be taken to develop a model which both determines the optimal coasting point and cruising speed and distributes the running time supplement in the best possible way?

### *Theoretical framework and practical background*

Energy-efficient operation is only applied by a train driver if it is safe on the tracks, the train drives punctual and there is slack time available. This kind of operation is strongly recommended as it has various advantages. Firstly by applying energy-efficient operation the emission of CO<sub>2</sub> and the costs of energy use decrease. Secondly costs are saved by the lower cost of management and maintenance of rolling stock and infrastructure, because the speed of the train is in general lower which causes less wear. Thirdly the noise pollution decreases. Finally energy-efficient train operation improves the comfort of the passengers and the train conductors, for example because the train does not drive at maximum speed through a deflecting switch.

Energy-efficient operation is a subject that has come forward many times in the Dutch rail history. At this moment, NS Reizigers is using the so called UZI ('Universeel Zuinig rijden Idee') method during training of train drivers. This method prescribes that a train driver accelerates as soon as possible to the desired speed and then starts coasting at the right point by switching off the traction of the train. Research has been conducted on the possibilities of better anticipatory driving by means of RouteLint, which gives information about the location and delay of surrounding trains. Infrastructure manager ProRail has also performed research together with the Technical University (TU) Dresden towards the Driver Advisory System (DAS) named BEA (Basic Energy Analysis). BEA determines the energy-efficient driving strategy and tries to minimize the energy consumption of the traction. Both projects RouteLint and BEA were terminated after a pilot as parties in the projects did not want to continue the development of these systems.

Also abroad a lot of research is done focusing at energy-efficient train operation mainly on Driver Information System (DIS) and DAS. Australia is leading in this area, after developing a DAS which is available as a commercial product using the name Freightmiser or Energymiser. This system calculates the energy-efficient driving strategy and is based on the optimal control theory. Besides that, in Sweden and Switzerland research is done on Traffic Management System (TMS), which aims to minimize the energy use of trains on network level. Finally the use of electrodynamic (ED) brakes is a subject which is studied a lot abroad. With these ED brakes energy is won back during the braking phase of a train. The advantages of these brakes are bigger if there is a higher voltage on the catenary and for mountain areas.

Other modes of transport such as road, shipping and air transport are also researching the possibilities of energy-efficient operation. All these modes prescribe the use of a cruising and coasting phase to save energy. However the difference between these modes and rail transport is that the friction between steel wheels and the steel rails is much smaller than for example between rubber tires and asphalt. This enables the train to coast longer than for example cars. For both trains and airplanes it is desirable to accelerate as quickly as possible when applying energy-efficient operation, while at road and shipping transport this is not desirable due to inefficient combustion in the engine.

Running time supplements are at present distributed by the designers of the timetable during the timetable design process in the program Donna. This distribution is in principle applied according to the planning standards. In case this is not possible the rejection standards are used which are described in the 'Netverklaring'. Timetable design process is not optimal yet. First not all conflicts which exist during the designing process are automatically detected by Donna. Second Donna is not validated yet, which causes deviations between theory and practice. Also the preconditions given in the design process are not always feasible. Last, tightening the timetable leads to unfavorable results. Tightening the timetable means that the running time supplements are placed as much as possible close to stations where the punctuality is measured. In practice the designed timetable according to this principle is often not feasible. Some train drivers have therefore lost confidence in the designed train path and are applying their own timetable. They hinder other surrounding trains and make energy-efficient operation impossible. Moreover, NS Reizigers investigates the possibilities to improve the slack time. They have developed a model called SOM (Stochastic Optimization Model), which tries to find a cyclic timetable with the least total weighted delay given a disruption scenario. Currently it is not clear what the effects of the redistribution of the slack time are on the total energy use of trains.

### *Data*

Data is needed for calibration, verification and validation of the model and for studying the model results from practice. Different data sources are available. It has been decided to use the following data: energy data for every rolling stock type delivered by Lloyd's Register Rail Europe B.V., the timetable from Donna and the bandwidth graph from Trento which give information about the punctuality.

Besides this, the model requires input data. First of all infrastructure data is necessary which is acquired from Infra Atlas and Wegkennisbank. Rolling stock data is retrieved from the internet application TreinPlein. Thirdly data from the timetable 2012 is obtained the basic hour pattern from Donna. Finally the data from the punctuality is obtained from Trento.

### *Method*

The behavior of a train is described by different equations. The running time of a train is determined by rolling stock and infrastructure characteristics. Rolling stock characteristics finally determine the traction force, the braking force and the train resistances. Infrastructure characteristics determine the track resistances. These resistances together give the total resistance on the train. The difference between the traction force and the total resistance determines the traction surplus, which together with the train mass, determines the acceleration of the train. The behavior of a train is described by four driving regimes: acceleration, cruising, coasting and braking. These driving regimes this study considers two driving strategies: time optimal and energy-efficient. The time optimal driving strategy requires a train to drive as fast as possible from A to B using the driving regimes acceleration, braking and possibly cruising. The energy-efficient driving strategy requires a train to drive also from A to B using as less as possible traction energy given the available time from the timetable. The coasting regime is an important part in this strategy. The energy-efficient driving strategy is determined by the optimal control theory. The algorithm which is applied in MATLAB

determines the optimal coasting point and the optimal cruising speed given the time from the timetable using the fact that from theory it is known what the optimal driving strategy looks like.

This research links to a pilot of NS Reizigers. This pilot investigates whether more accurate time fractions leads to a more robust timetable and better results in terms of energy-efficient operation compared to the current timetable. The time fraction which is used in the pilot is 15 s ('quarter minute' pilot). The pilot is implemented on the section Utrecht Central – Rhenen for the sprinter train series 7400 and linked to this graduation research in the form of a case study. In this case study the timetable of the model is tested in practice.

### Results

The model has been build step by step in MATLAB and has been analyzed for the section Utrecht Central – Rhenen for the sprinter train series 7400 with rolling stock type SLT VI. First of all the model is calibrated on the basis of rolling stock type VIRM 1 IV. The model results are compared with the data from Lloyd's Register Rail Europe B.V. They performed some energy calculations for different driving regimes for different types of trains commissioned by NS Reizigers in 2009. The results of the model seem to fit the data from Lloyd's Register Rail. The greatest deviations are caused by the fact that data of the rolling stock from the TreinPlein data are based on new coefficients for the traction force and the train resistance, while the data of Lloyd's Register Rail is based on old coefficients.

Alongside the calibration of the model, the model is also verified. The verification includes analyzing to which degree they agree with reality and how the energy-efficient driving strategy is related to the UZI method. This shows that the model delivers results which meet the expectations and the algorithm reaches the theoretical optimum pretty good. The model is applied on the section Utrecht Central – Rhenen. Given the timetable from Donna there are only a few parts along the complete section where it is possible to drive energy-efficient. The energy-efficient driving strategy supplies an energy saving of 19,6% (€ 8,39 per ride) compared to the time optimal driving strategy on the complete section Utrecht Central – Rhenen. The UZI method makes it possible to save 15,1% (€ 6,46 per ride) compared to the time optimal strategy on the complete section. In theory extra energy savings of 5,3% (€ 1,93 per ride) are possible on the complete section if the energy-efficient driving strategy is used instead of the UZI method. Finally the running time supplement is redistributed uniformly on the complete section and again the possibilities of energy-efficient operation have been investigated, without hindering surrounding trains. The results of the analysis show that extra savings (above the savings mentioned before) are possible of 9,4% (€ 3,22 per ride) for the energy-efficient driving strategy and 5,5% (€ 2,01 per ride) for the UZI method on the section Utrecht Central – Rhenen. This analysis shows that tightening of the timetable is unfavorable for energy-efficient train operation.

Also a validation is carried out to test whether the model results match the results from practice. This analysis shows that the model delivers results which have a good match with results from practice. The model results and the bandwidth graphs show that the time optimal driving strategy from Donna is not feasible. Trains are arriving too late at the station Driebergen-Zeist according to both results. The same follows from the analysis of the running times and the timetable from Donna and the 'quarter minute' pilot of NS Reizigers. Donna generates running times which in general are lower than the ones the model predicts. This is probably caused by the fact that Donna does not take into account track resistances for passenger trains, while the model does take them into account. Donna is also still not validated.

The pilot of NS Reizigers was not yet finished at the moment this report was being written, so only intermediate results are known. The so-far known results show that the timetable is tightened until station Driebergen-Zeist and the running times are not feasible for train drivers.



The results also show that most train drivers think that smaller time intervals are an improvement, because they give a better reference to the time path. Train drivers however advise to use more reference points in the timetable in form of locations to better check their time path.

The model was also applied to reality. In order to do this the model results have been translated into a service card used by train drivers (timetable for the train driver). The test results show that the model is working in practice. However the train characteristics train resistance and braking position 1 according to the Dutch ATP (Automatic Train Protection) system may have been chosen too conservative. In reality a train coasts longer than the model has computed, besides the braking force in position 1 is in practice less vigorous than the model computes. In addition to this it has to be stated that there were almost ideal conditions during the practical measurement, while the parameters of the rolling stock also take into account less favorable conditions. On top of that there is only one measurement and so the statements cannot be directly generalized.

### *Conclusions*

From this research it can be concluded that it is possible to develop a working model in MATLAB. This model determines the energy-efficient driving strategy by calculating the optimal coasting point and cruising speed based on the fact that it is known how the solution of the energy-efficient driving strategy looks like. The model gives results in terms of energy use which are quite close to the theoretical optimum. Thereby the model takes into account the desirable robustness and the desirable punctuality during the execution of the timetable. The results of the research show that there are significant energy savings possible by using the UZI method instead of the time optimal driving strategy (15,1% energy savings or € 6,46 per ride). These energy savings can be greater when using the energy-efficient driving strategy (19,6% energy savings or € 8,39 per ride). Yearly the energy savings are almost € 26.400 if the energy-efficient driving strategy is used instead of the UZI method on the section Utrecht Central – Rhenen for sprinter train series 7400 (5,3% energy savings or € 1,93 per ride). Moreover the results show that using a uniform distribution of the running time supplements leads to extra energy savings and an improvement for the punctuality compared to the method of tightening the timetable. These yearly extra savings which are possible by the uniform distribution instead of the current slack time are almost € 44.000 for the energy-efficient driving strategy (9,4% energy savings or € 3,22 per ride) and are almost € 27.500 for the UZI method on the section Utrecht Central – Rhenen (5,5% energy savings or € 2,01 per ride).

### *Recommendations*

Based on the conclusion the following recommendations can be made:

1. Stop the idea of tightening the timetable. This is strongly recommended, because due to tightening the timetable the punctuality decreases and the possibilities for energy-efficient operation decrease.
2. Validate Donna. Investigation towards this is strongly recommended, so the designed timetable matches practice better.
3. Research the opportunities to incorporate energy-efficient operation in the designing process of the timetable. The research shows that there is at present no attention to energy-efficient operation during the design phase of the timetable, while this research also shows that there are significant energy savings possible by energy-efficient operation. Follow-up study on tools for the design phase to take into account energy-efficient operation is recommended.
4. Investigate the opportunities to improve the UZI method further. This research shows that the energy savings of NS Reizigers can be increased by including the optimal cruising speed next to the coasting point in the UZI method. This is due to the fact that the energy-efficient driving strategy is better approximated. A follow-up study to this is recommended.

5. Examine the effects of SOM on the total energy use of trains. NS Reizigers is investigating whether to use this model during the design process of the timetable. The consequences of the designed timetable using SOM on the total energy use of trains are not clear yet. It is recommended to conduct further research on this subject.
6. Perform more measurements in practice and possibly (re)calibrate the parameters of the model. Only one measurement of the model has been carried out yet. To make reliable scientific statements more measurements are necessary. The measurement which is already done shows that the results from practice are better than the results from theory. If this remains the conclusion after the other measurements, it is recommended to analyze and possibly (re)calibrate the train resistance coefficients and the braking force.
7. Validate the energy-efficient part of the model. This part is still not validated. It is recommended to validate the model with the use of energy measurements.
8. Analyze the collected GPS data. A lot of GPS measurements have been done on the section Utrecht Central – Rhenen for train series 7400. The data is still not processed and analyzed. Further research to develop this data is recommended. The data can be used to validate the correction factors in Trento or to calibrate the coasting points of the model.
9. Investigate the opportunities towards the optimal running time supplement distribution. The model can be extended towards a version which also determines the optimal distribution of the running time supplement to increase the robustness of the timetable and the possibilities for energy-efficient train operation.
10. Implement the mathematical equations for the optimal control theory in MATLAB. Further research is recommended to examine if this alternative method, whereby MATLAB directly applies the differential equations from theory, reaches a solution faster than the developed method in the model of this research.





## Inhoudsopgave

Voorwoord .....	v
Samenvatting.....	vi
Summary .....	xi
1 Inleiding.....	1
1.1 Aanleiding .....	1
1.2 Probleemstelling.....	2
1.3 Doelstelling.....	2
1.4 Vraagstelling.....	2
1.5 Operationalisatie .....	2
1.5.1 Aanpak .....	2
1.5.2 Begrippen.....	6
1.6 Leeswijzer .....	8
2 Theoretisch kader en praktische achtergronden .....	9
2.1 Theoretisch kader rijtijdsdelingverdeling en energiezuinig rijden .....	9
2.1.1 Rijtijdsdelingverdeling .....	9
2.1.2 Energiezuinig rijden .....	11
2.1.3 Conclusie .....	17
2.2 Bestaande energiezuinig rijden en energiebesparende methodes .....	17
2.2.1 Nederland .....	17
2.2.2 Buitenland .....	25
2.2.3 Conclusie .....	27
2.3 Energiezuinig rijden bij andere vervoersmodaliteiten .....	27
2.3.1 Wegverkeer.....	27
2.3.2 Scheepvaart.....	28
2.3.3 Luchtvaart.....	29
2.3.4 Conclusie .....	29
2.4 Rijtijdsdelingverdeling in Nederland.....	30
2.4.1 Huidige methode rijtijdsdelingverdeling.....	30
2.4.2 SOM.....	31
2.4.3 Conclusie .....	33
3 Data.....	34
3.1 TROTS .....	34
3.2 Trento.....	35
3.3 EMMA.....	37



3.4	Methode relatief energieverbruik.....	38
3.5	Keuze methode data-analyse .....	40
3.6	Inputdata model .....	40
4	Methode.....	42
4.1	Keuze optimale treinbesturingstechniek.....	42
4.2	Rijtijdberekening.....	42
4.2.1	Treindynamica.....	42
4.2.2	Gedrag van een trein.....	45
4.3	Algoritme model.....	47
4.3.1	Tijdoptimaal.....	47
4.3.2	Energieoptimaal.....	49
4.4	Beschrijving pilot NS Reizigers.....	55
4.5	Beschrijving case studie .....	56
5	Resultaten .....	57
5.1	Kalibratie .....	57
5.1.1	Analyse model vs. materieelgegevens Lloyd's Register Rail .....	57
5.1.2	Conclusie .....	59
5.2	Verificatie .....	63
5.2.1	Tijdoptimale rijstrategie.....	63
5.2.2	Energieoptimale strategie.....	63
5.2.3	Totale model met UZI-methode.....	64
5.2.4	Herverdeling rijtijdspeling .....	73
5.2.5	Conclusie .....	78
5.3	Validatie .....	79
5.3.1	Bandbreedtegrafiek.....	79
5.3.2	Model vs. Donna .....	82
5.3.3	Conclusie .....	84
5.4	Pilot NS Reizigers .....	85
5.5	Case studie .....	85
5.5.1	Analyse praktijkmeting.....	85
5.5.2	Conclusie case studie .....	93
6	Conclusies .....	94
7	Aanbevelingen.....	96
8	Literatuurlijst .....	98

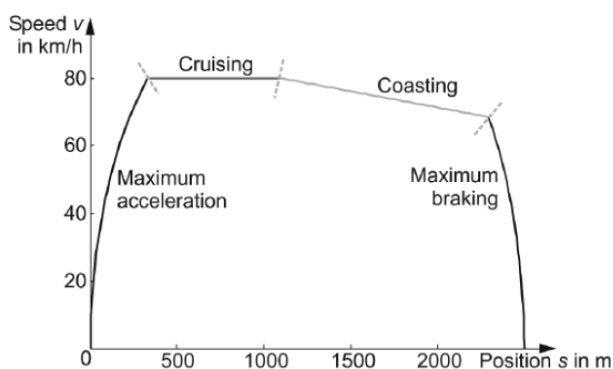
## 1 Inleiding

Energiezuinig rijden (EZR) en rijtijdspelingverdeling vormen de sleutelwoorden van deze afstudeerscriptie. Ook zijn deze twee elementen erg van belang in de praktijk bij NS Reizigers (NSR). Voor hen is het allereerst zaak om veilig met de treinen te rijden, maar daarnaast dienen de treinen ook op tijd te arriveren. Bovendien wil NS Reizigers ook haar steentje bijdragen aan het milieu door te laten zien dat zij een groen bedrijf is. Dit wil zij onder andere bereiken door energiezuinig te gaan rijden. In dit afstudeerrapport wordt onderzoek gedaan naar hoe de huidige energiezuinig rijden methode binnen NS Reizigers ten opzichte van het theoretische optimum presteert. Daarnaast wordt belicht hoe de dienstregeling nog verder geoptimaliseerd kan worden, zodat er meer energiezuinig gereden kan worden.

In dit hoofdstuk wordt het onderzoeksplan van de scriptie gepresenteerd. Allereerst wordt er ingegaan op de aanleiding van het onderzoek (paragraaf 1.1). Daarna wordt de probleemstelling in paragraaf 1.2 omschreven. Vervolgens wordt aandacht besteed aan de doelstelling (paragraaf 1.3) en aan de vraagstelling (paragraaf 1.4). De doel- en vraagstelling worden in paragraaf 1.5 geoperationaliseerd, waarbij ook de aanpak van het onderzoek wordt behandeld en de begrippen worden gedefinieerd. Bijlage 1 toont tot slot een lijst met de gebruikte afkortingen in dit rapport en geeft een omschrijving van deze afkortingen.

### 1.1 Aanleiding

Energieverbruik is tegenwoordig een belangrijk onderwerp, ook voor de spoorsector. NS kan veel geld besparen door het energieverbruik van treinen te verlagen. Daarnaast brengt dit ook externe baten met zich mee, zoals minder CO<sub>2</sub> (koolstofdioxide) uitstoot en minder geluidshinder. Binnen NS wordt veel aandacht besteed aan energiezuinig rijden door onder andere trainingen voor machinisten. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de UZI-methode (Universeel Zuinig rijden Idee). Het gaat er bij deze methode om dat een trein zo vlot mogelijk optrekt tot de gewenste snelheid, deze snelheid indien mogelijk vasthoudt en vervolgens op het juiste moment de tractie uitschakelt en uitrolt tot het station (NS, 2012a). De methode vertoont daarmee raakvlakken met de energieoptimale rijstrategie (T. Albrecht, 2008), die samengevat staat weergegeven in Figuur 1-1. Deze strategie wordt later uitvoerig behandeld in de hoofdstukken 2 en 4.



**Figuur 1-1: energie optimaal rijden op een eenvoudige sectie met een constante helling en maximumsnelheid (T. Albrecht, 2008, p. 86)**

EZR is daarnaast gekoppeld aan de dienstregeling<sup>1</sup>, omdat de dienstregeling bepaalt of er ruimte is om energiezuinig rijden toe te passen. Deze koppeling is nog niet optimaal, omdat het

<sup>1</sup> Twee cruciale elementen in de dienstregeling die niet mogen worden aangetast door energiezuinig rijden zijn: de veiligheid op het spoor en de robuustheid van de dienstregeling (en daaraan gekoppeld de punctualiteit in de uitvoering).

ontworpen snelheidsprofiel van de dienstregeling vaak niet overeenkomt met het snelheidsprofiel in de praktijk. Dit komt doordat de rijtijdspeling tussen twee stations niet optimaal verdeeld is. Rijtijdspeling is namelijk primair bedoeld om in iets slechtere omstandigheden dan berekend toch op tijd aan te komen of in goede omstandigheden mogelijke vertragingen in te lopen. Een optimale verdeling van rijtijdspeling hangt af van de gewenste robuustheid, de mogelijkheden voor energiezuinig rijden in de dienstregeling en de gewenste punctualiteit in de uitvoering van de dienstregeling. Er is behoefte om deze elementen meer met elkaar te integreren om zo tot een optimale verdeling van rijtijdspeling te komen en deze vervolgens ook helder met machinisten te communiceren.

## 1.2 Probleemstelling

Energiezuinig rijden is nog niet goed geïntegreerd in de dienstregeling. Eén van de belangrijkste oorzaken daartoe is het ontbreken van een methodiek voor het bepalen van een zo goed mogelijke verdeling van de rijtijdspeling gegeven de gewenste robuustheid, de mogelijkheden om energiezuinig te rijden en de gewenste punctualiteit in de dienstregeling uitvoering.

## 1.3 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een model waarmee het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid voor treinen en de daarbij behorende rijtijdspelingverdeling bepaald kunnen worden; rekening houdend met de gewenste robuustheid, de mogelijkheden om energiezuinig te rijden en de gewenste punctualiteit in de dienstuitvoering.

## 1.4 Vraagstelling

De hoofdvraag luidt: welke stappen moeten worden gezet zodat er een model ontstaat waarmee het uitrolmoment en de kruissnelheid bepaald worden en daarmee de rijtijdspeling zo goed mogelijk verdeeld wordt?

De deelvragen die hieruit afgeleid worden zijn:

1. Hoe werkt energiezuinig rijden en wat levert het op?
2. Wat is de huidige stand van zaken bij de rijtijdspelingverdeling?
3. Hoe kan met de gegeven data een model ontwikkeld worden om het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid te bepalen?
4. Hoe verhouden de modelresultaten zich met de bestaande energiezuinig rijden methodes?
5. Welk verband is er tussen de modelresultaten en de werkelijkheid?
6. Leidt het toepassen van het opgestelde model tot een verbetering van de rijtijdspelingverdeling?

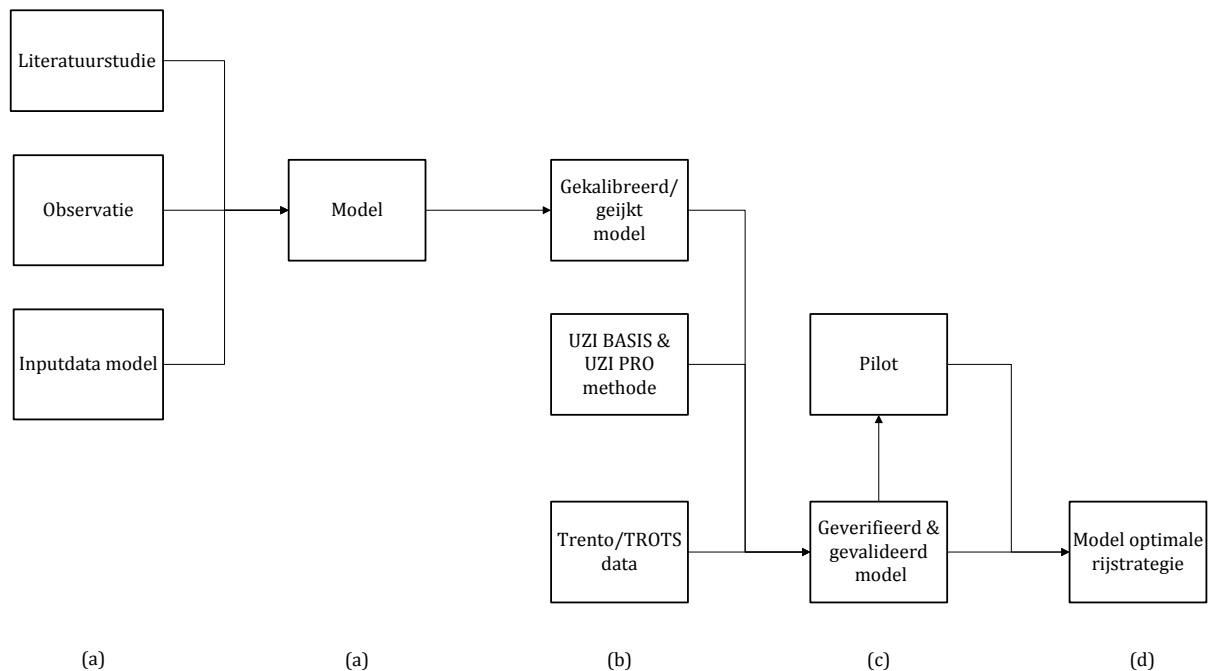
## 1.5 Operationalisatie

Binnen deze paragraaf wordt eerst gekeken welk onderzoek noodzakelijk is om de deelvragen te kunnen beantwoorden en daarmee wordt de aanpak van het onderzoek gepresenteerd (subparagraaf 1.5.1). Daarna volgt de afbakening van de begrippen die in dit onderzoek van belang zijn (subparagraaf 1.5.2).

### 1.5.1 Aanpak

Vanuit de doel- en vraagstelling wordt allereerst een onderzoeksmodel afgeleid, waarin te zien is welke onderdelen binnen het onderzoek uitgevoerd moeten worden en hoe deze activiteiten met elkaar samenvallen. Daarna volgt in subparagraaf 1.5.2 de uitwerking van het onderzoeksmodel in de onderzoeksstrategie.

## Onderzoeksmodel



**Figuur 1-2: onderzoeksplan optimale uitrolmomenten en verdeling van rijtijdspeeling**

Het onderzoeksmodel dat te zien is in Figuur 1-2 wordt als volgt verwoord: (a) een analyse van de beschikbare literatuur omtrent energiezuinig rijden (theorie, methodes en praktijkimplementaties), observaties uit de praktijk bij machinisten en inputdata voor het model over de infrastructuur, materieleigenschappen, dienstregeling en randvoorwaarden levert door kalibratie (ijking) een model in MATLAB op, waarmee de optimale uitrolmomenten en kruissnelheid gegeven de dienstregeling bepaald kunnen worden. (b) Hiermee wordt door de vergelijking van het model met de bestaande UZI BASIS en PRO methode en het vergelijken van de resultaten uit het model met de verwachte resultaten, het model geverifieerd. Met behulp van de vergelijking van het model met de bestaande gegevens van energiezuinig rijdende treinen uit Trento/TROTS data en de bestaande (rij)tijden vanuit de dienstregeling wordt het model gevalideerd. Hierbij dient het resultaat van de verificatie en validatie van het model als input voor een pilot (praktijkproef). (c) Een vergelijking van de resultaten van de validatie en verificatie van het model en de pilot resulteert in (d) een model dat de optimale rijstrategie bepaald.

## Onderzoeksstrategie

De onderzoeksstrategie die in dit onderzoek wordt toegepast is een experiment en specifiek de nabootsing van de werkelijkheid in een computersimulatie. Kenmerkend voor dit onderzoek is dat er een nieuw model wordt ontwikkeld om de optimale uitrolmomenten en de optimale kruissnelheid voor treinen en de optimale rijtijdspeelingverdeling te bepalen. Daarnaast wordt het model uitgevoerd in een computersimulatie (MATLAB<sup>2</sup>). Aan de hand van de computersimulatie kunnen voorspellingen worden gedaan over het optimale uitrolmoment en kruissnelheden van een trein en de spreiding van de rijtijdspeeling in de dienstregeling. De pilot in het onderzoek heeft betrekking op een specifiek baanvak (Utrecht Centraal – Rhenen) en vormt daarmee een enkelvoudige casestudie (Verschuren & Doorewaard, 2000). Hierna worden alle onderdelen binnen het onderzoeksmodel verder uitgewerkt.

<sup>2</sup> MATLAB ('MATrix LABoratory') is een software programma voor numerieke berekeningen en visualisering (Pratrap, 2006).

## Literatuurstudie

De literatuurstudie in dit onderzoek richt zich op verschillende terreinen. Met deze studie wordt getracht een antwoord te vinden op de deelvragen één en twee en er wordt geprobeerd een kader te schetsen van het energiezuinig rijden. De literatuurstudie bestaat uit de volgende onderdelen:

- Algemene theorie over 'energiezuinig rijden' en 'rijtijdsdelingverdeling';
- Bestaande 'energiezuinig rijden' methodes in Nederland;
- Toepassing 'energiezuinig rijden' in Nederland en in het buitenland;
- Toepassing 'energiezuinig rijden' bij andere vervoersmodaliteiten;
- De huidige stand van zaken met betrekking tot 'rijtijdsdelingverdeling' in Nederland.

## Observatie

Om ervaring op te doen met de praktijk van EZR zijn observaties van belang, immers gaat EZR uiteindelijk om de praktijk. Dit betekent dat er meegereden wordt met machinisten op de bok (machinistencabine), om zo inzicht te krijgen in de manier waarop machinisten omgaan met energiezuinig rijden en wat hun rijgedrag is. Dit kan informatie geven over de manier waarop machinisten meer optimaal rijgedrag (kunnen) vertonen en in hoe EZR het beste aan machinisten kan worden overgebracht. Tevens geeft het meerijden inzicht in de gevolgen van de theoretische rijtijdsdelingverdeling in de praktijk. Er wordt hier gekozen voor de vrije vorm van observatie om indringerig en pottenkijker gedrag zoveel mogelijk te voorkomen (Verschuren & Doorewaard, 2000). De observaties dienen als algemene achtergrond voor het energiezuinig rijden en geven inzicht voor deelvraag één.

## Dataverzameling en data-analyse

In dit onderdeel van het onderzoek is het noodzakelijk om alle data in te zamelen die nodig is voor het bouwen van het optimaliseringsmodel in MATLAB en voor het evalueren van het model. De data dient geleverd te worden door NS Reizigers (NSR), Lloyd's Register Rail Europe B.V. en ProRail. De dataverzameling moet direct na het werkplan gebeuren, omdat de data cruciaal is voor het vervolg van het onderzoek. De volgende data zijn nodig:

- Complete infrastructuur voor het onderzoeksbaanvak van de pilot (baanvak Utrecht Centraal – Rhenen): Infra Atlas<sup>3</sup> vanuit ProRail.
- Materieelkarakteristieken voor treinen op het onderzoeksbaanvak (ook ander materieel dan standaard om een vergelijking te maken): NSR en/of Lloyd's Register Rail Europe B.V.
- Dienstregeling op rijwegniveau: NSR en/of ProRail.
- Randvoorwaarden: NSR en/of ProRail.
- Trento (TRots EN TOol)/TROTS (TRein Observatie & Tracking Systeem) data voor snelheidsprofielen en energiemonitoring: NSR (energiemonitoring) en/of ProRail. De keuze voor Trento of TROTS als databron hangt af van de data waarmee NSR tijdens haar pilots over EZR analyses doet (energiemonitoring).

## Bouw en kalibratie optimaliseringsmodel

Voor het onderzoek naar het optimale uitrolmoment en de optimale 'cruising' snelheid of kruissnelheid is een wiskundig model noodzakelijk. Dit model wordt gebouwd (geprogrammeerd) in MATLAB. Allereerst is het van belang om MATLAB goed te bestuderen, specifiek op het gebied van numeriek oplossen van differentiaalvergelijkingen. Vervolgens wordt er met behulp van de gegevens uit de dataverzameling en literatuurachtergrond over energiezuinig rijden een model gebouwd. In dit model worden differentiaalvergelijkingen opgelost die het gedrag van de trein beschrijven. De differentiaalvergelijkingen hebben betrekking op de rijtijd van de trein en de tijdsafhankelijke toestandvariabelen: positie van de

---

<sup>3</sup> "Infra Atlas is een informatiesysteem met technische gegevens van de railinfrastructuur in Nederland" (Van Driel & Luremans, 2010, p. 1).

trein (locatie) en de snelheid van de trein (T. Albrecht, 2008). Het optimaliseringscriterium zal het minimaliseren van de mechanische energie zijn die nodig is om een trein te laten rijden. De randvoorwaarden voor het model zijn als volgt:

- Totale rijtijdspeling tussen twee dienstregelpunten (vanuit de dienstregeling);
- Infrastructuur (zoals geometrie en baanvaknelheid);
- Materieelkarakteristieken;
- Aankomst- en vertrektijd op de knopen.

Op basis van de randvoorwaarden kan vervolgens de (minimale) rijtijd van het materieel tussen twee dienstregelpunten worden berekend. Met deze gegevens wordt een model opgebouwd in MATLAB. Met behulp van de gegeven dienstregeling wordt het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid bepaald tussen twee stations of dienstregelpunten. De resultaten van dit model dienen expliciet voor de input van de pilot, omdat het model vergelijkbaar is met de bestaande UZI-methodes en gebruik maakt van de bestaande dienstregeling.

De gegevens die nodig zijn om de parameterwaarden in het model te kalibreren/ijken dienen anders te zijn dan de gegevens die nodig zijn voor de validatie (Scheepmaker, 2010). Mogelijk kan hierbij gebruik gemaakt worden van bestaande gegevens van Lloyd's Register Rail Europe B.V. die zij gebruiken in opdracht van NS Reizigers. Hiermee wordt antwoord gegeven op de derde deelvraag.

#### Verificatie en validatie optimaliseringsmodel

Tijdens het verificatieproces wordt gekeken of de modelresultaten overeen komen met de verwachte resultaten. Tevens wordt het optimaliseringsmodel vergeleken met de bestaande UZI-methodes. Daarmee wordt duidelijk in hoeverre het optimaliseringsmodel een verbetering geeft ten opzichte van de bestaande methodes die NSR hanteert. Ook dit wordt gedaan voor het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen. Dit proces dient een antwoord te geven op de vijfde en zesde deelvraag.

Nadat het optimaliseringsmodel is gebouwd en de parameterwaardes zijn gekalibreerd, is het van belang om het model simulaties te laten uitvoeren. Vervolgens dienen de uitkomsten van het model vergeleken te worden met daadwerkelijke waarnemingen uit de praktijk (validatie). Een geschikte databron hiervoor is Trento/TROTS en het gebruik van de bestaande dienstregeling (rijtijden). Hiermee wordt er een antwoord gegeven op de vierde en zesde deelvraag.

#### Pilot

De resultaten van het model van de kalibratie, validatie en verificatie worden in de pilot van NS Reizigers gebruikt om te onderzoeken of het model ook in werkelijkheid goede resultaten oplevert (als experiment/case studie). Daarnaast kan het model en het literatuuronderzoek ook interessante input leveren voor het toetsen van de nieuwe UZI PRO-PLUS in de praktijk. De resultaten van de pilot worden geanalyseerd en daarmee kan de UZI PRO-PLUS methode vergeleken worden met de theoretisch energiezuinigste rijstrategie. Ook worden met behulp van de analyse de onderzoeksvragen van de pilot van NS Reizigers beantwoord. Daarnaast kan ook uit de data worden onderzocht of het geplande tijdspad in werkelijkheid ook haalbaar is. Anders is mogelijk een bloktijdberekening noodzakelijk om de haalbaarheid van de dienstregeling te toetsen. De pilot helpt daarmee ook deelvragen vijf en zes van dit onderzoek te beantwoorden.



## 1.5.2 Begrippen

De belangrijkste begrippen uit dit rapport worden in deze subparagraaf afgebakend. De definitie van de begrippen wordt in de rest van het rapport gehanteerd.

### *'Cruising' snelheid of kruissnelheid*

In dit onderzoek wordt er onder 'cruising' snelheid of kruissnelheid verstaan: de maximale snelheid die een trein rijdt, waarmee deze trein energieoptimaal rijdt.

### *Dienstregelpunt*

In dit onderzoek wordt onder een dienstregelpunt verstaan: een locatie waar een geplande treinactiviteit plaats vindt. "Voorbeelden van dienstregelpunten zijn stations, haltes en emplacementen – gebieden dus waar een trein aankomt, vertrekt of van richting kan veranderen" (Van Driel & Luremans, 2010, p. 6).

### *Energiezuinig of energieoptimaal rijden*

In dit onderzoek wordt onder energiezuinig of energieoptimaal rijden verstaan: het rijden van de trein met zo laag mogelijk energieverbruik in een gegeven tijdsperiode (vanuit de dienstregeling) over een gegeven afstand (tussen twee dienstregelpunten) uitgedrukt in kilowatt uur (kWh). Dit energieverbruik bestaat uit mechanische energie die nodig is voor de trekkracht om de rijweerstand te overbruggen (trekkrachtoverschot) en het verlies bij de overdracht en transformatie van de energie in de aandrijving en stroomvoeding keten (Goverde, Hansen, Van Nes, & Wiggenraad, 2008, pp. 88-89).

### *Knoop*

In dit onderzoek wordt onder knoop verstaan: een station waar een reiziger binnen een bepaalde tijdsperiode van elke intercity of stoptrein, op elke andere intercity of stoptrein kan overstappen (Huisman, 2011, p. 17). Kenmerkend voor een knoop is dat er treinen uit meer dan twee richtingen samen komen. Voorbeelden hiervan zijn de stations Eindhoven (Ehv), Utrecht Centraal (Ut) en Zwolle (Zl).

### *Optimaal*

In dit onderzoek wordt onder optimaal verstaan: het zodanig spreiden van de rijttijdspeeling dat energiezuinig rijden zoveel mogelijk rendement heeft, de dienstregeling vervolgens ook robuust is en de dienstregeling punctueel is in de uitvoering.

### Pilot

In dit onderzoek wordt onder pilot verstaan: de praktijkproef gehouden door NS Reizigers om de nieuwe methode van energiezuinig rijden (UZI PRO-PLUS en mogelijk gedeeltelijk het model) toe te passen in een kwart minuten dienstregeling en de effecten ervan te evalueren. De uitvoering van de pilot gebeurt voor de sprinterserie (SPR serie) 7400 op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen (zie Figuur 1-3) in beide richtingen gedurende de maanden augustus tot en met november 2012. De pilot begint op 10 april 2012 en eindigt medio januari 2013.



Figuur 1-3: overzicht baanvak voor de pilot: Utrecht Centraal – Rhenen (ProRail, 2010)

### Punctualiteit

In dit onderzoek wordt er onder punctualiteit verstaan: het percentage van treinen, dat aankomt met een vertraging van minder dan drie minuten op van tevoren gedefinieerde stations van het hoofdrailnet (Kroon, Huisman, & Maróti, 2008, p. 145). Deze definitie wordt in de praktijk op dit moment door NS gehanteerd.

### Rijregimes

In dit onderzoek wordt er onder rijregimes verstaan: de verschillende activiteiten die een trein kan doen, te weten: accelereren, constante snelheid behouden ('cruisen'), uitrollen en remmen.

### Rijtijdspeling

In dit onderzoek wordt er onder rijtijdspeling verstaan: extra rijtijd bovenop de minimale/kale rijtijd tussen twee dienstregelpunten om in iets slechtere omstandigheden dan berekend toch nog op tijd aan te komen of in goede omstandigheden mogelijke vertragingen in te lopen (herstellen van vertraging). Indien een trein punctueel rijdt, kan deze rijtijdspeling gebruikt worden voor energiezuinig rijden. Rijtijdspeling bestaat uit minimaal 5% van de minimale/kale rijtijd tussen twee dienstregelpunten en deze speling is afgerond naar boven bij grote stations en bij kleine stations omlaag naar gehele minuten (Goverde, 2011, p. 3).

### *Robuustheid*

In dit onderzoek wordt er onder robuustheid verstaan: de treindienstregeling kan omgaan met relatief kleine verstoringen (enkele minuten vertraging) in de werkelijke uitvoering en deze hebben alleen een beperkte invloed op de punctualiteit (paar procentpunt) (Kroon, Huisman, et al., 2008, p. 136 & 142).

### *Spooraansluiting*

In dit onderzoek wordt er onder spooraansluiting verstaan: splitsingspunten op de vrije baan (ProRail, 2010), dus waar een spoorlijn zich splitst in twee spoorlijnen (Hansen, Opstal, & Wiggenraad, 2011, p. 66). Een voorbeeld hiervan is 'De Haar' in Figuur 1-3.

### *Straktrekken*

In dit onderzoek wordt er onder straktrekken verstaan: een reeks van tijden in de treindienstregeling die naar beneden wordt afgerond, naar de onderliggende minuut. Tevens wordt de rijtijdspeeling zoveel mogelijk voor de knooppunten geplaatst waar de punctualiteit wordt gemeten. Het idee hierachter is dat de trein hierdoor op tijd op de stations komt waar de punctualiteit wordt gemeten. Dit betekent dat op de overige delen van het traject er (vrijwel) geen rijtijdspeeling beschikbaar is.

### *Uitrolmoment*

In dit onderzoek wordt er onder uitrolmoment verstaan: het punt (locatie en/of tijdstip) waar de machinist de tractie (aandrijving) van de trein uitschakelt en niet gaat remmen. De trein begint daar dus met het uitrollen over de infrastructuur (T. Albrecht, 2008, p. 86).

### *Vrije baan*

In dit onderzoek wordt er onder vrije baan verstaan: "de verbinding tussen dienstregelpunten, ofwel gebieden waar de trein alleen rijdt en waarin geen wissels liggen" (Van Driel & Luremans, 2010, p. 6).

## **1.6 Leeswijzer**

De scriptie is als volgt ingedeeld. In hoofdstuk 2 worden de theoretische en praktische achtergronden van dit onderzoek gepresenteerd. Hierin wordt uitgelegd wat energiezuinig rijden is en hoe rijtijdspeelingverdeling precies werkt. Vervolgens wordt met behulp van literatuuronderzoek getoond hoe de huidige methodes van EZR in Nederland en in het buitenland worden gedaan en hoe de rijtijdspeeling in Nederland wordt verdeeld. Hoofdstuk 3 bespreekt de benodigde data voor dit onderzoek en maakt daarbij onderscheid tussen data voor de van de modelbouw, data voor de analyse van de modelresultaten en inputdata voor het model. Daarna wordt in hoofdstuk 4 de methode voor het model behandeld, waarin stap voor stap wordt toegelicht hoe het model is opgebouwd en hoe het werkt. Tevens worden daar ook de pilot en de case studie in beschreven. Hoofdstuk 5 toont daarna de resultaten van het onderzoek. Dit zal zijn voor de kalibratie, verificatie, validatie, pilot en de case studie. De conclusies van het onderzoek volgen in hoofdstuk 6 en tot slot behandelt hoofdstuk 7 de aanbevelingen.

## 2 Theoretisch kader en praktische achtergronden

Voordat begonnen kan worden met de ontwikkeling van een model is het van belang om de achtergrond voor het model te kennen. Dit gebeurt aan de hand van een literatuurstudie gericht op de rijtijdsdelingverdeling en energiezuinig rijden. Allereerst wordt in paragraaf 2.1 het theoretische kader geschetst met betrekking tot de rijtijdsdelingverdeling en energiezuinig rijden. Vervolgens behandelt paragraaf 2.2 de bestaande energiezuinig rijden en energiebesparende methodes in Nederland en in het buitenland. Niet alleen bij de railsector wordt er onderzoek gedaan naar energiezuinig rijden, maar ook in andere transportsectoren. In paragraaf 2.3 wordt daarom gekeken hoe in deze andere sectoren aandacht aan energiebesparing wordt gegeven. Tot slot behandelt paragraaf 2.4 de huidige methode die wordt gebruikt in Nederland voor het bepalen van de rijtijdsdelingverdeling.

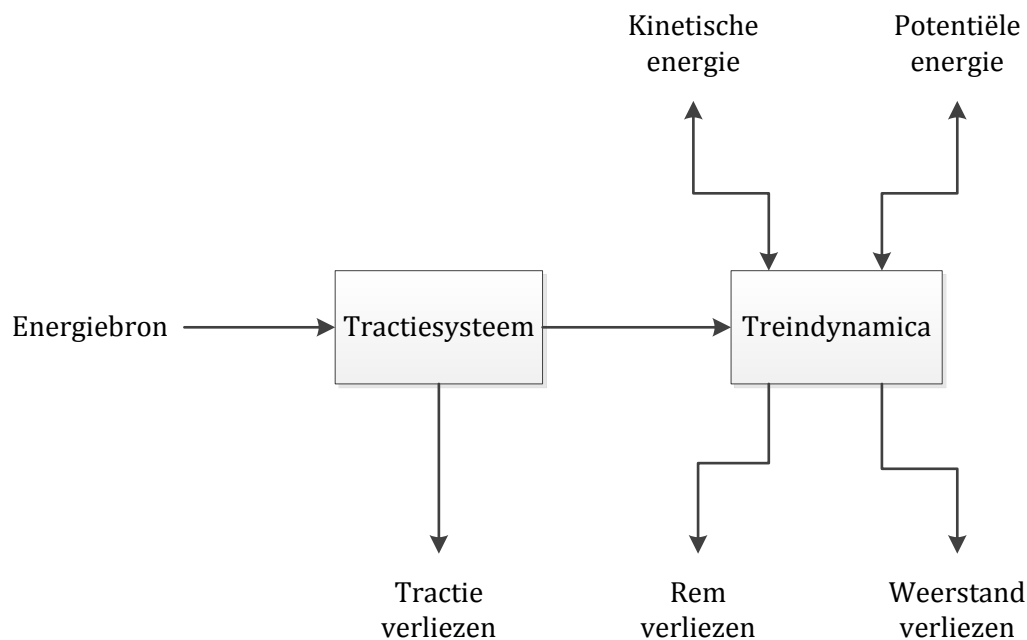
### 2.1 Theoretisch kader rijtijdsdelingverdeling en energiezuinig rijden

In deze paragraaf wordt het theoretische kader geschetst voor rijtijdsdelingverdeling en energiezuinig rijden. Dit dient als basis voor de modelontwikkeling in hoofdstuk 4. Hierna wordt eerst de theorie rondom rijtijdsdelingverdeling behandeld. Daarna volgt de theorie over energiezuinig rijden. De paragraaf wordt afgerond met een conclusie.

#### 2.1.1 Rijtijdsdelingverdeling

Elk jaar wordt er opnieuw een nieuwe landelijke treindienstregeling ontworpen. Dit gebeurt in samenwerking tussen ProRail en de verschillende vervoerders (goederen en reizigers), waarbij gezamenlijk de capaciteit van het spoor verdeeld wordt. De eerste stap binnen dit ontwerpproces is het bepalen van de basisuurpatronen (BUP) van de dienstregeling in de basisuur (BU) fase. Dit is de treindienstregeling in een standaard uur, waarbij het maatgevende uur voor de dagdelen ochtendspits (OS), dal (DAL) en avondspits (AS) (en later mogelijk superdal) wordt gekozen. In het dienstregelingontwerpproces wordt de capaciteit verdeeld door treinpaden in te leggen op de beschikbare infrastructuur in de beschikbare tijd. Deze treinpaden worden vervolgens gebruikt door treinseries (Scheepmaker, 2011).

In het ontwerp van de dienstregeling worden onder andere aankomst-, vertrek-, en doorkomsttijden voor treinseries bepaald op baanvakken. Deze tijden zijn mede afhankelijk van de rijtijden van treinen. Voor het bepalen van deze tijden zijn materieleigenschappen en infrastructuurkenmerken nodig. Het is namelijk van belang om te weten welk treintype er gaat rijden (bijvoorbeeld getrokken materieel versus treinstellen). Elk treintype heeft specifieke eigenschappen die van belang zijn voor het bepalen van de rijtijd. Deze eigenschappen zijn het type energiebron (elektrische of diesel tractie), het tractie-snelheidsdiagram (trekkracht), de maximale (toegestane materieel)snelheid, de maximale (service) remming en de weerstanden (Brünger & Dahlhaus, 2008; Goverde et al., 2008; Hansen et al., 2011). Vanuit de infrastructuur bepalen eigenschappen als baanvakbeveiliging, treinbeïnvloedingssysteem, seinstelsels, maximale toegestane baanvaknsnelheid, lokale snelheidsbeperkingen, sein- en wisselplaatsing, bogen en hellingen en locatie van stations en aansluitingen de minimale rijtijd die mogelijk is voor de route van een trein in het BUP. De relaties zijn schematisch weergegeven in Figuur 2-1.

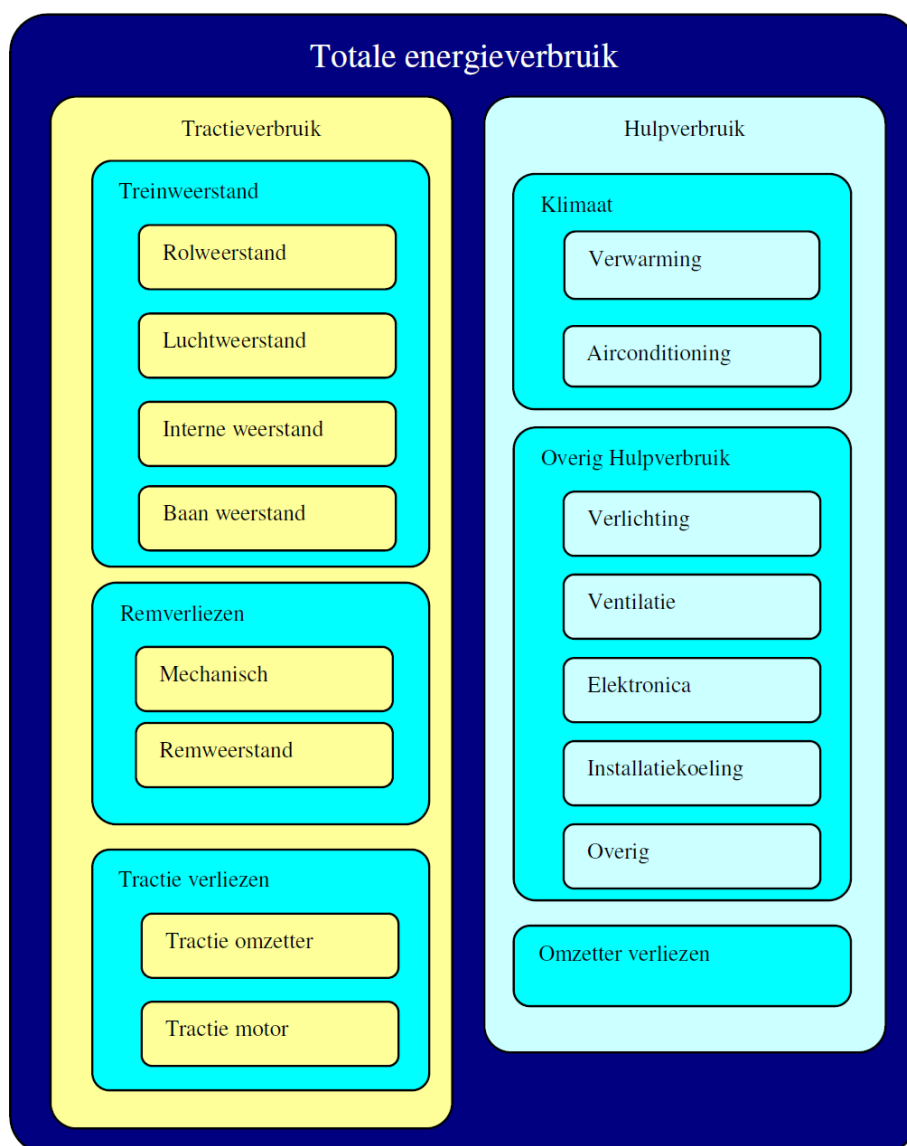


**Figuur 2-1: energiestromen voor een trein (Howlett, Milroy, & Pudney, 1994, p. 194; Howlett & Pudney, 1995, p. 2)**

Op basis van deze kenmerken wordt vervolgens de minimale/kale rijtijd bepaald tussen twee stations. Dit is de rijtijd die een specifiek type trein nodig heeft om in zo kort mogelijke tijd van het ene station te vertrekken en op het volgende station aan te komen. In werkelijkheid wordt deze rijtijd (vrijwel) niet gereden, omdat dit niet prettig is voor het comfort van reizigers (maximaal accelereren en remmen) en omdat hierdoor mogelijke vertragingen ontstaan, blijven bestaan of zelfs toenemen, als de omstandigheden minder gunstig zijn dan de theorie. Daarom wordt er extra rijtijd bovenop de minimale rijtijd tussen twee dienstregelpunten geplaatst om in iets slechtere omstandigheden dan berekend toch nog op tijd aan te komen of in goede omstandigheden mogelijke vertragingen in te lopen (herstellen van vertraging). Dit is de rijtijdspeling (Goverde, Kecman, & Sparing, 2011).

### 2.1.2 Energiezuinig rijden

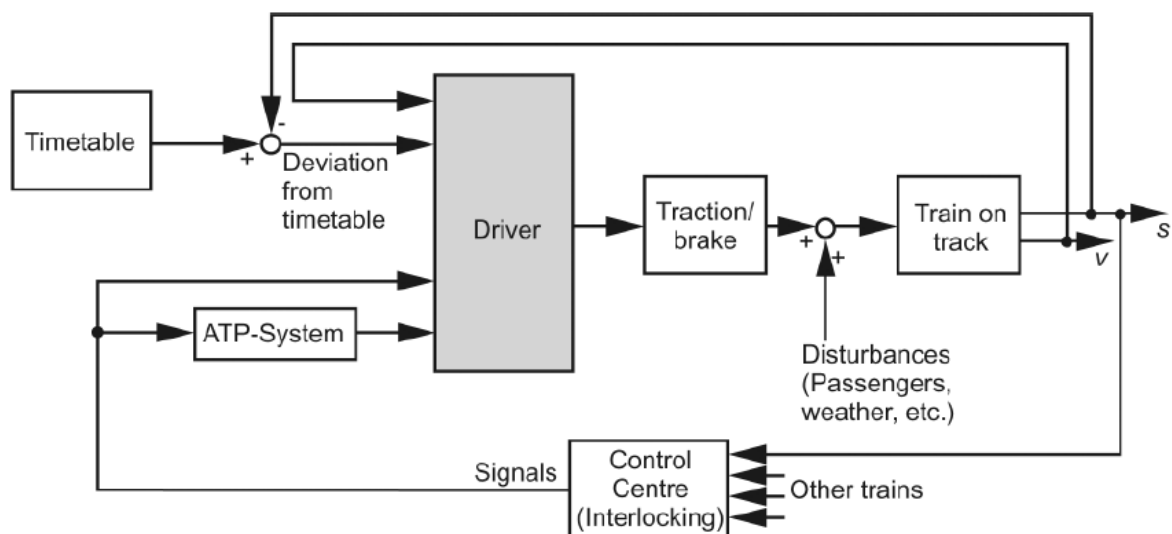
Energiezuinig rijden is tegenwoordig een belangrijk thema. Dit in het kader van de klimaatveranderingen door de uitstoot van broeikasgassen en de vermindering van de beschikbare fossiele brandstoffen. Spoorvervoerders doen tegenwoordig veel onderzoek om hun energieverbruik te verminderen, om daarmee bij te dragen aan een beter milieu en kosten te besparen. Ook binnen NS Reizigers vindt op dit moment veel onderzoek plaats naar het besparen van energie. Een van die gebieden is het verminderen van het energieverbruik door machinisten tijdens het rijden van de trein, waarmee getracht wordt om hun rijgedrag te beïnvloeden. Nader gespecificeerd betekent dit het verminderen van het tractieverbruik (aandrijfmechanisme van de trein) van de energie. In dit onderzoek wordt namelijk niet zozeer gekeken naar het hulpverbruik, omdat dit onderzoek zich met name richt op de rijstijl van machinisten. Bovendien is het verbruik van de tractie-energie veel groter dan die van het hulpverbruik. Schematisch is dit onderscheid tussen tractie- en hulpverbruik in energieverbruik te zien in Figuur 2-2.



Figuur 2-2: opdeling energieverbruikers (reizigers)trein (Van Himbergen, Slats, Van der Velde, & Van Slooten, 2012, p. 4)

Naast het feit dat energiezuinig rijden bijdraagt aan een schoner milieu door de vermindering van CO<sub>2</sub> uitstoot, levert dit voor de vervoerders op het spoor ook financiële besparingen op, aangezien er minder energie verbruikt is voor het rijden van treinen. Tevens slijt het materieel minder snel en is de geluidhinder minder, doordat de trein veelal gebruik maakt van een lagere maximumsnelheid en een uitrolfase. Daardoor slijt ook de infrastructuur minder snel, want hoe hoger de snelheid is, hoe meer de belasting op de spoorinfrastructuur (bijvoorbeeld wissels) en de trein (bijvoorbeeld wielflensen). Dit levert dus ook voor de infrastructuurbeheerder financiële baten op. Tot slot verhoogt energiezuinig rijden ook het comfort voor de reizigers en heeft het een positief effect op de arbeidsvoorwaarden van conducteurs, aangezien de trein niet constant met maximale snelheid door bijvoorbeeld een afbuigend wissel rijdt waardoor de kans op blessures verminderd. Hierdoor worden schokkende en slingerende bewegingen van de trein voorkomen.

Energiezuinig rijden is echter niet het primaire doel voor de machinist. Het allerbelangrijkste doel voor hem of haar is het controleren van de veiligheid op het spoor. Het tweede belangrijke doel is de punctualiteit van de dienstregeling, wat betekent dat indien een trein vertraging heeft, de machinist probeert deze vertraging zoveel mogelijk in te lopen. Dit gebeurt met behulp van de beschikbare rijtijdspeling, zoals is uitgelegd in paragraaf 2.1.1. Bij vertraging rijdt een trein zoveel mogelijk tijdoptimaal om de vertraging te verminderen (T. Albrecht, 2008). Energiezuinig rijden volgt pas op plek drie en wordt dus enkel toegepast door machinisten als de andere twee doelen gehaald worden. Energiezuinig rijden is mogelijk als de vertraging kleiner is dan de beschikbare rijtijdspeling. De overige rijtijdspeling wordt dan gebruikt om met zo min mogelijk energie toch op tijd op het volgende station aan te komen. De rijstijl van de machinist is dus afhankelijk van verschillende controle mechanismes, die staat samengevat in Figuur 2-3.



Figuur 2-3: treinbesturing in de controlelus (T. Albrecht, 2008, p. 84)



Het uiteindelijke doel bij energiezuinig rijden is om de mechanische/tractie energie die nodig is voor een trein om te bewegen van het ene punt naar het andere punt te minimaliseren binnen een gegeven tijdsperiode. Dit kan wiskundig als volgt worden omschreven (T. Albrecht, 2008, p. 83; Goverde, 2011, p. 3):

$$\begin{aligned} \text{Minimaliseer } E_{mech} &= \int_0^T P_{mech}(t) dt = \int_0^T F_{Tr}(t) \cdot v(t) dt = \int_0^T F_{Tr}(t) \cdot \frac{ds}{dt} dt, \\ &= \int_0^S F_{Tr}(s) ds. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Waarin:

$E_{mech}$ : mechanische/tractie energie die nodig is om de trein te laten bewegen [ $W \cdot s = J$ ]

$T$ : de tijd dat de trein op het eindpunt dient te zijn (kale rijtijd plus rijtijdspeeling) [ $s$ ]

$P_{mech}$ : (geïnstalleerd) mechanisch/tractie vermogen dat nodig is om de trein te laten bewegen [ $W$ ]

$F_{Tr}$ : trekkracht vanuit de aandrijving van de trein [ $N$ ]

$t$ : tijd [ $s$ ]

$v(t) = \frac{ds}{dt}$ : snelheid van de trein [ $m/s$ ]

$s$ : afgelegde afstand [ $m$ ]

$S$ : totale afstand tot aan een bepaald eindpunt [ $m$ ].

Formule (2.1) toont aan dat voor elke versnelling door positieve trekkracht  $F_{Tr}$  energie nodig is. Voordat er echter energie is, moet deze vanuit het tractievermogen van de locomotief of van de aangedreven assen van treinstellen bepaald worden. Deze tractie wordt namelijk vertaald naar de versnelling van de trein. De versnelling van de trein wordt vervolgens tegengewerkt door verschillende weerstanden. Hierna wordt het proces van tractie tot aan versnelling besproken.

De maximale trekkracht wordt beperkt door een drietal zaken, die ook visueel te zien zijn in de trekkracht-snelheidsgrafiek in Figuur 2-4 (Brünger & Dahlhaus, 2008, p. 61):

1. De interne vermogensoverdracht van de locomotief of van de aangedreven assen verbruiken 2% tot 3% van de aangeleverde trekkracht (niet te zien in Figuur 2-4).
2. De trekkracht is beperkt door een maximale hoeveelheid om te voorkomen dat de aandrijving van de trein oververhit raakt.
3. De trekkracht kan niet groter zijn dan de adhesie/afzetkracht  $F_{ad}$  anders gaan de wielen slippen. Deze wordt bepaald door de wet van Coulomb (Hansen et al., 2011, p. 18):

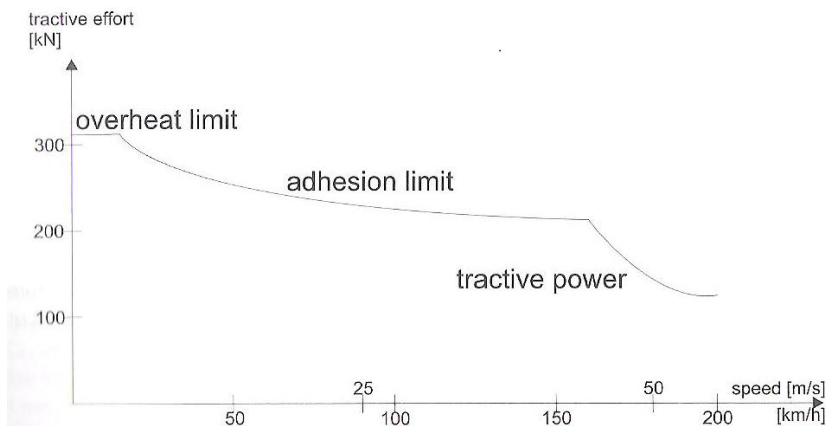
$$F_{ad} \leq \mu \cdot G_{tra}. \quad (2.2)$$

Waarin:

$F_{ad}$ : adhesiekracht [ $N$ ]

$\mu$ : wrijvingscoëfficiënt [ $-$ ]

$G_{tra}$ : treingewicht op de aangedreven assen [ $N$ ].



Figuur 2-4: trekkracht op de wielband afhankelijk van de snelheid (Brünger & Dahlhaus, 2008, p. 62)

Uit formule (2.2) blijkt dus dat hoe groter het gewicht op de aangedreven assen is, hoe groter de trekkracht van de trein kan zijn. Dit is een belangrijke reden waarom spoorwegmaatschappijen tegenwoordig massaal overgaan van locomotief getrokken treinen naar treinstellen met aangedreven assen.

De trekkracht kan in het gebied buiten de oververhittinglimiet en de adhesielimiet als volgt worden bepaald (Hansen et al., 2011, p. 20):

$$F_{Tr} = \eta \cdot \frac{P}{v}. \quad (2.3)$$

Waarin:

$\eta$ : rendement van de aandrijving [–]

$P$ : vermogen van de trein [W].

De trekkracht die nu beschikbaar is kan worden gebruikt om de trein te versnellen en zal gebruikt moeten worden om trein- en baanweerstand te overwinnen. De treinweerstand bestaat uit de transmissie-, lager-, loop- en luchtweerstand en wordt veelal weergegeven in de vorm van de specifieke weerstand, ook wel de weerstand per massa-eenheid. De luchtweerstand is vooral bepalend bij hogere snelheden, vanwege de kwadratische verhouding tussen de snelheid van de trein en deze weerstand. De baanweerstand bestaat vervolgens uit de helling-, boog- en tunnelweerstand (Hansen et al., 2011, p. 21). De totale bewegingsweerstand  $R(s, v)$  is dus:

$$R(s, v) = W_{trein}(v) + W_{baan}(s). \quad (2.4)$$

Waarin:

$W_{trein}(v)$ : de totale treinweerstand [N]

$W_{baan}(s)$ : de totale baanweerstand [N].

De treinweerstand ( $W_{trein}$ ) bestaat vervolgens uit de volgende onderdelen (Van Gigch & Kouijzer, 1996, p. 10):

$$W_{trein}(v) = (A + N \cdot B) \cdot (v + \Delta V)^2 + m_{trein} \cdot (C + D \cdot v) + N \cdot E \cdot (v + \Delta V). \quad (2.5)$$

Waarin (NSR/Lloyd's, 2012):

$A$ : kop/staart aerodynamische/lucht weerstandscoëfficiënt  $\left[\frac{N}{(m/s)^2}\right]$

$B$ : lengteafhankelijke luchtweerstandscoëfficiënt  $\left[\frac{N}{(m/s)^2}\right]$

$C$ : loopweerstandscoëfficiënt  $[N/kg]$

$D$ : snelheidsafhankelijke loopweerstandscoëfficiënt  $\left[\frac{N}{kg \cdot m/s}\right]$

$E$ : interne luchtweerstandscoëfficiënt  $\left[\frac{N}{m/s}\right]$

$\Delta V$ : windsnelheid (gemiddeld 10 km/h in Nederland)  $[m/s]$

$N$ : aantal treinstellen  $[-]$ .

De treinweerstandsformule (2.5) wordt hieronder kort weergegeven:

$$W_{trein}(v) = w_1 + w_2 \cdot v + w_3 \cdot v^2. \quad (2.6)$$

Waarin:

$$w_1 = A \cdot (\Delta V)^2 + N \cdot B \cdot (\Delta V)^2 + m_{trein} \cdot C + N \cdot E \cdot \Delta V, \quad (2.7)$$

$$w_2 = 2 \cdot A \cdot \Delta V + 2 \cdot N \cdot B \cdot \Delta V + m_{trein} \cdot D + N \cdot E, \quad (2.8)$$

$$w_3 = A + N \cdot B. \quad (2.9)$$

De baanweerstand ( $W_{baan}$ ) wordt met behulp van de volgende formule berekend (Hansen et al., 2011, p. 22):

$$W_{baan}(s) = (w_h + w_r) \cdot T_f \cdot G_{tr}. \quad (2.10)$$

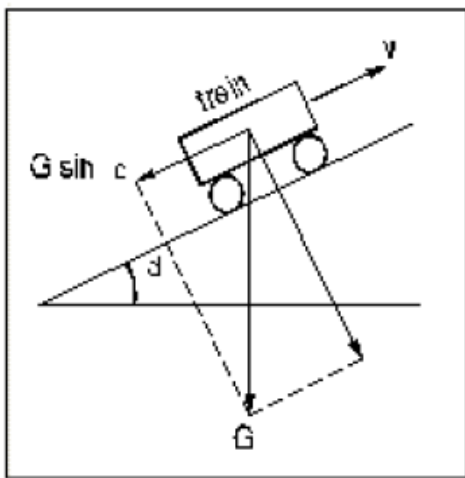
Waarin:

$w_h = \delta$ : specifieke hellingsweerstand/hellingshoek, zie ook Figuur 2-5 [‰]

$w_r = \frac{650}{R-55}$ : specifieke boogweerstand waarbij de boogstraal  $R$  [m] groter dan 400 m dient te zijn [‰]

$T_f$ : tunnelfactor  $[-]$

$G_{tr}$ : gewicht van de gehele trein [N].



Figuur 2-5: "hellingweerstand voor een trein" (Hansen et al., 2011, p. 22)

De treinweerstand uit formule (2.6) leidt samen met de baanweerstand uit formule (2.10) tot de bewegingsweerstand:

$$\begin{aligned} R(s, v) &= W_{trein}(v) + W_{baan}(s), \\ &= r_1 + w_2 \cdot v + w_3 \cdot v^2. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Met:

$$r_1 = w_1 + (w_h + w_r) \cdot T_f \cdot G_{tr}. \quad (2.12)$$

Met behulp van de trekkracht en de gegeven wrijvingsweerstand kan nu het trekkrachtoverschot worden bepaald. Dit is de kracht die uiteindelijk beschikbaar is om de trein te versnellen of de constante snelheid te houden (Hansen et al., 2011, p. 22):

$$F_0(s, v) = m \cdot a(s, v) = F_{Tr}(v) - R(s, v). \quad (2.13)$$

Waarin:

$F_0(s, v)$ : trekkrachtoverschot afhankelijk van de locatie en de snelheid [N]

$m$ : massa van de trein [kg]

$a(s, v)$ : versnelling van de trein afhankelijk van de locatie en de snelheid [ $m/s^2$ ].

Tot slot kan een trein ook remmen. Aangenomen wordt dat de remkracht  $F_{rem}$  constant is waardoor de negatieve acceleratie (deceleratie) tevens constant is (Brünger & Dahlhaus, 2008; Howlett, 1996). Vanuit de optimale besturingstheorie is bekend dat bij het remmen de trein de maximale serviceremkracht gebruikt, omdat hoe langzamer een trein remt, hoe meer tijd er nodig is om af te remmen tot stilstand (T. Albrecht, 2008). Bij NS Reizigers wordt voor het materieel de maximale service remming toegepast voor de berekening van het energiemodel, oftewel remstand<sup>4</sup> 4 van de 7 (Freek & Hessels, 1999, p. bijlage P).

De oplossing voor het optimale energiezuinig rijgedrag van een machinist kan worden verkregen met behulp van de optimale besturingsstrategie (T. Albrecht, 2008; Howlett et al., 2009; Liu & Golovitcher, 2003; Su et al., 2012). Hierbij vormen de tractie- en de remkracht de optimale besturingsparameters en de treinpositie en de snelheid de toestandsvariabelen. Het uiteindelijke kwaliteitscriterium waarop beoordeeld gaat worden is dan het energieverbruik. Deze bestaat uit de gewogen som van het energieverbruik en de rittijd. Deze theorie wordt uitvoerig behandeld in hoofdstuk 4 als het model wordt opgebouwd.

Het resultaat van de toepassing van de optimale besturingsstrategie leidt tot vier optimale rijregimes (T. Albrecht, 2008, p. 86):

1. Acceleratie;
2. 'Cruising' oftewel constante snelheid (kruissnelheid);
3. Uitrollen (geen tractiegebruik, enkel trein- en baanweerstand);
4. Remmen.

---

<sup>4</sup> Deze remstanden gelden voor NS Reizigers materieel DD-AR (*dubbeldeksaggloriematerieel*) + mDDM (*motorrijtuig Dubbeldeksmaterieel*), NID/DDZ (*Nieuwe Intercity Dubbeldekker/Dubbeldekker Zone*), SGMm (*gemoderniseerd Stadsgewestelijk Materieel*), SLT (*Sprinter Lighttrain*) en VIRM (*verlengd interregiomaterieel*) (NSR/Lloyd's, 2012).

### 2.1.3 Conclusie

In het ontwerp van de treindienstregeling worden verschillende tijden voor treinseries op baanvakken bepaald. Deze tijden zijn afhankelijk van materieel- en infrastructuureigenschappen. Op basis daarvan wordt namelijk de minimale of kale rijtijd bepaald tussen twee stations. Aangezien de omstandigheden in de werkelijkheid mogelijk anders zijn dan de theorie wordt er extra rijtijd bovenop de minimale rijtijd tussen twee dienstregelpunten geplaatst. Dit is de rijtijdspeling.

Als het veilig is op het spoor en een trein op tijd rijdt kan de rijtijdspeling door de machinist gebruikt worden om energiezuinig te rijden, waarbij het gaat om het verlagen van het tractieverbruik van de energie. Energiezuinig rijden is gewenst, omdat het verscheidene baten oplevert. Zo vermindert de CO<sub>2</sub> uitstoot en zijn er financiële besparingen voor de vervoerder door het verminderen van het energieverbruik. Daarnaast wordt het materieel en de infrastructuur minder belast, waardoor ook op de kosten voor onderhoud bespaard kan worden voor zowel de vervoerder als de infrastructuurbeheerder en neemt de geluidshinder af. Ten slotte verbetert energiezuinig rijden het rijcomfort voor de reizigers en conducteurs, doordat de trein niet constant op maximale snelheid door bijvoorbeeld een afbuigend wissel heen rijdt.

Het tractie-energieverbruik wordt bepaald door de hoeveelheid trekkracht die geleverd wordt door de trein. Deze trekkracht is vervolgens afhankelijk van verschillende factoren, zoals de overhittingslimiet, de adhesie limiet, de trein- en de baanweerstand. Het verschil tussen de geleverde trekkracht en de totale weerstand op de trein levert het trekkrachtoverschot en deze bepaalt uiteindelijk de versnelling van de trein. Daarnaast remt de trein met behulp van de remkracht. Vanuit de theorie blijkt de energieoptimale rijstrategie bepaald te kunnen worden met behulp van de optimale besturing. De uitkomst daarvan is dat er voor een trein vier optimale rijregimes zijn, te weten: acceleratie, 'cruising', uitrollen en remmen.

## 2.2 Bestaande energiezuinig rijden en energiebesparende methodes

In deze paragraaf worden de bestaande energiezuinig rijden methodes besproken voor zowel in Nederland als daar buiten. Tevens wordt er breder gekeken naar energiebesparende maatregelen die vervoerders in het buitenland ondernemen om het energieverbruik van de treinen te verlagen.

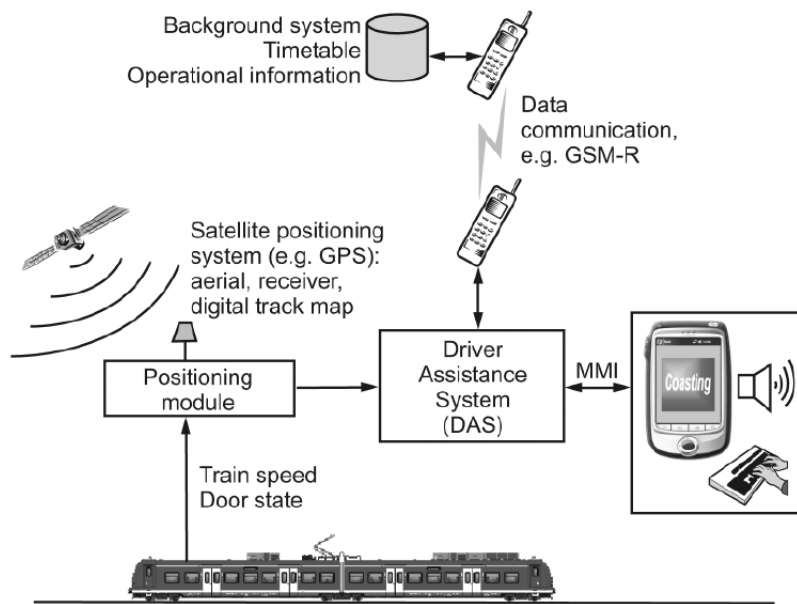
### 2.2.1 Nederland

In Nederland is energiezuinig rijden al een bekende term sinds de stoomtreinen met de kolenpremie (Tolsma, 2007). Daarom wordt eerst een overzicht van EZR in de geschiedenis gegeven. Op dit moment maakt NS Reizigers gebruik van de UZI-methode om machinisten te stimuleren om energiezuinig te rijden. Dit is het tweede onderwerp dat aan bod komt in deze subparagraaf. Daarna wordt de tool RouteLint besproken. Dit is een DIS<sup>5</sup> ('Driver Information System') dat machinisten kan ondersteunen in het anticiperend rijden door machinisten in de treincabine informatie te geven over de treinen in de omgeving van de trein zelf. Tot slot wordt de tool BEA ('Basic Energy Analysis') behandeld, waarmee het mogelijk is om machinisten in de treincabine advies te geven over het energieoptimale snelheidsprofiel. BEA is een machinisten adviseringssysteem DAS<sup>6</sup> ('Driver Assistance/Advisory System'). De structuur en componenten van een DAS zijn weergegeven in Figuur 2-6.

---

<sup>5</sup> 'Driver Information System' of DIS geeft de machinist enkel informatie met behulp van ruwe verwerkte data (T. Albrecht, 2008). DIS genereert beschrijvende informatie van ruwe verwerkte data, bijvoorbeeld actuele vertraging, huidige energieverbruik, afstand tot volgende trein, etc. (Goverde, 2011)

<sup>6</sup> 'Driver Assistance/Advisory System' of DAS maakt gebruik van de verwerkte data om de actuele besturingsvariabelen te bepalen die de machinist dient toe te passen. Het systeem geeft dus op basis van actuele informatie advies over welke activiteiten de machinist dient uit te voeren (T. Albrecht, 2008). DAS geeft voorschrijvende informatie berekend uit de data, zoals het huidige optimale rijregime, de doel- of uitrolsnelheid (Goverde, 2011).



Figuur 2-6: basis structuur en componenten van een DAS (T. Albrecht, 2008, p. 101)

### EZR in het verleden

Energiezuinig rijden is geen nieuw onderwerp. Al ten tijde van de oude stoomtreinen kwam dit thema aan bod door machinisten een premie te geven als zij minder energie verbruikten voor een rit met de stoomtrein (de kolenpremie). Toen de elektrische treinen de stoomtreinen verdreven verdween ook de kolenpremie. In de jaren '70 ontstond opnieuw het idee om machinisten zuiniger te laten rijden, door hen indien ze op tijd reden, zo vroeg mogelijk de tractie te laten uitschakelen en uit te gaan rollen. Hiermee werd niet alleen energie bespaard, maar sleten ook de remmen minder (Velthuisen, De Vries, Van den Hout, & Flemmingh, 2012). Dit werd toentertijd gedaan met behulp van folders die aan machinisten werden verspreid, maar de meeste machinisten bleven hun eigen rijstijl behouden. Ook in de jaren '90 werd er opnieuw aandacht aan geschonken, ditmaal door het gebruik van de machinistendienstkaartjes waarop met een 'U' stond aangegeven bij welk referentiepunt (sein, wissel, kilometerbordje) de machinist (indien hij of zij op tijd reed) kon uitschakelen, zie ook Figuur 2-7 (T. Albrecht, 2008; Velthuisen et al., 2012). Opnieuw bleek de methode niet veel succes te hebben en verdween energiezuinig rijden uit beeld op het Nederlandse spoor.

*** MACHINISTENDIENSTEN ***			90	130
STPL	DIENST		ZVT V .26 E	ASA V .10 C
AANVANG	EINDE	DST-LENGTE	OVN A .32	S645 - .18 U
			=====	BKL - .22 C
PERIODE:		WAL:-----	50	S509 - .24 U
UIT TE VOEREN DIENST		ING:-----	OVN V .32 E	UT A .31
			HLM A .37	=====
TREINERIE:			=====	130
			130	UT V .34 C
			HLM V .42 E	S204 - .52 U
			ASS A .52	HT A .03
			=====	=====
999 000 000			80	110
9 9 0 0 0 0			ASS V .53 E	HT V .05 C
9 9 0 0 0 0			ASD A .59	S320 - .09 U
9999 0 0 0 0			=====	BTL - .14
9 0 0 0 0 0			60	130
9 0 0 0 0 0			ASD V .02 E	BTL - .14 C
999 000 000			ASDMA- .05	S569 - .18 U
VEREENVOUDIGDE TIJDТАFEL			70	EHV A .27
VOOR ENERGIE-ZUINIGE			ASDMA- .05	=====
PATRONEN VOLGENS DE			S609 - .06 U	130
UITLOOP-METHODE			ASA A .09	EHV V .29 C

Figuur 2-7: machinistendienstkaartje met uitloop-methode van NS in 1989 (T. Albrecht, 2008, p. 100)

### UZI-methode

De afgelopen jaren is energie echter opnieuw een hot item geworden, ook binnen de spoorsector. Zoals reeds in de aanleiding in paragraaf 1.1 is besproken, besteedt NS op dit moment veel aandacht aan energiezuinig rijden (EZR). Zo worden machinisten geïnstrueerd om indien mogelijk gebruik te maken van de UZI-methode (Universeel Zuinig rijden Idee, bedacht door machinist Freddy Velthuizen) om energiezuinig te rijden. Het gaat er bij deze methode om dat een trein zo vlot mogelijk optrekt tot de gewenste snelheid en vervolgens op het juiste moment de tractie uitschakelt en uitrolt tot het station (NS, 2012a). De methode ondersteunt de machinist om zuinig en punctueel te rijden binnen de gegeven rijtijspelng van de dienstregeling (minimaal 5%) (Franke, 2012; Velthuizen & Ruijsendaal, 2011). De UZI-methode bestaat op dit moment uit drie versies, waarvan de derde nog in ontwikkeling is en in de pilot getest gaat worden:

1. UZI BASIS deze versie maakt onderscheid tussen een kort traject (rijtijspelng 2 t/m 8 minuten) waarbij de rijtijspelng bepalend is en een lang traject (rijtijspelng meer dan 8 minuten) waarbij de baanvaksnelheid bepalend is voor het moment van uitschakelen van de tractie (Franke, 2012; Velthuizen & Ruijsendaal, 2011). Deze methode is te zien in Figuur 2-8.
2. UZI PRO bestaat uit de UZI BASIS methode waarbij rekening wordt gehouden met snelheidsbeperkingen op het baanvak.
3. UZI PRO-PLUS: omvat UZI PRO waarbij zoveel mogelijk het ideale tijdsnelheid wordt gereden door de machinisten. Daarvoor is wegbekendheid van de machinist zeer van belang, maar ook de aangereikte dienstregeling voor de machinist ondersteunt hem of haar hiermee. De methode kenmerkt zich door het feit dat de machinisten geen dienstregeling ontvangen die afgerond is naar hele minuten, maar naar de tijdsnelheden waarop ze kunnen vertrouwen die nauwkeuriger zijn (kleinere tijdsseenheden). Daarbij dient het dienstregelpunt exact te worden weergegeven (kilometerbord gemonteerd op de bovenleidingportalen (Hoefakker et al., 2010)) met de tijd uitgedrukt in de gekozen tijdsnelheidsseenheden. In het geval van de pilot wordt de dienstregeling voor de machinist op kwart minuten (15 seconden) gegeven (Luijt, 2012b). De gegevens voor de dienstregeling komen uit het dienstregelingontwerpprogramma Donna<sup>7</sup> en worden in 1/10 minuten gegenereerd. In een Excel sheet worden deze plantijden vertaald naar kwart minuten. Door nauwkeurigere referentietijden aan te bieden aan de machinist kan er optimaal punctueel en energiezuinig gereden worden.

---

<sup>7</sup> Donna wordt gebruikt bij de planning en de verdeling van de spoorinfrastructuurcapaciteit en wordt gebruikt door zowel de infrastructuur beheerders (ProRail en KeyRail) als alle vervoerders (reizigers en goederen) (Scheepmaker, 2011).



## UZI kaartje Mcn



De UZI-methode (UZI = Universeel Zuinig rijden idee) helpt een machinist zuinig en punctueel te rijden binnen de speling van de dienstregeling. Rijtijd (bij een kort traject), of baanvak-snelheid (bij een lang traject) bepalen het juiste moment van uitschakelen. Kleine vertragingen onderweg worden ingelopen door wat later uit te schakelen of door de grotere rijtijdspeeling aan het einde van de rit.

Meer uitleg over de UZI-methode, mail: [freddy.velthuizen@ns.nl](mailto:freddy.velthuizen@ns.nl)  
[sjaak.ruijsendaal@ns.nl](mailto:sjaak.ruijsendaal@ns.nl)

**Kort traject (rijtijd 2 t/m 8 minuten)**  
 Probeer altijd zo snel mogelijk de aangegeven snelheid te rijden. Dus kort optrekken en lang uitrollen.

Rijtijd in minuten	Uitschakelen bij
2	80 km/h
3	90 km/h
4	100 km/h
5	110 km/h
6	120 km/h
7	130 km/h (SGM n.v.t.)
8	140 km/h (SGM n.v.t.)

Stoptrein 5744 van Hollandse Rading naar Hilversum Sportpark. Vertrek Hollandse Rading 13.20 uur, aankomst Hilversum Sportpark 13.25 uur. Rijtijd van 5 minuten. Vlot optrekken en bij 110 km/h tractie uitschakelen.

**Lang traject (rijtijd meer dan 8 minuten)**  
 Probeer altijd zo snel op te schakelen naar de baanvak-snelheid! Indien mogelijk, na bereiken van de baanvak-snelheid, het aangegeven aantal minuten voor aankomst uitschakelen.

Baanvak-snelheid	Uitschakelen (mits baanvak-snelheid is bereikt)
140 km/h	8 min. voor aankomst (SGM n.v.t.)
130 km/h	7 min. voor aankomst (SGM n.v.t.)
120 km/h	6 min. voor aankomst
110 km/h	5 min. voor aankomst
100 km/h	4 min. voor aankomst

ICE 2134 van Leiden naar Schiphol, vertrektijd Leiden 12.30 uur. De aankomst is 12.45 uur. Rijtijd is 15 min. De baanvak-snelheid is 140 km/h. Dat betekent dus dat je 8 minuten kunt aftrekken van de aankomsttijd. Uitschakelen om 12.37 uur.

**Figuur 2-8: UZI (BASIS) kaartje voor machinisten (Franke, 2012, pp. 4-5)**

Het grote voordeel van de UZI-methode is dat het een relatief eenvoudige methode is. Een machinist kan namelijk gedurende een haltering uitrekenen waar hij of zij voor het volgende station de tractie dient uit te zetten. Ook is de methode met de gegeven basisopleiding tot machinist direct toepasbaar (laagdrempelig). Daarnaast is de methode bedacht door een machinist van NS Reizigers (Freddy Velthuizen). Het grote voordeel hiervan is dat de acceptatie van de UZI-methode onder machinisten zeer hoog is. Het is namelijk vaak vrij lastig om de acceptatie van machinisten te winnen voor nieuwe ideeën vanuit het hoofdkantoor. In principe kennen alle machinisten van NS Reizigers deze methode. Tevens wordt de kennis van de machinisten hierop sinds 2011 getest gedurende de landelijke herinstructiedagen voor machinisten (LHM) op de simulator in Amersfoort. De meeste machinisten blijken tevens in de praktijk achter de methode te staan en de methode ook toe te passen. Het gevolg van deze trainingen was dat het energieverbruik landelijk daalde met 2% in 2011 ten opzichte van 2010 (Luijt, 2012a).

Hoewel de UZI-methode volgens NS Reizigers op dit moment helpt om het energieverbruik met circa 5% per jaar te verminderen, is de methode vrij generiek en statisch. Dit houdt in dat de methode zeer algemeen is en geen rekening houdt met de invloed actuele omstandigheden. Daarbij wordt er veel gevraagd van de ervaring en wegbekendheid van de machinist zelf. Zo geeft de UZI-methode slechts enkele handvatten over het moment van uitrollen (enkel in tijd en snelheid gegeven).

Daarbij wordt er ten eerste geen onderscheid gemaakt tussen type materieel. Uit gesprekken met machinisten is gebleken dat dit van grote invloed is. Zo zijn de VIRM's veel beter in het uitrollen dan SGMm's, wat te maken heeft met de massa op de aslasten, de lengte van de trein en met de aerodynamische eigenschappen van de trein. De VIRM is erg goed gestroomlijnd, terwijl bij SGMm allerlei apparatuur onder en boven de trein is, die niet goed afgeschermd is om daarmee een gestroomlijnde vormgeving te genereren.

Ten tweede houdt de UZI-methode geen rekening met de actuele omstandigheden. Zo worden er met de UZI-methode geen uitspraken gedaan over de weersinvloeden. Uit observaties bij machinisten en gesprekken met hen bleek duidelijk dat de prestaties sterk verschillen bij mooi

weer of bij neerslag. Vooral getrokken materieel (ICRm (*gemoderniseerd Intercityrijtuig*) met E-lok (*elektrische locomotief*) uit de 1700 serie) heeft de grootste moeite bij het accelereren van stilstand naar maximale baanvaknelheid, indien het net begint te regenen (veel wielslip met daardoor pieken in energieverbruik en dus langzaam optrekken). Daarnaast is de remweg bij neerslag langer en dienen machinisten veel eerder hun remweg in te zetten in plaats van uitrollen. Vooral bij stop-door schakelingen en bij overwegen achter een station heeft dit grote gevolgen voor EZR en is het hanteren van de UZI-methode niet mogelijk. Ook heeft de wind een grote invloed op EZR, met name een sterke zijwind kan funest zijn om de UZI-methode toe te passen, doordat de wielflensen van de trein daardoor hard tegen de railkop worden geduwd en daarmee de rolweerstand van de trein aanzienlijk toeneemt. Hierdoor wordt uitrollen lastiger en kost het versnellen en aanhouden van een constante snelheid meer energie. Tot slot heeft de geometrie grote gevolgen voor het toepassen van de UZI-methode. Bij bijvoorbeeld een opgaande helling (bij bruggen, dijken of heuvels) of een (scherpe) bocht is het toepassen van de uitrolfase niet exact hetzelfde als de UZI-methode voorschrijft, omdat hiermee mogelijk teveel tijdsverlies optreedt. Hier is de machinist aangewezen op zijn eigen ervaringskennis en wegbekendheid. Inmiddels is in de UZI-methode meegegeven dat machinisten bij stijgende hellingen de snelheid aan het begin van de helling dienen te handhaven.

De toepassing van de UZI-methode voor energiezuinig rijden wordt ook sterk bepaald door het vertrekproces van de hoofdconducteur (hc). De hc dient het vertrekproces op tijd in te zetten en de vertrekprocedure zo vlot mogelijk te doorlopen. Uit observaties en gesprekken met machinisten blijkt dat hierdoor al snel een paar minuten rijtijd verloren kunnen gaan, die daardoor tijdens de rit ingehaald moeten worden. Zeker in de spitsperiode op stations met veel in- en uitstappers leidt dit tot extra lange halteertijden (langer dan gepland), waarbij veelal reizigers ook nog de trein in- en uitstappen bij een beperkt aantal deuren, in plaats van de deuren over de gehele lengte van de trein te gebruiken. Hierdoor is vervolgens het toepassen van de UZI-methode niet meer mogelijk.

Ook verkeersleiding (VKL) speelt een belangrijke rol in het mogelijk maken van EZR en het toepassen van de UZI-methode. Zo bepaalt VKL bijvoorbeeld de treinvolgorde en de communicatie met de machinisten. Uit verschillende observaties bij machinisten en uit gesprekken met hen blijkt dat daar nog het nodige aan te verbeteren valt. Zo worden er regelmatig conflicterende treinbewegingen toegelaten door VKL. Het komt regelmatig voor dat plotseling een stilstaande goederentrein voor een rijdende intercity wordt geplaatst, waardoor deze intercitytrein langzamer moet gaan rijden of zelfs moet gaan stoppen. Dit kost veel rijtijd en gaat ten koste van het energiezuinig rijden, waardoor de UZI-methode niet meer kan worden toegepast. Ook bepaalt VKL uiteindelijk het seinbeeld voor een station. Uit gesprekken en observaties met machinisten blijkt dat het seinbeeld hoog groen (groen seinbeeld bij binnenkomst station) wenselijk is, omdat hierdoor de trein met het minimale remcriterium van de ATB (Automatische treinbeïnvloeding) beveiliging kan remmen. Dit leidt ertoe dat een trein langer een hoge snelheid kan vasthouden en op het laatste moment met een hoge remstand tot stilstand remt. Hier wordt rijtijd mee gewonnen en daardoor kan de UZI-methode beter toegepast worden. Tot slot bepaalt VKL ook de rijroute van een trein. Regelmatig stuurt VKL een intercitytrein door extra wissels voor het roestrijden van spoorstaven. Hierdoor treedt er aanzienlijk tijdsverlies op voor de desbetreffende trein, waarmee het toepassen van de UZI-methode niet meer haalbaar is en er niet energiezuinig wordt gereden.

Een tijdelijke snelheidsbeperking (TSB) heeft ook grote gevolgen voor het kunnen toepassen van de UZI-methode. TSB's worden opgelegd door ProRail als er storingen op een gedeelte van een baanvak optreden of als er werkzaamheden op het spoor zijn. Op dit moment wordt er nog niet gekeken welke gevolgen het plaatsen van een tijdelijke snelheidsbeperking heeft voor het energieverbruik van een trein. TSB's zorgen namelijk ook voor meer rijtijd door het afremmen, constant lagere snelheid rijden en accelereren, waardoor er minder of zelfs geen rijtijdspeling

meer over blijft om de UZI-methode te kunnen toepassen. Het is sterk aan te bevelen om in de toekomst ook te kijken naar de verschillende mogelijkheden van TSB's en hun mogelijke gevolgen voor energiezuinig rijden. Ten slotte is het ook zaak om TSB's tijdelijk te houden en duidelijk af te bakenen welke tijdsperiode tijdelijk is en welke niet. Op die manier is het mogelijk om ook in de planning rekening te houden met de snelheidsbeperking. Een voorbeeld van een lange TSB is bij Best, die al sinds 2007 van kracht is en pas sinds 2012 een vaste snelheidsbeperking (VSB) is geworden.

Een ander nadeel van de UZI-methode is dat machinisten zelf alles moeten uitrekenen en controleren. Hoewel de rekensommen over het algemeen niet moeilijk zijn (terugrekenen vanuit aankomststation tot uitrolmoment) kan het machinisten wel afleiden van de primaire taak: de veiligheid op het spoor. Een aantal machinisten gaf te kennen dat de afleiding bij het gebruik van de Railpocket, welke actuele informatie verschaft over de doorkomsttijden (in plaats van het papieren statische dienstkaartje), zeer groot is, waardoor ze minder oog hebben om op de baan te letten en daarmee seinen, snelheidsbeperkingen, etc. te laat zien en te laat erop reageren. Dit kan gevaarlijke situaties opleveren. Voor machinisten kan het eerder gewenst zijn om een adviseringsstelsel (DAS) te gebruiken, dat zelf uitrekent wat het optimale snelheidsprofiel is en vervolgens de machinist toont welke (advies)snelheid hij dient aan te houden. Daarmee worden machinisten minder afgeleid. Inmiddels is het niet meer noodzakelijk voor machinisten om de UZI-methode zelf te gaan uitrekenen. Voor een groot aantal treinseries (waar energiezuinig rijden mogelijk is) is per baanvak door de EZR ambassadeurs (machinisten) een aantal tabellen opgesteld waarin UZI-tips vermeld staan. Hiermee is het mogelijk om per baanvak/treinserie de UZI-methode toe te passen. Deze gegevens (UZI tips per baanvak (UTB)) zijn voor een groot aantal treinseries en baanvakken per treinserie beschikbaar in tabellen in het boekje voor machinisten om energiezuinig te rijden (Franke, 2012). Inmiddels zijn deze tabellen verder verbeterd en uitgebreid met nog meer treinseries en baanvakken en is de naam gewijzigd in UZI tips per treinserie (UTT). Een voorbeeld van een UTB/UTT is te vinden in bijlage 2.

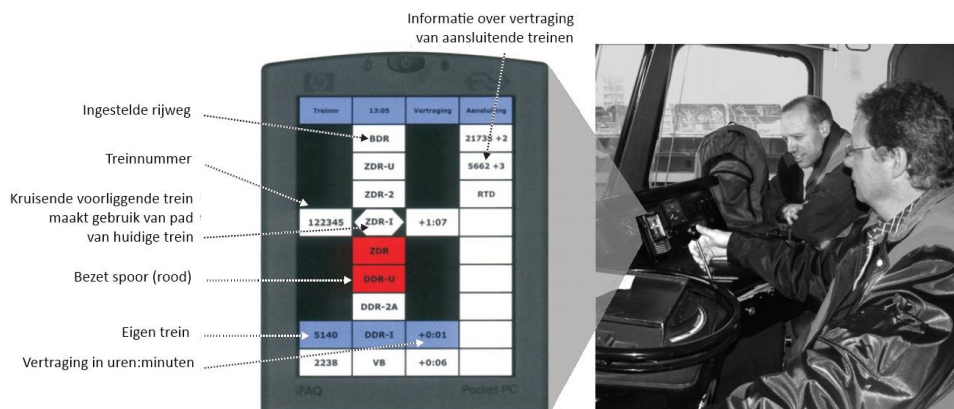
Om de veiligheid nog verder te vergroten kan de informatie worden getoond met behulp van zogenaamde 'head-up displays' (HUD). Een 'head-up display' genereert een virtueel beeld in de voorwaartse lijn van het zicht van een bestuurder van een voertuig (Thomas & Davies, 2009). De informatie wordt in het gezichtsveld van de bestuurder geprojecteerd, waardoor deze zijn of haar aandacht niet hoeft te verplaatsen van naar voren kijken naar het besturingspaneel. De grote baten van het systeem zijn dat het tijdsbesparingen (niet telkens kijken op het instrumentenpaneel) en het vergroten van het situationeel bewustzijn met zich mee brengt doordat de informatie in de richting van het zicht van de bestuurder wordt gepresenteerd. 'Head-up displays' is een techniek die haar oorsprong vindt in de militaire vliegtuigsector waarmee de belangrijkste informatie voor de piloot werd getoond op het voorraam van het vliegtuig, zodat de piloot zijn of haar focus niet hoefde te verleggen op het instrumentenpaneel. Inmiddels wordt deze techniek toegepast in de burgerluchtvaart en bij autovoertuigen. De techniek is echter ook toepasbaar voor treinen. Thomas en Davies (2008) hebben hiernaar onderzoek verricht. Ten eerste blijkt uit dit onderzoek dat er potentie bestaat voor het gebruik van HUD's met betrekking tot de bijdrage aan de veiligheid. Dit blijkt uit het feit van het gebruik van HUD's bij andere transportsectoren en de baten die daarbij ontstaan. Daarnaast bleek uit een pilot in het onderzoek waarin machinisten in een treinsimulator met een 'head-up display' moesten rijden, dat de werkbelasting voor de machinisten verlaagd wordt. Hierdoor kan de punctualiteit verbeterd worden. Ook blijken er netto financiële baten te zijn voor spoorwegmaatschappijen. Ten slotte is ook uit een pilot met machinisten gebleken dat deze allemaal positief stonden tegenover het gebruik van de 'head-up displays' in de treinsimulator. Mogelijk kan de belangrijkste informatie voor machinisten inclusief het advies voor uitschakelen van de tractie worden getoond op HUD's in de machinistencabine. Desondanks zijn HUD's tot op heden nog niet in de praktijk toegepast bij railvoertuigen. Een voorbeeld van een HUD in een trein is te vinden in bijlage 3.

De UZI-methode is ook sterk afhankelijk van de omgevingsfactoren als treinen voor en achter de trein. Als hier meer informatie over beschikbaar zou zijn, kan de UZI-methode beter worden toegepast door anticiperend rijden. Er wordt dus een informatiesysteem gemist (DIS). Machinisten gaven aan dat het idee van RouteLint (dat hierna wordt behandeld) bij deze wensen aansloot, hoewel de interface mogelijk beter had kunnen zijn, omdat het tijdsfad van de omliggende treinen en de afstand niet expliciet werden weergegeven.

### RouteLint

RouteLint is ontstaan uit het programma van ProRail 'Het Spoor Meester' wat het doel heeft om de communicatie tussen de treindienstleider en de machinist te verbeteren. RouteLint zelf geeft een verkeersbeeld voor de machinist. Het systeem valt onder de zogenaamde machinisten informatie systemen ('Driver Information System' of 'DIS'), een systeem dat de machinist enkel informatie geeft op basis van een ruwe data verwerking. RouteLint geeft de volgende informatie, zie ook Figuur 2-9 (T. Albrecht, 2008, p. 103; T. Albrecht, Gassel, Knijff, & van Luipen, 2010, p. 1; T. Albrecht, Goverde, Weeda, & Van Luipen, 2006, p. 208):

- De positie en de vertraging van de trein;
- De rijweginstelling van de trein;
- De positie in vensters en vertraging in minuten van andere treinen voor en achter de trein.



**Figuur 2-9: interface van RouteLint machinisten informatie systeem (DIS) (T. Albrecht et al., 2006, p. 208)**

Met RouteLint wordt het mogelijk voor machinisten om ongeplande stops te vermijden en daarmee de capaciteit bij bottlenecks te vergroten en dus ook het energieverbruik te verminderen (T. Albrecht, Gassel, Binder, & van Luipen, 2010; T. Albrecht et al., 2006). De informatie kan namelijk door de machinisten tezamen met hun ervaring gebruikt worden om anticiperend te rijden en hun rijstijl aan te passen, waarmee negatieve effecten van conflicten worden verminderd.

Zowel reizigersmachinisten, goederenmachinisten als verkeersleiding hebben baat bij het systeem gehad (ProRail, 2006). Machinisten ervaren een lagere mentale inspanning door het rijden met RouteLint en ze kunnen verder vooruit kijken (anticiperend rijden). Een treindienstleider (TDL) kan met de extra actuele informatie aan de machinisten beter bijsturen en de communicatie tussen machinisten en treindienstleiders is verbeterd. Daarmee wordt de druk op de treindienstleider met behulp van stille communicatie via RouteLint verminderd (in plaats van bellen van machinist naar treindienstleider). RouteLint brengt echter ook negatieve aspecten met zich mee. Een belangrijk gevaar van RouteLint is afleiding. De machinist kan door het systeem afgeleid worden van de primaire taak om op de seinbeelden, wissels en het baanvak te letten, met alle gevolgen die dat met zich mee kan brengen. Deels is hiermee rekening gehouden, doordat RouteLint een zwart scherm toont bij snelheden lager dan 40 km/h. Deze



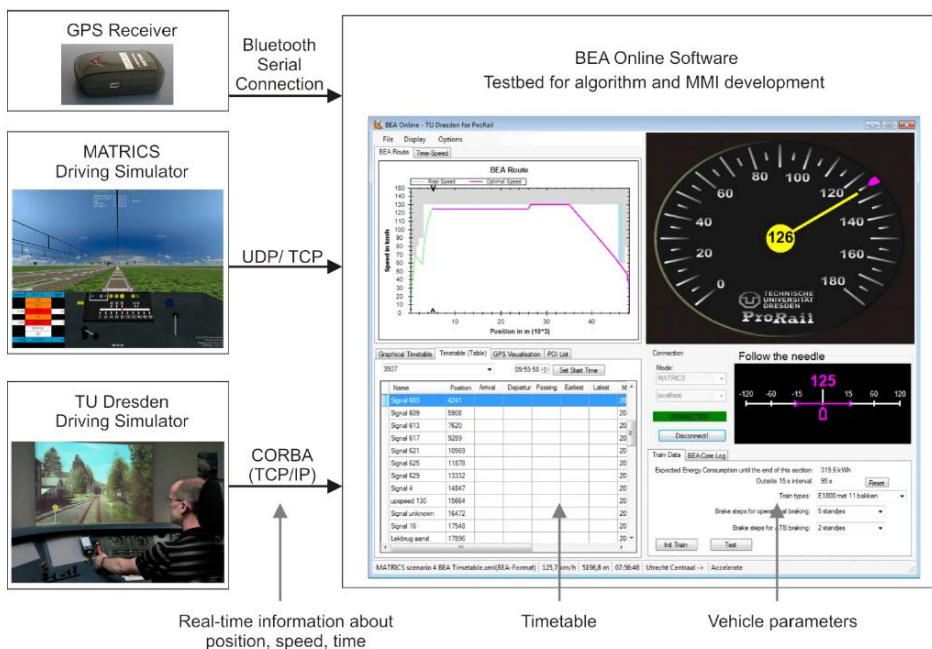
afleiding kan tevens ook voorkomen worden door enkel de belangrijkste informatie te tonen door middel van 'head-up displays', zoals hiervoor besproken is.

Desondanks heeft NS Reizigers op een gegeven moment besloten om uit het project te stappen, waardoor het project RouteLint is gestopt. Op dit moment zijn er binnen NSR echter plannen om RouteLint weer op te pakken, omdat het mogelijk baten heeft op het gebied van energiezuinig rijden, zoals anticiperend rijden.

## BEA

De tool BEA ('Basic Energy Analysis') is een machinisten adviseringssysteem (DAS) en is ontwikkeld in een samenwerking tussen ProRail en TU Dresden ('Technische Universität Dresden'). Dit systeem berekent op basis van algoritmes de energieoptimale treinbesturing (T. Albrecht, Gassel, Binder, et al., 2010). Daarmee wordt tot doel gesteld om het energieverbruik te minimaliseren, gegeven de beperkingen (zoals maximale baanvaknelheid). Daarbij houdt het algoritme rekening met de vier rijregimes vanuit de theorie over optimale treinbesturing (accelereren, snelheid vasthouden, uitrollen en remmen). Het algoritme in BEA bepaalt de omschakelpunten tussen de rijregimes op basis van de randvoorwaarden als bijvoorbeeld de tijd voor bepaalde doorkomstpunten of vertraagde treinen in de nabijheid. Het systeem kan goed gekoppeld worden aan RouteLint. BEA zelf houdt namelijk zelf geen rekening met andere treinen in de nabijheid en BEA houdt geen rekening met doorkomstpunten.

De tool BEA bestaat uit twee onderdelen. Allereerst is er BEA Online. Dit is een DAS dat gebruikt kan worden aan boord van de trein of bij een treinsimulator (T. Albrecht, Gassel, Binder, et al., 2010). Deze toont het daadwerkelijke snelheidsprofiel en het optimale energiezuinige snelheidsprofiel. Daarnaast geeft het systeem de adviessnelheid weer aan de machinist als een nummer of met een aanwijznaald, zoals dit ook gebeurt in de cockpit bij vliegtuigen. Ten slotte toont BEA Online ook de afwijking van het optimale pad en de verandering in de afwijking. De interface en de benodigheden van BEA Online zijn weergegeven in Figuur 2-10.



**Figuur 2-10: interface en de benodigheden van BEA Online (T. Albrecht, Gassel, Binder, et al., 2010, p. 28)**

Uit de evaluatie van BEA Online bleek dat dit programma geen rekening houdt met heuvels en omgevingsfactoren als wind, gladde sporen (T. Albrecht, Binder, & Van Luipen, 2008). Ook bleek tijdens de praktijkproeven van BEA Online dat de GPS ontvanger redelijk onnauwkeurig is (5 km/h afwijkingen) en daarnaast was er geen GPS ontvangst in tunnels. Dit leidde tot verkeerde

snelheidsadviezen aan de machinist. Daarnaast is het primaire doel van BEA punctualiteit. BEA Online bleek tijdens een treinrit ook redelijk statisch te zijn (BEA Online houdt zich vast aan de gegeven dienstregeling). Dit leidde ertoe dat BEA Online altijd probeerde op tijd op de volgende sectie te komen en zo de mogelijke vertraging in te lopen (BEA Online optimaliseert per sectie). Het gevolg daarvan was dat het energieverbruik toenam. Het systeem houdt geen rekening met de verdeling van de rijtijdspeeling over een traject. Dit bleek vooral problemen te veroorzaken bij treinen waarbij de rijtijdspeeling is strakgetrokken op de knopen.

Naast BEA Online is er ook BEA Plan, de versie van BEA die bij de planning gebruikt kan worden. Het grootste verschil is dat het met BEA Plan mogelijk is om tijdelijke snelheidsbeperkingen mee te nemen.

Uiteindelijk is BEA niet verder gebruikt dan een pilot in 2009 en is het systeem tot op heden nog niet toegepast bij treinen, hoewel NS Reizigers daar eerst wel potentie in zag. Tot slot blijkt dat BEA vooral voor onderzoek gebruikt is en nogal gevoelig is voor datafouten.

### 2.2.2 Buitenland

In het buitenland wordt veel onderzoek gedaan naar energiebesparingen in de spoorsector. In deze paragraaf worden de resultaten van onderzoek naar energiezuinig rijden (rijstijl) en energiebesparende methodes van de landen Australië, China, Duitsland, Frankrijk, Italië, Oostenrijk, Slovenië, Slowakije, Zweden en Zwitserland besproken.

De resultaten van de verschillende energie besparende maatregelen staan per land in de onderstaande tabel (Tabel 2-1) weergegeven. Daarbij zijn ook de gevolgen die de maatregel heeft in termen van energiebesparing opgesomd. In bijlage 4 zijn per land de maatregelen uitvoerig uiteengezet.

In het buitenland wordt er veel onderzoek gedaan naar DIS en DAS. 'Driver Advisory Systems' blijken echter nog wel veelal in ontwikkeling te zijn. Zo zijn in landen als China en Zweden de algoritmes en ideeën voor een DAS aanwezig, maar is de uitvoering daarvan nog in ontwikkeling. Australië is het meest gevorderd met het onderzoek naar hoe energiezuinig rijden meegenomen kan worden in een DAS. Zo heeft de 'Signaling and Control Group' van de Universiteit van Zuid-Australië de afgelopen jaren zeer veel onderzoek gedaan naar de optimale besturingstheorie toegepast op treinen. Daaruit zijn de rijregimes evenals de energieoptimale strategie bepaald. Dit algoritme is vervolgens toegepast in verscheidene systemen en werkt goed. Inmiddels wordt er een DAS aangeboden voor spoorvervoerders waarin deze theorie compleet verwerkt zit: het systeem 'Freightmiser' of 'Energymiser'. Ook in Duitsland en Zwitserland zijn er inmiddels 'Driver Advisory Systems' in de treinen die energiezuinig rijden stimuleren.

Bovendien vindt er in Zweden en Zwitserland onderzoek plaats naar een 'Traffic Management System' (TMS). Hierbij worden de verschillende treinen met of zonder DAS aan boord via de treindienstleider worden geoptimaliseerd. Op die manier is het mogelijk om op netwerkschaal energiezuinig te rijden en niet enkel per trein.

Daarnaast is het toepassen van de elektrodynamische (ED) remmen van de trein waardevol bij het toepassen van energiezuinig rijden. Uit de analyse van de verschillende landen blijkt dat de baten hiervan groter zijn naarmate de bovenleidingspanning hoger is. Ook blijkt de invloed van hellingen meer baten voor ED remmen met zich mee te brengen.

Tot slot blijkt dat er tot op heden nog niet veel onderzoek is gedaan naar hoe energiezuinig rijden geïntegreerd kan worden in de treindienstregeling. Daardoor kan dit onderzoek daar mogelijk toegevoegde waarde voor hebben.

Land	Maatregel	Gevolgen
Australië	DAS 'Freightmiser' of 'Energymiser' met optimale rijregime	Energiebesparing tussen 5% en 15%
China	Simulaties optimale rijregime	Energiebesparing tussen 6,8% en 9%
	Algoritme voor geïntegreerde dienstregeling	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energiebesparing gemiddeld 10,3% per tussenstation</li> <li>Berekeningstijd voor algoritme is gemiddeld slechts 0,15 s, waardoor goed toepasbaar in controle systemen in de praktijk</li> </ul>
Duitsland	Energiezuinig rijden machinisten (mcn)	Ongeveer 5% tot 7% energiebesparing (in 2004)
	DAS 'EBuLa-ESF'	
	Energiemeters 'TEMA box'	
Frankrijk	Energiezuinige rijstijl mcn	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doel SNCF eind 2010: 5% energiebesparing</li> <li>Bij 7% rijtijdspeeling 59% energiebesparing bij toepassen optimale rijstrategie t.o.v. tijdoptimale pad</li> </ul>
	Energiemeters	
	Energiezuinig parkeren	
Italië	ED remmen met recuperatie	
	Automatische deursluiting bij stationnement met tijdslimiet	
Oostenrijk	ED remmen met recuperatie	15% energiebesparing per trein
Slovenië	ED remmen met recuperatie	
Slowakije	Uitschakelen weerstanden in locomotief en zo snel mogelijk accelereren	
Zweden	Energiezuinig rijden ('eco-driving') door gebruik te maken van hoogteverschillen in topografie en ED remmen met recuperatie	10% tot 15% energiebesparing
	DAS 'CATO' (in ontwikkeling)	Verwachting is een energiebesparing tussen 20% en 25%
Zwitserland	Energiezuinig rijden mcn door gebruik te maken van hoogteverschillen in topografie, ED remmen met recuperatie en zo snel mogelijk te accelereren	3% tot 5% energiebesparing
	Communicatie maatregelen tussen treindienstleider (TDL) en mcn (TMS)	1% tot 2% energiebesparing
	DIS 'FARE' voor minimaliseren conflicten en stimuleren communicatie tussen TDL en mcn	Circa 5% energiebesparing

Tabel 2-1: resultaten maatregelen per land



### 2.2.3 Conclusie

In Nederland is energiezuinig rijden al bekend uit de tijd van de stoomtreinen. In de spoor geschiedenis blijkt dat het thema zo nu en dan sterk naar voren kwam en vervolgens weer op de achtergrond terecht kwam. Inmiddels is energiezuinig rijden weer een belangrijk thema geworden. Binnen NSR wordt daarbij gebruik gemaakt van de UZI-methode, waarbij een machinist zo vlot mogelijk versneld tot de gewenste snelheid en vervolgens op het juiste moment begint met uitrollen door de tractie uit te schakelen. De methode is bedacht door een machinist en wordt gekenmerkt door de sterke eenvoud en het grote draagvlak onder andere machinisten. Wel blijkt de methode door zijn eenvoud de nodige tekortkomingen te hebben, wat met name tot uitdrukking komt in het feit dat de methode statisch en vrij generiek is.

Een goede manier om anticiperend rijden beter mogelijk te maken voor machinisten is RouteLint. Dit systeem verschaft de machinist informatie over de treinen voor- en achter de trein en is ontwikkeld door ProRail en NS. Daarnaast heeft ProRail in samenwerking met de TU Dresden onderzoek gedaan naar een DAS genaamd BEA. Dit systeem bepaalt de optimale rijstrategie en tracht daarmee het energieverbruik van treinen te minimaliseren. Beide initiatieven zijn echter stilgelegd, maar het verdient de aanbeveling om in het kader van energiezuinig rijden naar de mogelijkheden te kijken van een reactivering van deze onderzoeken.

Ook in het buitenland wordt veel onderzoek gedaan naar energiezuinig rijden bij treinen. Dit onderzoek richt zich vooral op DIS en DAS. DIS zijn inmiddels vrij concreet en worden veelvuldig toegepast, zoals het FARE systeem in Zwitserland dat de machinist op een display informatie toont over de rijstrategie. DAS blijkt op dit moment vooral in ontwikkeling te zijn, maar er zijn inmiddels een aantal systemen opgezet. 'Freightmiser' of 'Energymiser' uit Australië is een DAS dat op dit moment het verste ontwikkeld is en zelfs als commercieel product op de markt verkrijgbaar is. Het systeem verschaft de actuele optimale rijstrategie en is gebaseerd op de optimale treinbesturing. In Zweden en Zwitserland wordt daarnaast onderzoek gedaan naar TMS, waarmee er getracht wordt om op netwerkschaal zo energiezuinig mogelijk te rijden. Dit is het uiteindelijke ideaalplaatje van energiezuinig rijden, waar met behulp van DAS per trein naar toe wordt gewerkt. Ten slotte wordt er in het buitenland veel aandacht besteed aan het remmen met behulp van ED remmen, waarmee energie wordt teruggewonnen tijdens de remfase. De baten hiervan zijn groter naarmate er sprake is van heuvelachtig gebied en een hoge bovenleidingspanning.

## 2.3 Energiezuinig rijden bij andere vervoersmodaliteiten

In deze paragraaf wordt er gekeken hoe energiezuinig rijden is toegepast bij andere vervoersmodaliteiten. Immers is energieverbruik een belangrijk thema in de maatschappij. Daarvoor worden hierna drie groepen bekeken, te weten het wegverkeer (personenauto's, vrachtauto's, bussen en touringcars), de scheepvaart en de luchtvaart.

### 2.3.1 Wegverkeer

Bij het wegverkeer wordt de afgelopen jaar ook veel aandacht geschonken aan energiezuinig rijden. Dit valt daar onder de naam 'Het Nieuwe Rijden' (HNR). HNR heeft als doel om voor automobilisten, beroepschauffeurs en wagenparkbeheerders het aankoop-, reis- en rijgedrag energie efficiënter te laten worden (HNR, 2012). HNR vormt een belangrijk onderdeel van het klimaatbeleid van Nederland. 'Het Nieuwe Rijden' draagt bij aan een verlaging van het brandstofverbruik, vermindering van de uitstoot van broeikasgassen en schadelijke stoffen, vermindering van de geluidshinder, vergroting van de verkeersveiligheid en het rijcomfort en tot slot vermindert deze manier van rijden schade of onderhoud aan het voertuig. Het nieuwe rijden geeft vervolgens per doelgroep (personenauto's, vrachtauto's, bussen en touringcars) een aantal tips met betrekking tot de rijstijl, de voorbereiding van de rit, banden, brandstof besparende accessoires en investering in een nieuw motorvoertuig. Voor inzage in de exacte

tips per doelgroep wordt verwezen naar de website van HNR te vinden in de literatuurlijst (HNR, 2012).

Het Nieuwe Rijden (met name gelet op de maatregelen voor de rijstijl) en de UZI-methode bij treinen zijn beide methodes die gericht zijn op het verlagen van het energieverbruik tijdens het rijden. Het toepassen van beide methodes is echter zeer verschillend, door het feit dat autoverkeer en treinverkeer zeer verschillend zijn. Zo is de rolweerstand van rubberbanden op asfalt veel groter dan van stalen wielen op stalen rails. Daardoor kunnen treinen zeer lang uitrollen. Daarnaast is de volgafstand bij wegverkeer voor HNR zeer van belang, omdat daar de bestuurder voldoende tijd heeft om te anticiperen en niet onnodig hoeft te remmen en te versnellen. Dit komt ook in enige mate terug bij treinen (anticiperend rijden), hoewel daar de afstand tussen de treinen bepaald wordt door blok lengte van de spoorbeveiliging. Bij treinen mist enkel nog de ondersteuning aan de machinist (bijvoorbeeld RouteLint), aangezien zij niet op zicht kunnen rijden zoals bij motorvoertuigen op de weg. Een andere overeenkomst is dat zowel de UZI-methode als HNR gebruik maken van uitrollen, hoewel dit bij treinen veel belangrijker is. Bij motorvoertuigen op de weg is dit vooral van belang voor het verminderen van snelheid of voor verkeerslichten. De motoraandrijving bij motorvoertuigen op de weg wordt bij HNR vooral bij stilstand van minstens 20 s à 60 s geadviseerd om de motor geheel uit te schakelen. Ook het gebruik van het aanhouden van een constante snelheid is een element dat zowel bij treinen als bij motorvoertuigen op de weg voor komt, waarmee veel energie bespaard kan worden.

Een verschil tussen HNR en UZI is echter wel dat bij HNR zeer snel optrekken niet wenselijk is, vanwege slechte verbranding en hoge toerental (schakelen van versnellingen), terwijl dit bij treinen wel zeer wenselijk is, vanwege de tijd die dan over is om uit te rollen. Tevens stelt HNR dat energie bespaard kan worden door niet onnodig veel elektrische apparatuur in de auto aan te laten. Hoewel de UZI-methode bij treinen daar geen uitspraak over doet, kan er bij treinen ook energie worden bespaard door niet onnodig elektrische apparatuur te laten draaien. Tot slot zijn beide methodes statisch en vrij algemeen. Zowel de tips van HNR als de UZI-methode zijn gegeven voor algemene omstandigheden zonder verstoringen (bijvoorbeeld regen, mist, file/vertraagde treinen, etc.). HNR is bovendien zeer algemeen in voertuigklassen, terwijl de verschillen per type auto zeer uiteenlopend zijn. De UZI-methode (alle versies) maakt nog onderscheid in de maximumsnelheid per treintype (SGM of overig materieel).

### 2.3.2 Scheepvaart

De scheepvaart vormt een belangrijke sector in de transportwereld. De sector draagt niet alleen bij aan de economische groei in de wereld, maar zorgt ook voor een aanzienlijke uitstoot van CO<sub>2</sub>. Wereldwijd worden er maatregelen genomen om het energieverbruik te verminderen, zo ook in Nederland. Zo heeft het toenmalige Ministerie van Verkeer en Waterstaat in 2007 het meerjarenprogramma VoortVarend Besparen opgestart om energiezuinig vaargedrag bij binnenvaartschippers te stimuleren (ECORYS, 2011). Dit programma duurde tot 2010 en had als een van de doelen om het CO<sub>2</sub> verbruik van de binnenvaart met 5% te verminderen (2010 t.o.v. 2007). Zo werd er binnen het programma VoortVarend Besparen een aantal vaartips gegeven waarmee het brandstofverbruik en daarmee de uitstoot van CO<sub>2</sub> verminderde. Uiteindelijk blijkt dat dit onderzoek heeft geholpen met het verlagen van het energieverbruik bij binnenvaartschippers en dat de doelstelling van 5% reductie in CO<sub>2</sub> uitstoot is gehaald. Voor inzage in de exacte tips wordt er verwezen naar het rapport over VoortVarend besparen te vinden in de literatuurlijst (ECORYS, 2011, p. 29).

De ideeën achter de vaartips binnen VoortVarend Besparen vertonen overeenkomsten met de UZI-methode, maar de uitvoering en de type tips verschilt toch aanzienlijk. Bij VoortVarend Besparen ligt de nadruk sterk op het behouden van een constante snelheid, op tijd vaart minderen, het niet onnodig laten draaien van de motoren. Het op tijd met vaart minderen kan worden gezien als de uitrolfase, hoewel dit ook het remmen van het schip kan zijn. Bij de UZI-

methode staat uitrollen zeer centraal. Mogelijk komt dit mede door het feit dat de wrijvingsweerstand op een schip vele malen groter zijn (absoluut en relatief) dan op een trein, waardoor uitrollen minder winst oplevert voor de scheepvaart. Een opvallend verschil tussen energiezuinig varen en de UZI-methode is dat de UZI-methode een zo vlot mogelijke versnelling voorschrijft, terwijl bij de vaartips gesteld wordt dat de snelheid langzaam opgevoerd dient te worden (ECORYS, 2011). Opnieuw kan dit net als bij motorvoertuigen liggen aan het feit dat schepen ook gebruik maken van een verbrandingsmotor die een slechte verbranding oplevert bij snel accelereren. Ook blijkt dat het trainen van schippers met de vaartips tot een verlaging van het brandstofverbruik leidt. Sinds 2011 traint NS ook al haar machinisten met de UZI-methode gedurende de landelijke herinstructiedagen voor machinisten (LHM) in de railsimulator in Amersfoort. Ook hier blijkt dat het effect van trainingen positief te zijn op het verlagen van het energieverbruik, zo daalde het energieverbruik landelijk 2% in 2011 ten opzichte van 2010 (Luijt, 2012a). Daarnaast blijkt net als in de spoorsector ook bij de scheepvaart het gebruik van hulpmiddelen (zoals brandstofmeters) bij een energiezuinige vaarwijze te helpen.

### 2.3.3 Luchtvaart

Energieverbruik is in de luchtvaartsector erg belangrijk, zeker gezien de toenemende brandstofprijzen en het belang van de reductie van de uitstoot van broeikasgassen. KLM ('Koninklijke Luchtvaart Maatschappij') heeft onderzoek gedaan naar maatregelen waarmee het brandstofgebruik verminderd kan worden. Dit in het kader van het verlagen van de CO<sub>2</sub> uitstoot alsmede het verlagen van de brandstofkosten. Een belangrijk gegeven is het gewicht van het vliegtuig. Deze bepaalt zeer sterk het brandstofverbruik. Daarom is nauwkeurig tanken (zo exact mogelijk de benodigde hoeveelheid kerosine in één keer tanken) zeer van belang (Van Engelen, Schneijderberg, & Verkaaik, 2010). Ook wordt geadviseerd om op de grond niet constant alle motoren vol aan te laten staan, maar deze indien mogelijk grotendeels uit te zetten. Daarnaast worden tips gegeven over het vliegen zelf waarmee piloten brandstof kunnen besparen. Voor een uitvoerige behandeling van deze tips wordt verwezen naar het rapport van KLM (Van Engelen, Schneijderberg, & Verkaaik, 2010). Zo is het bijvoorbeeld van belang om vooraf de optimale kosten index te bepalen voor het vliegplan, waarmee het optimale vliegregime (gegeven de aankomsttijd op de bestemming) kan worden bepaald (zo min mogelijk energieverbruik). Dit systeem vertoont gelijkenissen met het optimale rijstrategie bij treinen, waarbij ook gegeven een aantal criteria het optimale snelheidsprofiel wordt bepaald. Daarnaast dient de piloot tijdens het vliegen zoveel mogelijk op de optimale vlieghoogte te blijven met een constante snelheid, om op die manier zo min mogelijk brandstof te verbruiken. Dit vertoont gelijkenissen met het behouden van de snelheid in de optimale rijstrategie voor treinen ('cruising'). Tevens levert het volgen van een optimale stijging met het vliegtuig ook energiebesparingen op en kan met de daling veel energie worden bespaard door met een lagere snelheid te dalen en niet of minder te remmen op de motoren in volle achteruit kracht. Met energiezuinig rijdende treinen kan hier de vergelijking worden getrokken met de optimale strategie die stelt dat treinen zo snel mogelijk dienen te accelereren en gebruik te maken van elektrodynamische remmen om minder energie te verliezen bij het afremmen.

### 2.3.4 Conclusie

Uit de analyse van energiezuinig rijden bij andere vervoersmodaliteiten blijkt dat in elke sector onderzoek wordt gedaan naar maatregelen om het energieverbruik te verminderen. Tevens leidt dit tot zowel raakvlakken als verschillen met het energiezuinig rijden bij treinen. Bij alle vervoersmodaliteiten is het van belang om zoveel mogelijk de snelheid constant te houden. Daarnaast blijkt ook het toepassen van een uitrolfase bij de verschillende vervoersmodaliteiten nuttig te zijn. De grote verschillen zijn met name dat bij treinen uitrollen heel erg van belang is, doordat de wrijvingsweerstand tussen de stalen wielen en rails veel kleiner is dan tussen rubber banden en asfalt of water en staal. Daarnaast is het bij de het wegverkeer en de scheepvaart gewenst om niet te snel op te trekken, terwijl dit bij treinen en vliegtuigen juist wel van belang is voor een energiezuinige strategie.

## 2.4 Rijtijdspelingverdeling in Nederland

Rijtijdspeling is zoals uitgelegd is in paragraaf 2.1.1 een belangrijk element in de dienstregeling. In het voorgaande is de theoretische achtergrond hiervan beschreven. Nu is het zaak om de praktijk onder de loep te nemen. In deze paragraaf wordt daartoe de manier waarop rijtijdspeling wordt toegepast in Nederland onderzocht. Dit gebeurt door eerst te kijken naar hoe de rijtijdspeling op dit moment wordt verdeeld en vervolgens te kijken naar de ontwikkeling van een model dat zelf de rijtijdspeling optimaal verdeelt.

### 2.4.1 Huidige methode rijtijdspelingverdeling

De rijtijdspeling wordt in Nederland verdeeld zoals omschreven is in de Netverklaring bijlage 23 (ProRail, 2011b). In deze bijlage staat uitgelegd dat in het dienstregelingontwerpproces in principe wordt ontworpen op de plannormen. Deze plannormen geven aan dat voor reizigerstreinen de minimale rijtijd vermeerderd wordt met minimaal 5% rijtijdspeling om een robuuste en soepele uitvoering mogelijk te maken. Dit gebeurt in het dienstregelingontwerpprogramma Donna. Donna berekent eerst zelf de rijtijd met rijtijdspeling. Daarna wordt de spreiding mogelijk handmatig door de planners anders verdeeld. Bij goederentreinen wordt geen rijtijdspeling toegevoegd, maar wordt ontworpen op de afkeurnorm, dat “is de technisch minimale rijtijd tussen blokpunten<sup>8</sup> (inclusief eventuele minimale stationnementen) zoals berekend door VPT<sup>9</sup>/Donna” (ProRail, 2011b, p. 175). Rijtijdspeling zit hier in het feit dat er wordt ontworpen op de meest ongunstige samenstelling van de trein die vrijwel niet voorkomt, waardoor in de praktijk de trein een hogere snelheid heeft dan ontworpen en dus rijtijdspeling heeft.

De afkeurnormen die ProRail hanteert, zijn gebaseerd “op minimale technische tijden van de infrastructuur ter plekke” (ProRail, 2011b, p. 175). De afkeurnorm wordt gebruikt voor het bepalen van de minimale opvolgings- en overkruistijden. De afkeurnormen zijn veelal nodig, omdat de wensen van vervoerders in conflict zijn met de plannormen. In principe wordt er bij het ontwerp niet afgeweken van de afkeurnorm, aangezien deze de technisch minimale rijtijd weergeeft tussen blokpunten, berekend vanuit VPT/Donna. Voor het berekenen van deze afkeurnorm rijtijd wordt er bij reizigerstreinen gebruik gemaakt van de maximale treinsamenstelling in de spitsperiode die door de vervoerder gepland wordt. De tool Roberto (Rij- en Opvolgtijd BERrekenings TOol) van ProRail berekent de exacte technisch minimale ongehinderde tijden voor een specifieke situatie, locatie en type materieel met een zo gunstig mogelijk seinbeeld. De afkeurnorm bestaat uit de volgende tijdselementen:

$$\text{Afkeurnorm} = \text{technisch minimale tijd afgerond naar boven naar hele minuut} \\ + \text{mogelijk 1 minuut extra marge.}$$

Indien het ongehinderd rijden met de minimale tijden niet tot het gewenste resultaat leidt, wordt er gebruik gemaakt van gehinderd rijden (geel seinbeeld) en wordt de situatie opnieuw bekeken in Roberto. Het ontwerp van dit gehinderde treinsamenstelling wordt in samenspraak gedaan met ProRail afdeling Prestatie Analyse Bureau (PAB) en alle betrokken partijen. Als er onder de technisch minimale tijd ontworpen wordt komt de afdeling veiligheid van ProRail meekijken.

Vanuit het dienstregelingontwerp is het wenselijk dat elk conflict automatisch gecontroleerd zou worden, omdat hiermee veel tijd tijdens het ontwerp bespaard kan worden en bepaalde conflicten niet over het hoofd worden gezien. Het probleem is dat Donna op dit moment op microniveau gegevens heeft, maar toetsingen uitvoert met generieke normen. Het is wenselijk

---

<sup>8</sup> Blokpunten zijn de volgende typen dienstregelpunten: knooppunten, kruisplaatsen op enkelsporige baanvakken en inhaalvoorzieningen (ProRail, 2011b, p. 176).

<sup>9</sup> VPT staat voor ‘Vervoer Per Trein’ en werd gebruikt door de planners bij het dienstregelingontwerpproces voordat Donna bestond (VPT-Planning).

om Roberto automatisch aan Donna te koppelen, zodat voor elk conflict in de dienstregeling automatisch gecontroleerd wordt op microlocatieniveau door Roberto.

Ook blijkt dat niet alle berekeningen van Donna in de praktijk kloppen. Dit betekent dat de theoretische snelheidsprofielen zo nu en dan niet goed overeenkomen met de snelheidsprofielen in de praktijk. De rijtijdberekeningen in Donna zijn nog niet gevalideerd met de praktijk. Donna blijkt veelal te negatief over de rijtijden te zijn in vergelijking met de resultaten in de praktijk. Een voorbeeld van een tekortkoming van Donna is dat het systeem aanneemt dat een trein stopt bij het uitrijsein van een station (aan het einde van het perron), terwijl een trein in werkelijkheid rond de trappen zal staan (halverwege het perron). Dit leidt tot grote afwijkingen tussen theorie en praktijk, zeker bij stations met een grotere perronlengte, zoals station Sittard. Daarnaast blijkt bij navraag bij de specialisten van de rijtijdberekening in Donna dat Donna ook geen rekening houdt met bogen. Ook worden hellingen in Donna alleen meegenomen bij goederentreinen, omdat uit onderzoek zou zijn gebleken dat alleen lange zware goederentreinen die vanaf stilstand vertrekken hoge weerstanden door hellingen ondervinden. Momenteel is bij ProRail in samenwerking met Lloyd's Register Rail Europe B.V. een onderzoek gaande om te komen tot een betere aansluiting van de Donna-rijtijden met die in de praktijk.

Daarnaast is het vanuit het dienstregelingontwerp gewenst dat de gegeven randvoorwaarden haalbaar zijn. Zo stelt NS Commercie vast dat de SLT tijdens een korte stop een halteertijd heeft van 0,4 minuut, terwijl in de praktijk minimaal 0,8 minuut nodig is. NS Commercie wil dat de treinen zo snel mogelijk van A naar B rijden met als voorwaarde dat het op papier klopt. Uiteindelijk is een compromis voor 0,6 minuut gesloten. Dit heeft echter wel tot gevolg dat er per stationnement van de SLT 0,2 minuut speling verdwijnt.

De rijtijdspelingverdeling, die door de planner van de dienstregeling is ingevoerd in het BUP, kan gewijzigd worden door realisatiegegevens uit de praktijk die worden geleverd door verkeersleiding (VKL). De wens van VKL is op dit moment de speling zoveel mogelijk op het eind neer te leggen, vooral op de knooppunten, het zogenaamde straktrekken. De reden hiervoor is het behouden van de punctualiteit van de dienstregeling, die gemeten wordt op slechts 35 stations in Nederland (ProRail, 2011a). Dit betekent dat op de tussenliggende blokpunten de dienstregeling strak is aangespannen. Alleen op belangrijke blokpunten waar kort volgen of een krappe planning is (bijvoorbeeld knooppunten) wordt er extra rijtijdspeling volgens de normen toegedeeld. Daarmee wordt de kans dat een trein op tijd op het knooppunten aankomt vergroot (en dus een hoge meting van de punctualiteit). In de praktijk blijkt tevens uit gesprekken met verscheidene machinisten (tijdens het meerijden op de bok) dat treinen regelmatig tegen een rood sein aanlopen bij knooppunten. Machinisten hebben namelijk alleen informatie op hun dienstkaartje over de aan-, door- en vertrektijden in minuten en de rijtijdspeling wordt niet weergegeven. Bovendien worden de tussenliggende rijtijdspeling en inlegsnelheid van de trein niet met de machinisten gecommuniceerd. Hierdoor denken de machinisten vaak te laat te zijn op tussenliggende punten en rijden ze zo dicht mogelijk bij het minimale tijdspad. Vervolgens komen ze veel te vroeg op een knooppunten, waar ze vervolgens moeten afremmen, wachten en versnellen en langzaam het station binnenkomen. Door deze manier van rijden gaat er veel rijtijd en energie verloren. Tevens wordt het voor machinisten lastig om energiezuinig rijden toe te passen en verliezen ze vertrouwen in het ontworpen treinspad van hun trein. Dit kan er toe leiden dat machinisten het tijdspad niet meer proberen te halen, waardoor ze mogelijk achterliggende treinen kunnen hinderen.

#### 2.4.2 SOM

Binnen NS wordt onderzoek gedaan naar modellen om de rijtijdspeling beter te verdelen. NS Reizigers heeft het model SOM ("Stochastic Optimization Model") ontwikkeld (Kroon, Huisman, et al., 2008; Kroon, Maróti, Helmrich, Vromans, & Dekker, 2008). Het doel van het model is een cyclische dienstregeling te vinden met een minimale gewogen vertraging voor treinen, oftewel



SOM verbetert de punctualiteit. Deze verbetering is in de orde van veelal één procentpunt en vermindert kleine verstoringen (voortplantingsvertragingen tussen treinen van maximaal vier minuten). SOM herverdeelt de rijtijdspeling en de buffertijden zodanig dat de resulterende dienstregeling meer robuust is dan de bestaande dienstregeling. Daarbij houdt het model de bestaande structuur van de dienstregeling vast. SOM past daarvoor de rijtijdspeling aan op een traject tussen twee stations. De halteerspelings blijft gelijk. Daarnaast blijft de totale speling die beschikbaar is vanuit het dienstregelingontwerpprogramma DONS<sup>10</sup> gelijk in SOM. Dit betekent dus als SOM ergens speling toevoegt, er ergens anders speling verwijderd wordt. SOM haalt rijtijdspeling weg op een traject waar een trein minder gevoelig is voor vertraging en plaatst deze vervolgens op het traject waar de trein vertraging oploopt (gevoelig voor vertraging). In SOM kan als keuzecriterium worden meegenomen of de norm van 5% rijtijdspeling overall blijft gehandhaafd en dat daarmee enkel de rijtijdspeling boven de 5% herverdeeld wordt, of dat de norm wordt losgelaten en alle rijtijdspeling herverdeeld wordt. SOM genereert oplossingen via de steekproefgemiddelde benaderingsmethode ('Sample Average Approximation Method'). Het model bestaat uit een optimalisatiemodel waarin de rijtijdspeling optimaal verdeeld wordt en een simulatiemodel waarin de robuustheid van de ontworpen dienstregeling wordt getoetst.

Het ontwikkelde model is vervolgens toegepast in twee case studies te weten:

1. Simulaties voor de 'Kop van Noord-Holland' met de toen nog in ontwikkeling zijnde dienstregeling van 2007.
2. Praktijkproef op de 'Zaanlijn' met de bestaande dienstregeling in 2006.

Uit de resultaten van de eerste case studie blijkt dat de resultaten van SOM een robuustere dienstregeling opleveren bij gegeven verstoringen dan de bestaande dienstregeling. Tevens blijkt uit de praktijkproef op de 'Zaanlijn' dat de punctualiteit toenam. Daarbij dienen wel kanttekeningen geplaatst te worden bij de relatief korte termijn van de praktijkproef en het feit dat de treindienstleider bewust was van de proef en de punctualiteitsmetingen. Al met al zijn de resultaten van SOM positief bij kleine verstoringen in de dienstregeling. Ze zijn niet alleen in de praktijkproef 'Zaanlijn' aangetoond, maar ook met behulp van simulaties in SIMONE, dat eveneens aan DONS is gekoppeld. Met SIMONE wordt de dienstregeling getoetst op gevoeligheid voor verstoringen (Middelkoop, 2011).

Een van de aanbevelingen in het onderzoek van Kroon, Maróti, et al. (2007) is dat het wenselijk is om SOM direct aan het dienstregelingontwerpprogramma DONS te koppelen. Hiermee kan namelijk de ontworpen dienstregeling direct geoptimaliseerd worden door SOM. Op dit moment wordt hier onderzoek naar gedaan. SOM wordt daarmee dus een uitbreiding van DONS. Bijna alle criteria die in DONS worden gehanteerd, worden ook door SOM gehanteerd. Alleen de criteria voor de ligging van het tijdspad van de trein en voor de rijtijdspeling is in SOM anders dan in DONS. SOM maakt voor iedere trein de afweging waar het complete tijdspad van de trein komt te liggen, indien hier keuzevrijheid voor is. Daarnaast is de rijtijdspeling in DONS vast, terwijl deze in SOM variabel is. Een voorbeeld om de verschillen tussen DONS en SOM te laten zien voor een traject met een korte kale rijtijd (maximaal 20 minuten):

- Aankomsttijd (AT) station B DONS:  $vertrektijd (VT) \text{ station A} + \text{kale rijtijd} + 1 \text{ minuut speling}$ .

---

<sup>10</sup> 'Designer of Network Schedules' (DONS) wordt gebruikt bij het dienstregelingontwerpproces, maar dan vooral voor de langetermijnplanning. Het grote verschil tussen DONS en Donna is namelijk dat in DONS zelf infrastructuur kan worden ingebouwd, terwijl Donna enkel werkt met de geleverde infrastructuurdata uit Infra Atlas. DONS wordt enkel gebruikt door NS Reizigers en ProRail. Het uiteindelijke ontwerp van de dienstregeling gebeurt in Donna en deze dienstregeling wordt op dit moment nog handmatig overgebracht naar DONS. DONS wordt gebruikt door verschillende tools waarmee de dienstregeling geanalyseerd wordt, als SIMONE (SIMulatie MOdel voor NETwerken), FRISO (Flexibele Rail Infra Simulatie Omgeving) en Roberto (Middelkoop, 2011).

- SOM:  $VT A + \text{kale rijtijd} \leq AT B \leq VT A + \text{kale rijtijd} + \text{max 2 minuten speling}$ .

Aangezien SOM waarschijnlijk in de toekomst gebruikt gaat worden bij het dienstregelingsontwerpproces, bestaat er ook een belangrijke relatie tussen SOM en energiezuinig rijden (EZR). Voor EZR zit er zowel een nadeel als voordeel aan SOM:

- Mogelijk nadelige gevolgen van SOM zijn er voor treinen die (bijna) altijd op tijd rijden. Immers wordt door SOM op het traject waar treinen altijd op tijd rijden mogelijk rijtijdspeling verwijderd en in de trajecten waar treinen altijd vertraging hebben gestopt (totale rijtijdspeling is immers gelijk). Hierdoor kunnen de treinen die altijd op tijd rijden niet meer (of minder) energiezuinig rijden, doordat er minder speling is.
- Aan de andere kant komen treinen die nu vaak te laat arriveren op stations, niet meer altijd te laat aan waardoor de punctualiteit toeneemt. Bovendien heeft dit vooral gevolgen voor treinen achter de oorspronkelijk vertraagde treinen bij een krappe buffertijd. Zij lopen niet meer tegen een rood sein aan bij binnenkomst op stations en gebruiken daardoor minder energie (extra versnellen vanuit stilstand is niet meer nodig) en daarnaast worden de doorstroming en punctualiteit beter. Deze treinen kunnen daardoor beter EZR toepassen.

Al met al is het een afweging tussen minder EZR toepassen voor treinen die straks minder rijtijd hebben en de andere treinen die straks beter EZR kunnen toepassen, doordat ze minder hinder hebben van vertraagde treinen voor zich. Het totale effect op EZR dient onderzocht te worden. Ten slotte is het een idee om een SOM dienstregeling mee te nemen bij de pilot 'kwart minuten' om het effect op EZR te analyseren.

### 2.4.3 Conclusie

Geconcludeerd wordt dat de huidige manier van de rijtijdspeling in principe op basis van de plannormen gebeurt en indien dit niet kan, de afkeurnormen worden toegepast. Dit gebeurt door de planners met behulp van het dienstregelingsontwerpprogramma Donna waarbij zij de Netverklaring in acht houden. Bij het huidige dienstregelingsontwerpproces zijn nog een aantal zaken niet ideaal. Zo worden nog niet alle conflicten automatisch gecontroleerd tijdens de ontwerpfase. Ook blijkt dat niet alle berekeningen in Donna kloppen met de resultaten uit de praktijk en worden er onhaalbare randvoorwaarden gesteld. Tot slot blijkt het effect van straktrekken van de dienstregeling te leiden tot ongewenste resultaten. Zo komen treinen te vroeg aan op het knooppunt en wachten ze voor een rood sein. Daarnaast verliezen machinisten het vertrouwen in het ontworpen treinpad en kunnen ze mogelijk achterliggende treinen hinderen. Al met al zijn dit gevolgen die energiezuinig rijden tegenwerken.

Mogelijk kan het model SOM hier voor verbetering van de rijtijdsverdeling zorgen, aangezien dit model een cyclische dienstregeling zoekt met zo min mogelijk gewogen vertraging voor treinen gegeven een verstoringsscenario. Met het licht op de koppeling tussen SOM & DONS en DONS & Donna wordt het mogelijk hiermee in de nabije toekomst de compleet ontworpen dienstregeling direct te optimaliseren. Wel dient opgemerkt te worden dat het van belang is om te onderzoeken welke gevolgen de dienstregeling van SOM heeft op het totale energieverbruik van treinen. Aanbevolen wordt om hier nog verder onderzoek naar te doen.



### 3 Data

Dit hoofdstuk behandelt de verschillende databronnen die beschikbaar zijn en mogelijk geschikt zijn voor dit onderzoek. Deze data is nodig om het uiteindelijke model te ijken, te verifiëren, te valideren en te kijken naar de resultaten van het model vanuit de case studie in de praktijk. Daarnaast is data nodig dat als input dient voor het model. Eerst worden de databronnen behandeld die vanuit meetpunten langs het baanvak data genereren. Paragraaf 3.1 analyseert de databron TROTS, waarna paragraaf 3.2 de datatool Trento bespreekt, waarmee de data uit TROTS wordt verwerkt en geanalyseerd. Daarna volgt er een tweetal tools waarmee het energieverbruik van treinen kan worden bepaald. Ten eerste wordt de datatool EMMA besproken in paragraaf 3.3. Daarna volgt in paragraaf 3.4 de methode waarmee het relatieve energieverbruik van treinen kan worden bepaald. In paragraaf 3.5 wordt vervolgens een keuze gemaakt van de databron die wordt gebruikt bij de data-analyse in dit onderzoek. De inputdata die in het model wordt gebruikt, wordt tot slot in paragraaf 3.6 besproken

#### 3.1 TROTS

Trein Observatie Tracking Systeem (TROTS) is ingevoerd in 2009 als opvolger van TreinNummerVolgsysteem (TNV). TROTS is door ProRail ontwikkeld en hiermee is het mogelijk te zien waar een trein zich bevindt, door het treinnummer van de trein te koppelen aan de spoorsecties (enkel voor het beheerde deel van het spoorwegnet). TROTS bevat een grotere hoeveelheid informatie dan TNV, waardoor het systeem een grotere nauwkeurigheid van treinposities garandeert. Bovendien is TROTS ook toekomstgericht, doordat er al mogelijkheden zijn ingebouwd voor toekomstige projecten als GPS ('Global Positioning System') positionering en de invoering van ERTMS ('European Rail Traffic Management System'). Op dit moment worden nog dezelfde baanvakelementen als bij TNV gebruikt in TROTS, te weten de secties, seinen en wissels (Bruning, 2011). TROTS koppelt het treinnummer aan het bezetten en vrijkomen van secties. Het systeem wordt gebruikt bij de treindienstleiderposten van ProRail en bij de Regelcentra van NS Reizigers. TROTS was nodig omdat TNV verouderd was en door nieuwe eisen van de spoorsector, onder andere met betrekking tot de nauwkeurigheid van de treinposities.

De logdata van TROTS worden bewaard in TROTS-archieven. Dit zijn logboeken waarin alle meldingen van aan TROTS gekoppelde systemen worden vastgelegd die per dag per verkeersleidingspost worden geleverd. Er zijn verschillen tussen de bestanden vanuit VTL (Verbeterde TNV Logbestanden)/TNV en de TROTS-archieven (Bruning, 2011, p. 5):

- *Bij VTL bestanden worden gewerkt met routeblokken om treinen, via vensters, aan treinseries te koppelen. Deze routeblokken zijn niet aanwezig in TROTS archieven.*
- *In TROTS archieven zijn sectiemeldingen al gekoppeld aan treinnummers, hetgeen het hebben van routeblokken overbodig maakt.*
- *Bij VTL bestanden zijn door gebruik van routeblokken ook automatische seinen gekoppeld, bij TROTS kunnen seinen alleen worden gekoppeld op basis van kilometreringen en richtingen en in sommige gevallen secties.*
- *In TROTS zijn ook de posities van niet bediende seinen (P-seinen) bekend en koppelbaar volgens bovenstaande variabelen.<sup>11</sup>*
- *Regels in TROTS archieven kennen, in tegenstelling tot VTL bestanden, verschillende types en variabele lengtes afhankelijk van de aanwezige informatie (zie onderstaand punt).*
- *Door de in TROTS aanwezige kilometrering gegevens kan de rijrichting ten opzichte van het kilometerlint worden afgeleid en diverse afstandsvariabelen worden gehanteerd zoals de afstand tussen trein & sein en de lengte van secties.*
- TROTS bestanden worden dynamisch gestructureerd.

---

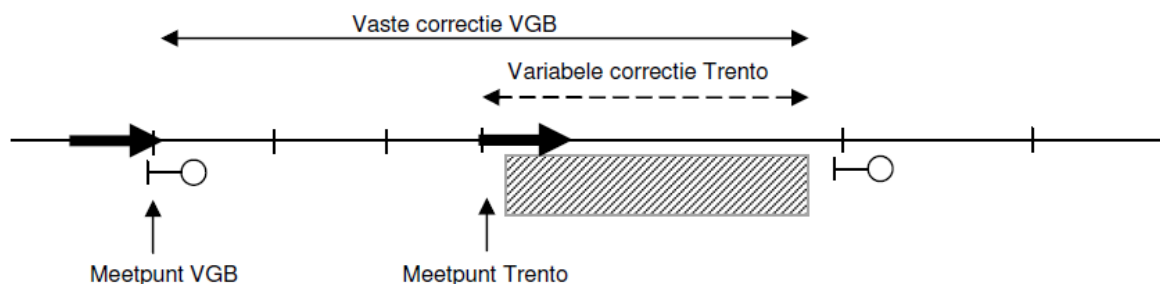
<sup>11</sup> Met koppelbaar van P-seinen wordt bedoeld dat de locatie van een P-sein bekend is (tussen welke secties bevindt een P-sein zich) en dat de secties veelal ook uitleesbaar zijn. Niet alle P- en bediende seinen kunnen worden uitgelezen, omdat de secties niet uitleesbaar zijn of zijn samengesteld.

### 3.2 Trento

Trento (TRots EN Tool) heeft als doel de infrastructuurdata te verwerken en analyseren (Bruning, 2011). Met Trento is het namelijk mogelijk nauwkeurig de positie van de trein te bepalen gegeven de baanvakmeldingen, waardoor nauwkeurig de aankomst-, vertrek- en doorkomsttijden van treinen berekend kunnen worden. Bovendien kunnen mogelijke (ongeplande) stops voor stoptonende seinen bepaald worden en kan de trein die dit veroorzaakte aangewezen worden. Dit gebeurt met behulp van de seinhindertool in Trento die gezien kan worden als de verbeterde versie van TNV Conflict. Dit komt doordat er meer data beschikbaar is vanuit TROTS gegevens dan voorheen bij de VTL tool en TNV Conflict. Ook zijn er toevoegingen in de seinhinder output van Trento aangebracht. Zo blijkt dat voor elk sein het tijdstip van de vorige seinpassage en het tijdstip van de sectie voor het sein bezet wordt aangegeven en tevens wordt de lengte van de sectie voor het sein en de afstand tussen twee seinen aangegeven. Toch kan dit niet voor alle seinen gebeuren, waardoor niet voor alle seinen de ongeplande stops te bepalen zijn. Trento is ontstaan als opvolger van de VTL-tool. Dit was nodig omdat TNV vervangen werd door TROTS. Trento wordt gebruikt door NS Reizigers en ProRail. Zij gebruiken de data om onder andere een terugkoppeling te geven van de uitvoering van de dienstregeling in de praktijk naar de dienstregelingplanning.

De aankomst- en vertrektijden worden ook bepaald door VGB (Vervoers Gegevens Bank) van verkeersleiding, waarmee de officiële puntualiteitscijfers worden bepaald. Het verschil is echter dat Trento nauwkeurigere waarden oplevert dan VGB, wat komt door een andere berekeningswijze. VGB past de TNV venstersprongberekeningswijze toe, waarbij de aankomsttijd wordt berekend vanuit de passage van het inrijsein voor een station (Bruning, 2011). Dit is minder nauwkeurige berekeningswijze, doordat de trein nog een grote afstand moet afleggen voordat deze langs het perron stil staat. Daartoe hanteert de VGB een vaste correctiefactor per baanvakspoor/perronspoor combinatie en activiteit (aankomst, vertrek of doorkomst). Door deze constante correctiefactor wordt er bijvoorbeeld geen rekening gehouden met het type materieel en het aankomstspoor.

Trento daarentegen bepaalt de aankomsttijd door de laatste sectiemelding voor het perron te gebruiken oftewel de sectie voor de halteersectie. Bij de halteersectie wordt er gebruik gemaakt van de vrijmelding van de sectie voor de halteersectie. Deze vrijmelding is het tijdstip waarop de staart van de trein in zijn geheel op de halteersectie staat en dus de sectie voor de halteersectie als vrij wordt gemeld (Bruning, 2011). Desondanks is ook nu een correctiefactor nodig om het moment van aankomst van de trein langs het perron te bepalen. Deze factor houdt rekening met de halteerlocatie (lengte perron en locatie hoofdtrap) en het materieel (lengte en optrek/afrem versnelling materieel). De methode van Trento is veel nauwkeuriger dan VKL-VGB methode, doordat de correctiefactor een kleiner deel van de tijd hoeft te corrigeren en variabel is. Bovendien bevat Trento de halteertijden van bijna alle stations in Nederland. De aankomstberekening van beide methodes staat weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1: "aankomstberekening in VGB en Trento" (Bruning, 2011, p. 7)

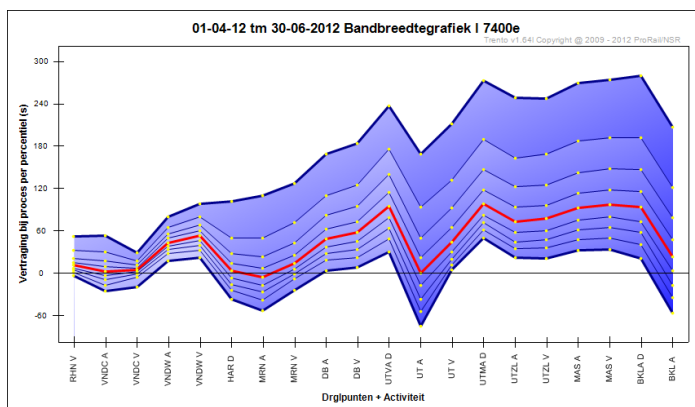
Er kunnen afwijkingen bestaan tussen de daadwerkelijke tijden en de tijden in Trento (Bruning, 2011). De oorzaak is dat Trento gebruik maakt van zogenaamde BTI DI meldingen<sup>12</sup> om daarmee de tijdstippen te bepalen waarop een sectie vrij of bezet is. De daadwerkelijke meldingen van bezettingen en vrijgave worden echter gemeld in IVATROTS BM<sup>13</sup>. Hierdoor treden mogelijk (kleine) afwijkingen op. Ook klopt de tijd bij bepaalde hectometerpunten soms niet wat leidt tot te hoge snelheden (Hoogenraad, 2011). De oorzaken hiervan zijn veelal technische storingen in het systeem bij ProRail.

Trento bestaat uit twee delen. In het eerste deel, het verwerkingsdeel, worden de inputgegevens vanuit TROTS verwerkt tot nieuwe output. Daarna wordt deze output in het tweede deel, analyse, vertaald naar grafieken en tabellen. Deze basis indeling in Trento is zichtbaar in Figuur 3-2.



Figuur 3-2: overzicht functies Trento (A = aankomst, V = vertrek, D = doorkomst, keer/kruis = kerende of kruisende treinen) (Bruning, 2011, p. 12)

Een belangrijke output vanuit Trento die gebruikt wordt voor de punctualiteitsmetingen van een treinserie is de bandbreedtegrafiek (voor een voorbeeld zie Figuur 3-3). Hierin is te zien wat de bandbreedte van de procesvertraging per activiteit op een dienstregelpunt is (Bruning, 2011). Daarbij is de bandbreedte gegeven door middel van 10 t/m 90 percentiellijnen in stappen van 10. De rode lijn geeft het 50 percentiel aan, de dikke blauwe lijnen onder en bovenaan vormen de 10 en 90 percentiellijn. In bijlage 5 is een ander voorbeeld met uitvoerige toelichting gegeven over wat de bandbreedtegrafiek precies zegt. Deze informatie is van belang voor EZR, omdat een trein punctueel dient te rijden voordat EZR mogelijk is.



Figuur 3-3: bandbreedtegrafiek sprintersserie 7400 even traject Rhenen - Breukelen periode 1 april t/m 30 juni 2012

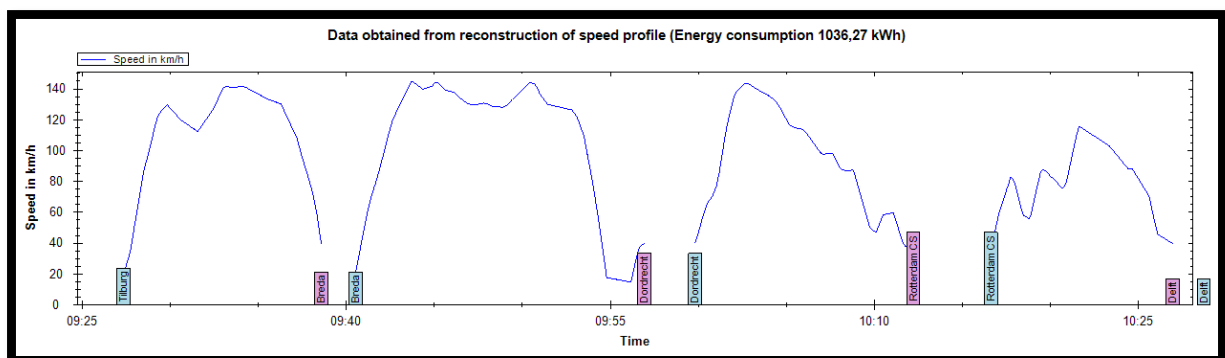
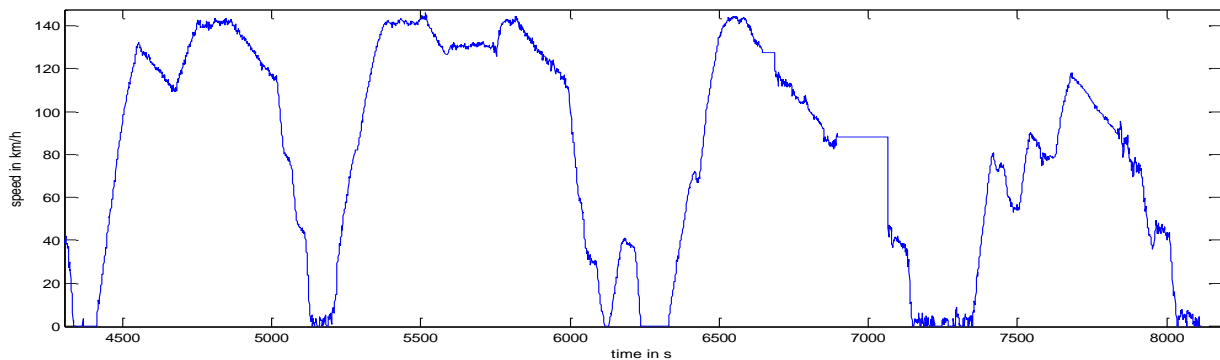
<sup>12</sup> Deze meldingen geven de koppeling aan tussen treinnummer verplaatsingen en sectiebezettingen. Dit zijn dus eigenlijk virtuele meldingen die gebaseerd worden op basis van fysieke bezet- en vrijmeldingen van secties.

<sup>13</sup> Deze melding geeft de stand weer van alle infrastructuur buiten, dus wanneer de stand van een sein, wissel of sectie verandert, volgt er een IVATROTS BM melding met informatie over welke infra object welke stand heeft genomen.

### 3.3 EMMA

Energie Meten, Monitoring en Analyse (EMMA) is een tool waarmee het energieverbruik van treinen bepaald kan worden op basis van spoordetectie data (T. Albrecht, Gassel, Knijff, et al., 2010). Het systeem is in opdracht vanuit ProRail ontwikkeld door TU Dresden ('Technische Universität Dresden'). Het systeem berekent twee dingen. Ten eerste wordt het snelheidsprofiel berekend door middel van de gegeven spoorbezettingsdata vanuit TROTS metingen. De tweede stap van EMMA is het berekenen van het energieverbruik van een enkele trein. EMMA is toegepast voor de intercity (IC) serie 1900 tussen Den Haag Centraal (Gvc) en Venlo (VI) om de effecten te analyseren van RouteLint. Daarbij is het model met behulp van energiemeters en GPS geijkt, zie ook Figuur 3-4. De output van EMMA bestaat uit (T. Albrecht, Gassel, Knijff, et al., 2010, p. 6):

- Snelheidsprofielen;
- Snelheidsfrequentie-analyses bij knelpunten;
- Energieverbruik over de tijdwegdiagrammen;
- Energieverbruik-analyses (gemiddelde en variantie).



**Figuur 3-4: gereconstrueerd snelheidsprofiel (onder) vergeleken met GPS metingen van de snelheid (boven) (Snel, 2011, p. 4)**

De kracht van de methode is dat EMMA vanuit de aangeleverde data uit TROTS zelf het snelheidsprofiel van een trein en bovendien het energieverbruik van een trein reconstrueert. Dit kan waardevol zijn voor de evaluatie van de pilot en het model in de praktijkproef.

EMMA is echter alleen bedoeld voor intercitytreinen. Voor goederentreinen zou het ook kunnen worden gebruikt, maar het probleem is hier de grote variatie in samenstelling. Voor stoptreinen/sprinters is EMMA niet (goed) geschikt, doordat er niet genoeg detectiedata beschikbaar is om deze treinen te detecteren op vrijebaanstations. Hierdoor kan het snelheidsprofiel van dit type treinen niet bepaald worden bij vrijebaanstations en is het geschatte energieverbruik erg onnauwkeurig. De prestatie van het model is dus sterk afhankelijk van de aangeleverde data. Het gebruik van EMMA hangt dus sterk af of de TROTS

data geschikt is voor nauwkeurige analyse op de case studie baanvak Utrecht Centraal – Rhenen (Ut – Rhn).

### 3.4 Methode relatief energieverbruik

In het kader van energiemonitoring heeft NS Reizigers Jan Hoogenraad (consultant) gevraagd om een methode te ontwikkelen waarmee met behulp van de geleverde data het relatieve energieverbruik voor een groot aantal treinseries bepaald kan worden.

De data-input voor het model voor relatief energieverbruik bestaat uit TROTS- of Trento-data. Dit blijkt afhankelijk te zijn van de levering door Kenniscentrum van NS Reizigers. Het doel van het model is om vanuit deze data het energieverbruik per rit van een groep treinen op het desbetreffende traject te bepalen (Hoogenraad, 2010). Het energieverbruik van de treinseries wordt hier bepaald door middel van de snelheid. Daarbij wordt er duidelijk onderscheid gemaakt tussen remmen of tractie.

Vervolgens analyseert Jan Hoogenraad welke ritten er mee genomen worden bij de analyse. Zo worden enkel ritten meegenomen waarbij er voldoende secties zijn tussen twee stations en die ook voldoende vaak voor kwamen. Daarnaast worden de ritten meegenomen die maximaal drie minuten van het mediane tijdspad afliggen (Hoogenraad, 2010, 2011).

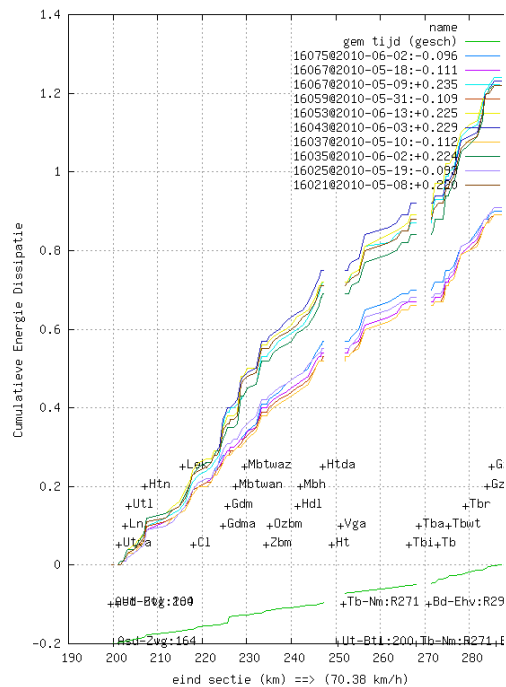
Daarna wordt er een handmatige correctie uitgevoerd op de secties. Er zijn namelijk secties die vreemd gedrag vertonen door afwijkende tijds patronen en hele hoge snelheden. Ook wordt de data glad gemaakt door middel van de veel voorkomende patronen. De tien belangrijkste patronen worden vervolgens gebruikt voor het maken van het tijdsprofiel over het traject (Hoogenraad, 2010).

De methode bepaalt na de uitgevoerde correctie de snelheidsprofielen. Dit gebeurt in de eerste interpolatie met behulp van Gauss-filter differentiatie en in de tweede interpolatie met een door Jan Hoogenraad ontwikkeld algoritme. Vanuit het berekende snelheidsprofiel kan tot slot het energieverbruik worden bepaald. Dit wordt berekend voor de tractie- (acceleratie- en kruis-), uitrol- en remfase met behulp van de eigenschappen van de trein. Daarbij houdt de methode ook rekening met recuperatie.

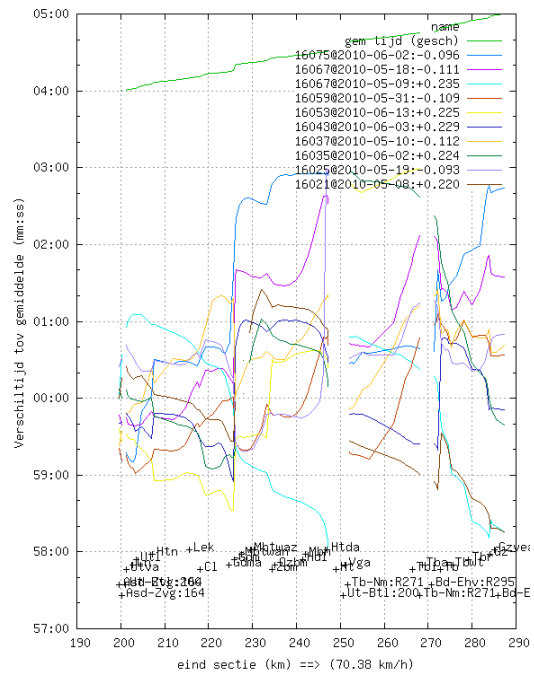
De ontwikkelde methode is niet geschikt voor het onderzoek in dit rapport. De methode bepaalt namelijk met behulp van een grove benadering het energieverbruik en geeft meer een indicatie hoe een treinserie presteert. Aangezien het doel in dit onderzoek is om de UZI-methode van NS Reizigers nauwkeurig te vergelijken met de optimale rijstrategie vanuit theorie, is het van belang om nauwkeurige data te hebben. Tot slot is de methode nog niet gevalideerd.

Het resultaat van het model is het energieverbruik en het tonen van het tijdspad en snelheidsprofiel. In Figuur 3-5 is een voorbeeld te zien van de resultaten uit het model voor de sprinter (SPR) serie 16000 op het baanvak Utrecht Centraal – 's-Hertogenbosch (Ut – Ht).

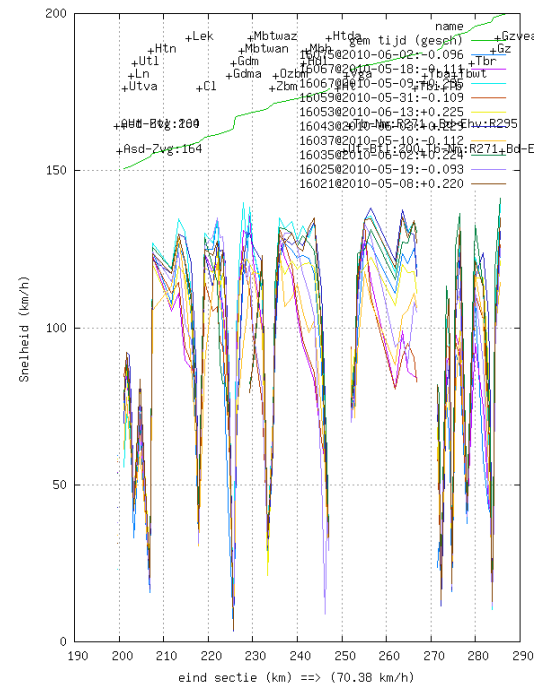
s-201-160000\_TTL-1N.gif: Analyse van unzip -c ../zipin0618/routes\_201



s-201-160000\_TTL-1D.gif: Verschiltijden van <3 min afwijkende trein uit unzip -c ../zipin0618/routes\_2010-k.zip |



s-201-160000\_TTL-1V.gif: Analyse van unzip -c ../zipin0618/routes\_2010-v



Figuur 3-5: voorbeeld resultaten vanuit model relatief energieverbruik voor SPR serie 1600 (Ut – Ht) (links: relatief energieverbruik traject, midden: verschiltijden t.o.v. gemiddeld tijdspad en rechts: gereconstrueerd snelheidsprofiel) (Hoogenraad, 2010, p. 3)



### 3.5 Keuze methode data-analyse

TROTS en Trento data zijn dus beschikbaar vanuit metingen uit de infrastructuur. Vanuit Trento wordt de bandbreedtegrafiek gebruikt waaruit blijkt hoe de treinen in de praktijk hebben gereden over de dienstregelpunten waar gemeten wordt. Op dit moment is het nog niet mogelijk om data uit het materieel zelf te halen. Daarnaast is EMMA beschikbaar waarmee het energieverbruik van treinen bepaald kan worden. Het probleem is echter wel dat op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen niet overal detectiedata is en dat de sectielengtes rondom stations vrij groot is. Hiermee wordt het bepalen van de remtijd en acceleratietijd uit de data lastig rondom (vrijebaan)stations. Daarnaast is het baanvak nog niet geconfigureerd in EMMA. Dit betekent dat het geld kost voor NS Reizigers om het baanvak in EMMA te krijgen. Tevens is de methode van relatief energieverbruik niet geschikt voor het onderzoek, omdat deze methode te onnauwkeurig is. Ten slotte is ook gekeken naar de mogelijkheden om GPS data te gebruiken, maar deze methode kostte teveel tijd om te kunnen analyseren en is buiten de scope van het afstudeeronderzoek gehouden. Voor meer informatie over de GPS data wordt naar bijlage 6 verwezen.

De geanalyseerde databronnen blijken niet geschikt te zijn voor de gehele kalibratie, validatie en verificatie van het model. Daarom is verder gezocht naar beschikbare databronnen binnen NS Reizigers. Uiteindelijk is gekozen om de volgende databronnen te gebruiken:

- Energiegegevens per rijregime voor verschillend NS Reizigers materieel geleverd door Lloyd's Register Rail Europe B.V. (kalibratie).
- Donna dienstregeling inclusief rijtijden en rijtijdspeling (verificatie en validatie).
- Bandbreedtegrafiek uit Trento (validatie).

### 3.6 Inputdata model

Het model dat ontwikkeld wordt heeft inputdata nodig om te kunnen werken. Het gaat hierbij om infrastructuur-, materieel-, dienstregeling- en punctualiteitdata. Deze worden hierna stap voor stap kort toegelicht.

De data van de infrastructuur is afkomstig van Infra Atlas en Wegkennisbank. Infra Atlas is een informatiesysteem dat alle technische gegevens bevat van de railinfrastructuur in Nederland (Van Driel & Luremans, 2010). Daarnaast bevat Wegkennisbank alle gedetailleerde baanvakkaarten met de locaties en namen van de infrastructuurelementen (NS, 2012b). Tezamen geven deze voldoende informatie over de locatie van perrons, snelheidsborden, seinen en hellingen. Daarmee is het mogelijk om de infrastructuur data op te stellen die nodig is voor het model. De infrastructuur data is verder onderverdeeld in secties waarbij een constante maximale snelheid geldt, omdat hier het model enkel mee kan omgaan. De gefilterde data die de infrastructuur op het traject Utrecht Centraal – Rhenen beschrijft is te vinden in bijlage 7.

Materieeldata is afkomstig van TreinPlein (NSR/Lloyd's, 2012). Dit is een internetapplicatie die gedetailleerde informatie geeft over de technische prestaties van het verschillend type materieel van NS Reizigers. Deze internetapplicatie bevat echter enkel informatie in de vorm van losstaande getallen met een toelichting waarvoor deze gebruikt worden. De formules zijn niet gegeven, omdat deze vertrouwelijke data in handen is van Lloyd's Register Rail Europe B.V. Wel is het mogelijk om met behulp van verschillende coëfficiënten en toelichtingen de formules te herleiden. Op basis daarvan zijn zo de treinweerstandformules en de trekkrachtkarakteristieken bepaald. De formule voor de treinweerstand was wel bekend, dit is de treinweerstandformule (wordt gebruikt in VPT) in formule (2.5). De gebruikte gegevens vanuit de materieeldata staan weergegeven in bijlage 8.



Voor de dienstregeling van de sprinterserie 7400 is gebruik gemaakt van de bestaande Basisuurpatronen van de dienstregeling in 2012. In dit bestand zijn namelijk ook de berekende tijden gegeven vanuit Donna in tiende minuten en die worden gebruikt voor het model. Hiermee is het mogelijk om te zien in hoeverre de geplande tijden overeen komen met de resultaten van het model. Voor de dienstregeling van de sprinterserie 7400 is gebruik gemaakt van de bestaande Basisuurpatronen van de dienstregeling in 2012. De gedetailleerde data hiervan is te vinden in bijlage 9.

Tot slot zijn er gegevens nodig met betrekking tot de punctualiteit van de treinserie. Deze gegevens zijn met name van belang voor de pilot van NS Reizigers. Daarvoor is de bandbreedtegrafiek van Trento noodzakelijk, zoals ook besproken is in paragraaf 3.2. Daarnaast zijn mogelijk de correctiefactoren van Trento van station Bunnik nodig indien deze gecontroleerd dient te worden met GPS metingen uit de praktijk. In dit onderzoek is hier niet aan toegekomen en daarom wordt aanbevolen om hiernaar in vervolgonderzoek aandacht aan te besteden.

## 4 Methode

Een belangrijk onderdeel in dit afstudeeronderzoek vormt de ontwikkeling van het model waarmee de optimale rijstrategie bepaald kan worden. In dit hoofdstuk wordt besproken hoe dit model is opgebouwd. Eerst wordt in paragraaf 4.1 de keuze voor de optimale treinbesturingstechniek besproken die in het model gehanteerd wordt. Daarna wordt in paragraaf 4.2 de algemene theorie weergegeven die nodig is voor het model voor het bepalen van de rijtijdberekening, voortbordurend op de theorie over EZR uit hoofdstuk 2. Vervolgens wordt in paragraaf 4.3 stap voor stap uitgelegd hoe het model werkt. Hetzelfde wordt in deze paragraaf gedaan voor het uitgebreide algoritme. Daarna wordt in paragraaf 4.4 een beschrijving gegeven over de pilot van NS Reizigers, gebaseerd op het plan van aanpak van deze pilot. Ten slotte behandelt paragraaf 4.5 de beschrijving van de case studie, waarbij het model in de praktijk tijdens de pilot wordt toegepast.

### 4.1 Keuze optimale treinbesturingstechniek

De optimale treinbesturingsstrategieën kunnen onderverdeeld worden in drie grote groepen, te weten: ‘proportional-integral-derivative’ (PID) besturingstechnieken, ‘fuzzy’ besturingstechnieken en optimale besturingstechnieken (Yang, Li, Gao, & Li, 2012). PID is een van de conventionele optimale treinbesturingstheorie. De methode volgt een patroon gebaseerd op een gemiddeld treinmodel. Het resultaat is dat de methode het patroon van de doelsnelheid geeft. Bij de ‘fuzzy’ methodes wordt er ook rekening gehouden met de complexiteit van de realiteit, waar bij de PID geen rekening mee wordt gehouden. Het is daarmee mogelijk bij de ‘fuzzy’ methodes om aan verschillende vereisten vanuit de spoorwegmaatschappij te voldoen, bijvoorbeeld het rijcomfort, energiezuinig rijden en punctualiteit. Bij deze methodes wordt de ervaren machinisten besturingskennis omgezet in een computerprogramma. Daarin wordt er gewerkt met besturingsregels zoals: “als ( $u$  is  $C \rightarrow x$  is  $A$  en  $y$  is  $B$ ), dan  $u$  is  $C$ ” (Yang et al., 2012, p. 619). Deze methode is dus vooral geschikt om het menselijke gedrag te modelleren. Tevens is het belangrijk om vooraf het gehele proces goed te kennen, om ervoor te zorgen dat het model goed werkt. Tot slot is de derde methodiek om de optimale treinbesturing te bepalen de optimale besturingstheorie. Door middel van het minimaliseren van een bepaalde doelfunctie wordt de optimale rijstrategie van een trein bepaald. In de meeste recente onderzoeken wordt er gekozen voor de optimale besturingstheorie om het treinbesturingsprobleem te analyseren. Het grote voordeel van deze theorie is dat er wiskundig al mogelijkheden bestaan om het probleem te definiëren en er vervolgens verder onderzoek naar te doen. Tevens blijkt de optimale besturingstheorie het daadwerkelijke proces in de praktijk goed te omschrijven. In dit onderzoek wordt daarom ook van de optimale besturingstheorie gebruik gemaakt.

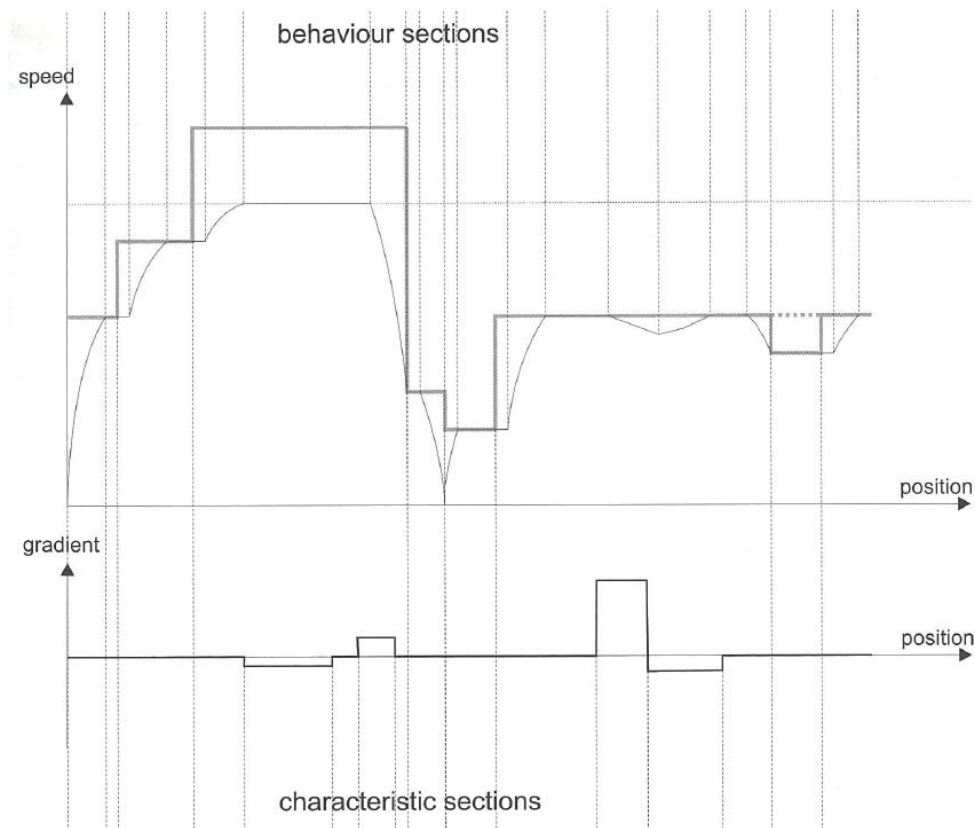
### 4.2 Rijtijdberekening

Een trein die rijdt van A naar B kan verschillende dingen doen, bijvoorbeeld versnellen of afremmen. De activiteiten die een trein kan doen worden ook wel rijregimes genoemd. In deze paragraaf wordt stap voor stap weergegeven hoe de verschillende rijregimes en daarmee de berekening van de rijtijd bepaald worden.

#### 4.2.1 Treindynamica

De eerste stap die nodig is voor het bepalen van de rijregimes is het omschrijven van een treinbeweging (dynamica). De beweging van de trein wordt bepaald door de trekkracht, de weerstand, de rijweg en de beperkingen vanuit de dienstregeling. Gesteld kan worden dat secties waar een trein zich door beweegt door twee belangrijke invloedsfactoren worden bepaald die ook te zien zijn in Figuur 4-1 (Brünger & Dahlhaus, 2008, p. 65):

1. De eigenschappen van de sectie (‘characteristic sections’) veroorzaakt door veranderingen in de infrastructuur of de dienstregeling (vooral haltingen op stations).
2. Gedrag van de secties (‘behaviour sections’) gevormd door de beweging van de trein (bijvoorbeeld hellingen).



**Figuur 4-1: secties waar een trein zich door beweegt op een baanvak waarbij de rijtijd wordt bepaald door het gedrag binnen de sectie (zoals maximale baanvakssnelheid) en eigenschappen (zoals hellingen) van de sectie (Brünger & Dahlhaus, 2008, p. 65)**

De theorie die hieronder volgt is ontleend aan hoofdstuk vijf uit het boek 'Railway Timetable & Traffic' door T. Albrecht (2008, pp. 83-89), de collegesheets van het vak 'CT5803-09 Railway Traffic Management' van Goverde (2011, pp. 3-10), het artikel van Howlett, Pudney en Vu (2009, pp. 2693-2695), het artikel van Liu en Golovitcher (2003, pp. 921-924) en het artikel van Su, Li, Tang en Gao (2012, pp. 2-5). De materieeldata van NS Reizigers is afkomstig uit de materieel database TreinPlein (NSR/Lloyd's, 2012).

De beweging van een railvoertuig kan met behulp van de volgende differentiaalvergelijkingen worden omschreven:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_{Tr}(v) - R(x, v)}{m_{bel} + m_l \cdot \rho} = \frac{F_{Tr}(v) - R(x, v)}{m_{trein}}, \quad (4.1)$$

$$\frac{dx}{dt} = v(x). \quad (4.2)$$

Waarin:

$v(x)$ : snelheid van de trein [ $m/s$ ]

$m_{bel}$ : massa van de belading<sup>14</sup> op de trein [ $kg$ ]

<sup>14</sup> De belading wordt berekend door de nominale belading van de trein te vermenigvuldigen met de (gemiddelde) bezettingsgraad. De belading is de massa door de passagiers van de trein en deze bestaat uit alle zitplaatsen in de trein (bezet) waarbij één persoon wordt aangenomen op 70 kg (inclusief bagage), één machinist per cabine en één conducteur per treinstel (NSR/Lloyd's, 2012).

$m_l$ : massa van de gehele ledige<sup>15</sup> trein zonder toeslag roterende delen [kg]

$m_{trein}$ : massa van de gehele<sup>16</sup> trein [kg]

$\rho$ : toeslag roterende delen of massa rotatie factor [–]

$x$ : locatie van de trein (coördinatie) [m].

De trekkracht  $F_{Tr}(v)$  en de totale bewegingsweerstand  $R(x, v)$  zijn reeds toegelicht in subparagraaf 2.1.2 (vergelijkingen (2.3) respectievelijk (2.11)).

De totale tijd  $t$  [s] die nodig is voor de trein om te rijden wordt bepaald met:

$$t(X) = \int_0^X \frac{1}{v(x)} dx. \quad (4.3)$$

Waarin:

$X$ : totaal afgelegde afstand [m].

De trein zelf wordt vervolgens gemodelleerd als een massapunt, omdat hiermee makkelijker te rekenen is en de berekende resultaten veelal voldoende nauwkeurig zijn ten opzichte van de modellering van de trein als een homogene strip (Brünger & Dahlhaus, 2008). De aanname is ook gedaan in de artikelen van Liu en Golovitcher (2003), door Howlett, Pudney en Vu (2009) en Su, Li, Tang en Gao (2012). Hieruit volgt namelijk de volgende differentiaalvergelijking die de relatie tussen de snelheid  $v$  en de afgelegde weg  $x$  uitdrukt. Dit betekent dat formule (4.1) met formule (4.2) wordt herschreven tot:

$$\frac{dv}{dt} / \frac{dx}{dt} = \frac{F_{Tr}(v) - R(x, v)}{m_{trein} \cdot v} \Rightarrow \frac{dv}{dx} = \frac{F_{Tr}(v) - R(x, v)}{m_{trein} \cdot v}. \quad (4.4)$$

De specifieke trekkracht  $u(v)$  [N/kg] kan als volgt worden bepaald:

$$u(v) = \frac{F_{Tr}(v)}{m_{trein}}. \quad (4.5)$$

Met randvoorwaarden:

$$u(v) \in [-u_{min}(v), u_{max}(v)], \quad (4.6)$$

$$u_{max}(v) = \frac{F_{Tr}^{max}(v)}{m_{trein}} > 0, \quad (4.7)$$

$$u_{min}(v) = \frac{F_{rem}^{max}(v)}{m_{trein}} > 0. \quad (4.8)$$

<sup>15</sup> De massa van de ledige trein bestaat uit het treinstel zelf gevuld met alle voorraden en gevulde watertanks (NSR/Lloyd's, 2012)

<sup>16</sup> Vanuit TreinPlein is voor elke trein ook de belading gegeven per treintype (NSR/Lloyd's, 2012). In MATLAB wordt daarom gebruik gemaakt van de totale massa van de trein inclusief deze belading bovenop de ledige massa van de trein plus de massatoeslag voor roterende delen, omdat dit beter overeen komt met de werkelijkheid.

Hierbij is  $F_{rem}$  de remkracht [N] en staat  $max$  voor maximaal. Daarnaast kan de specifieke weerstand  $r(x, v)$  [N/kg] als volgt worden berekend:

$$r(x, v) = \frac{R(x, v)}{m_{trein}} = \frac{W_{trein}(v) + W_{baan}(x)}{m_{trein}} = \frac{r_1 + w_2 \cdot v + w_3 \cdot v^2}{m_{trein}}. \quad (4.9)$$

Met formules (4.5) en (4.9) wordt formule (4.4) herschreven tot:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{u(v) - r(x, v)}{v}. \quad (4.10)$$

### 4.2.2 Gedrag van een trein

Met de gegeven mogelijkheden voor de treinbeweging kan nu het gedrag van een trein worden omschreven. Het gedrag van een trein kan in vier zogenaamde rijregimes worden weergegeven, te weten (Brünger & Dahlhaus, 2008, pp. 66-67):

1. Accelereren;
2. Constante snelheid ('cruising');
3. Uitrollen ('coasting');
4. Remmen.

#### Acceleratiefase

Bij het accelereren versnelt een trein of tot de maximaal toegestane baanvaksnelheid of tot de optimale kruissnelheid of tot de maximaal technische materieelsnelheid (de kleinste van deze wordt genomen). De trein begint echter pas met accelereren als hij zich in zijn geheel op het baanvak bevindt waar versneld mag worden. Een trein accelereert zo snel mogelijk, omdat daarmee zoveel mogelijk tijd over blijft om bijvoorbeeld uit te gaan rollen. De acceleratie van een trein is hetzelfde als het oplossen van differentiaalvergelijking (4.10).

De trekkrachtcurve is echter discreet gegeven vanuit TreinPlein (enkel coördinaten) (NSR/Lloyd's, 2012). Voor latere verwerking in MATLAB is het van belang om deze discrete datapunten te vertalen in een continue functie. De omschrijving hiervan is te vinden in bijlage 10.1.

#### 'Cruising' fase of kruisfase

Als een trein de maximale snelheid bereikt heeft, blijft de trein deze behouden en rijdt de trein dus met een constante snelheid, de zogenaamde 'cruising' fase of kruisfase. Bij hellingen en bogen kan de berekening gelijk worden aan die in een acceleratiefase (opgaande helling of boog met negatieve versnelling). Bij een neergaande helling gebruikt de trein minder tractie, doordat de baanweerstand dan negatief wordt. Bij steile neergaande hellingen dient de trein uit te rollen of zelfs extra te remmen om de constante snelheid vast te houden. In principe moet het volgende gelden voor de kruisfase: de snelheid is constant en de trein accelereert dus niet. Dit betekent dus dat het trekkrachtoverschot  $F_0$  gelijk moet zijn aan 0:

$$F_0(x, v) = F_{Tr}(v) - R(x, v) = 0. \quad (4.11)$$

Daarmee kan formule (4.10) voor de kruisfase worden herschreven als:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{u(v) - r(x, v)}{v} = 0. \quad (4.12)$$

### Uitrolfase

De uitrolfase wordt op dezelfde manier berekend als de versnellingsfase, alleen dan zonder trekkkracht. Bij energiezuinig rijden wordt de plek waar de uitrolfase van de trein eindigt bepaald door het punt waar de remcurve de uitrolsnelheidscurve raakt (Desprez, 2011). Bij deze fase geldt de volgende formule:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{-r(x, v)}{v}. \quad (4.13)$$

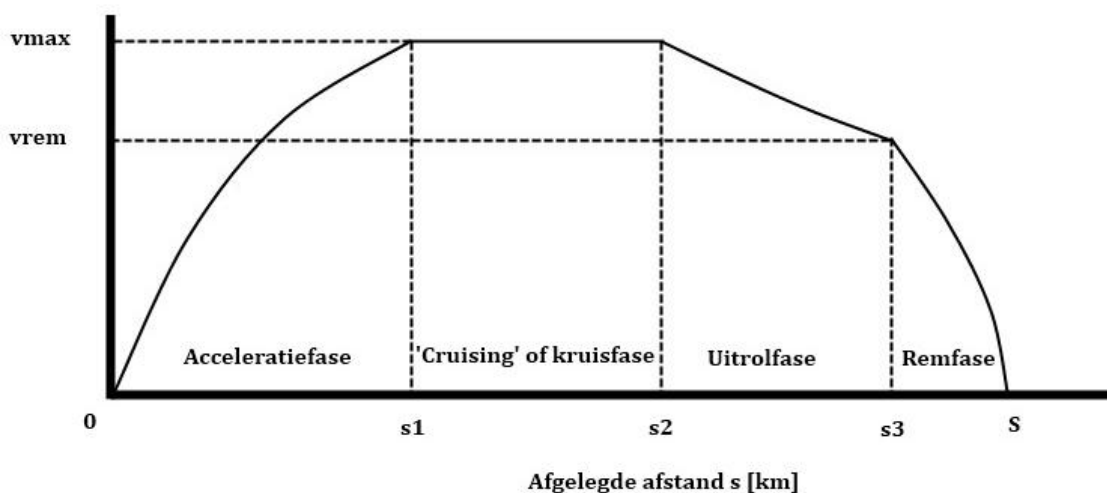
Bij de tijdoptimale rijstrategie zal een trein zo snel mogelijk accelereren tot de maximale snelheid, vervolgens deze snelheid vasthouden en vlak voor het einde zal de trein tot slot remmen met de maximale (service) remkracht. Daarom is er geen tijd beschikbaar voor uitrollen bij de tijdoptimale rijstrategie. De verschillen tussen beide strategieën worden in de subparagrafen 4.3.1 en 4.3.2 besproken.

### Remfase

Bij het remmen wordt er ontworpen op remstand 4 van de 7 beschikbare remstanden (Freek & Hessels, 1999, p. Bijlage P). Dit is nog een comfortabele/service remming en voor de optimale rijstrategie is maximaal remmen noodzakelijk (T. Albrecht, 2008). Op de plaats waar remcurve en constante snelheidscurve elkaar raken, begint de trein met remmen gegeven de tijdoptimale rijstrategie (Brünger & Dahlhaus, 2008).

Met de formules die het treingedrag beschrijven en de verschillende rijregimes die mogelijk zijn voor een trein dienen vervolgens de differentiaalvergelijkingen in formule (4.3) en formule (4.10) opgelost te worden om de tijd en de afstand te bepalen die nodig zijn voor de trein om te accelereren, constante snelheid te behouden, uit te rollen en te remmen. Het resultaat van de bovenstaande differentiaalvergelijking is de snelheid over de afgelegde afstand, het zogenaamde snelheidsprofiel. Een voorbeeld van een eenvoudig snelheidsprofiel waarin de rijstrategie met verschillende omslagpunten van rijregimes zichtbaar is, is te vinden in Figuur 4-2.

Snelheid  $v$  [km/h]



Figuur 4-2: voorbeeld rijstrategie met omslagpunten ( $s_1$ : omslagpunt acceleratie naar 'cruising',  $s_2$ : omslagpunt 'cruising' naar uitrollen en  $s_3$ : omslagpunt uitrollen naar remmen)

### 4.3 Algoritme model

In deze paragraaf wordt stap voor stap het model opgebouwd. Allereerst wordt hiervoor de tijdoptimale rijstrategie bepaald. Daarna wordt de energiezuinige rijstrategie besproken.

#### 4.3.1 Tijdoptimaal

Nu de wiskundige achtergrond rondom de verschillende rijregimes bekend is, kan de tijdoptimale rijstrategie worden bepaald. Bij de tijdoptimale rijstrategie gaat het erom dat een trein zo snel mogelijk van A naar B gaat. Daarbij wordt dus niet gekeken naar het energieverbruik. De omslagpunten van de rijregimes zijn hier eenvoudig te bepalen. Immers eerst accelereert de trein met maximale (service) acceleratie tot aan de maximaal toegestane snelheid. Daarmee is de afstand die nodig is voor versnellen bekend en is dus ook het eerste omslagpunt bekend. Het tweede omslagpunt wordt bepaald door eerst de benodigde remafstand te bepalen die de trein nodig heeft bij een maximale serviceremming van de maximaal toegestane snelheid tot stilstand. Vervolgens kan van de totale afstand deze remafstand worden afgetrokken. Daarmee is ook het tweede omslagpunt bekend. De overige afstand is namelijk beschikbaar voor de kruisfase. Hierna volgt allereerst de basisstructuur van de tijdoptimale rijstrategie die in het model geïmplementeerd is. Vervolgens wordt het effect van hellingen, bogen en/of tunnels op de berekeningen behandeld. Ten slotte wordt een korte conclusie van de tijdoptimale rijstrategie gegeven.

#### *Basisstructuur*

De doelfunctie van de tijdoptimale rijstrategie is als volgt gedefinieerd: het minimaliseren van de tijd en dus een zo hoog mogelijke snelheid. Het gaat er dus om, om voor elk rijregime formule (4.10) op te lossen. Daarbij dient opgemerkt te worden dat een trein niet tegelijkertijd tractie levert en remt, dus of de trekkracht is gelijk aan 0 of de remkracht is gelijk aan 0. De tijdsduur kan bepaald worden door het integreren van de omgekeerd evenredige functie van de snelheid, zie formule (4.3). De functie van de snelheid over de afgelegde afstand wordt discreet berekend. Daarom wordt de tijd met behulp van discrete stappen bepaald:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_{gem}}. \quad (4.14)$$

Waarin:

$\Delta x = x_2 - x_1$ : afstandverschil tussen twee afstandspunten [m]

$v_{gem} = \frac{v_2 + v_1}{2}$ : gemiddelde snelheid tussen twee afstandspunten [m/s]

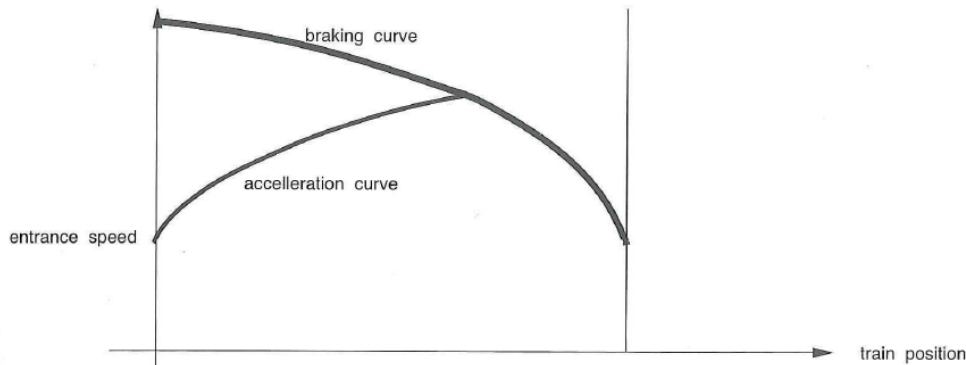
$\Delta t$ : tijdsverschil tussen twee afstandspunten [s].

De totale verstreken tijd ( $T$ ) kan nu als volgt worden bepaald met behulp van  $j = 0, 1, \dots, n$ :

$$T = \sum_{j=0}^n \Delta t. \quad (4.15)$$



Tevens is het van belang dat het model afhankelijk van de totale afstand tussen twee punten ook rekening houdt met de juiste hantering van de omslagpunten. Zo dient het model bij een lange afstand (beschikbare afstand die groter is dan de benodigde afstand voor acceleratie tot maximale snelheid en remafstand) ruimte te hebben voor ‘cruisen’. Aan de andere kant dient het algoritme bij zeer korte afstanden de acceleratiecurve over te laten gaan in de remcurve, zie Figuur 4-3.



**Figuur 4-3: acceleratiecurve gaat direct over in remcurve (Brünger & Dahlhaus, 2008, p. 69)**

Bij de tijdoptimale rijstrategie wordt allereerst een recht baanvak zonder hellingen en tunnels van 17 km aangenomen met een maximum baanvaknelheid van 140 km/h. Vervolgens wordt het model opgebouwd, om zo inzicht te krijgen in de manier waarop het model werkt. Uitgangspunt voor materieel wordt VIRM 1 IV genomen, omdat deze data ook beschikbaar is bij de TU Delft in OpenTrack<sup>17</sup>, waarmee het model later mogelijk vergeleken kan worden. Daarnaast is gebleken dat van VIRM 1 IV gegevens van Lloyd’s Register Rail Europe B.V. beschikbaar zijn over de verschillende rijregimes. Op die manier kan dus getoetst worden of het model voor de verschillende rijregimes goed werkt. In bijlage 10.2 is te zien hoe de differentiaalvergelijking voor de tijdoptimale rijstrategie in MATLAB verwerkt is.

### *Hellingen, bogen en tunnels*

Indien het baanvak hellingen, bogen en/of tunnels bevat zal de berekening anders verlopen. Dit zal vooral anders zijn op punten waar de trein een constante snelheid heeft, oftewel de trein aan het ‘cruisen’ is. Bij stijgende hellingen, bogen en tunnels zal de snelheid afnemen indien de trein geen extra trekkracht levert, doordat de baanweerstand en daarmee de totale weerstand toeneemt en dus de resulterende kracht en acceleratie afnemen. Indien mogelijk zal de trein dan extra trekkracht leveren om ervoor te zorgen dat de trein de constante snelheid behoudt. De trein zal dus een zodanige trekkracht gaan leveren, zodat de trekkrachtoverschot gelijk is aan 0 en de gewenste snelheid wordt behouden:

$$F_0(x, v) = F_{Tr}(v) - W_{trein}(v) - W_{baan}(x) = 0 \quad 0 \leq F_{Tr}(v) \leq F_{Tr,max}(v). \quad (4.16)$$

De voorwaarde is echter wel dat de trekkracht kleiner is dan de maximale mogelijke trekkracht van de trein gegeven de snelheid. In principe is de invloed van bogen relatief klein ten opzichte van de invloed van hellingen. Daarom wordt deze weerstand in de literatuur veelal niet meegenomen (Brünger & Dahlhaus, 2008). Ook het effect van tunnels wordt veelal verwaarloosd, omdat daar geen algemene formule van bekend is. In dit onderzoek worden deze effecten echter, indien mogelijk, meegenomen.

<sup>17</sup> OpenTrack is een spoorweg netwerk simulatieprogramma (Huerlimann & Nash, 2010). Het programma voert op basis van de materieeleigenschappen, infrastructuur en dienstregeling simulaties uit door middel van animaties. De resultaten van de simulatie leveren onder andere verschillende diagrammen (als snelheidsprofielen, tijd-weg diagrammen en spoorbezettingsdiagrammen) en statistische informatie.

Bij een neergaande helling zal de trekkracht van de trein verlaagd moeten worden, omdat anders de snelheid niet constant blijft. Opnieuw geldt hier formule (4.16). Voorwaarde is dan wel dat de trekkracht niet kleiner kan zijn dan 0.

Het kan echter gebeuren dat de hellingen zeer steil zijn. In dit geval zal bij een steile opgaande helling<sup>18</sup> de snelheid afnemen, omdat de trekkracht niet groter kan zijn dan de maximale trekkracht. In dit geval is de trekkrachtoverschot in formule (4.16) negatief en zal de trein dus afremmen (A. Albrecht, Howlett, Pudney, & Xuan, 2011; Howlett et al., 2009). Bij steile neergaande hellingen<sup>19</sup> zal de trein mogelijk moeten gaan remmen, om te voorkomen dat de maximaal toegestane snelheid wordt overschreden. In dit geval geldt dus:

$$F_0(x, v) = -F_{rem}(v) - W_{trein}(v) + W_{baan}(x) = 0. \quad (4.17)$$

Ook tijdens de acceleratie- en remfase kunnen hellingen, bogen en tunnels het tractie- en remgedrag van de trein beïnvloeden. Bij opgaande hellingen, bogen en tunnels zal de acceleratie langzamer gaan dan een vlak terrein zonder bogen en/of tunnels. Eveneens zal de geleverde tractie minder zijn als er sprake is van een neergaande helling. Een neergaande helling bij een remfase betekent extra hard remmen, terwijl een opgaande helling mogelijk kan betekenen dat een trein pas later de remming in moet zetten.

### **Conclusie tijdoptimale rijstrategie**

Bij de tijdoptimale strategie gaat het er dus om dat een trein zo snel mogelijk van A naar B rijdt. Daarbij bestaat deze strategie uit een acceleratie, rem en een mogelijke 'cruising' fase of kruisfase. De toepassing van de 'cruising' fase is afhankelijk van de beschikbare afstand en de afstand die nodig is om tot maximumsnelheid te accelereren en vervolgens tot stilstand te remmen. Allereerst wordt het effect zonder baanweerstand onderzocht, waarbij de trein met behulp van de trekkracht de treinweerstand dient te overwinnen om snelheid te maken en te behouden en met behulp van de remkracht dient te remmen. Daarna worden de effecten van hellingen, bogen en tunnels onderzocht, die zorgen voor extra weerstanden en waarmee het model meer de realiteit weergeeft. In beide gevallen gaat het erom dat het model de differentiaalvergelijking (formule (4.10)) wordt opgelost die de snelheid over de afstand omschrijft.

### **4.3.2 Energieoptimaal**

Nu vanuit de algemene theorie bekend is hoe een trein zo snel mogelijk van A naar B kan rijden (tijdoptimaal), kan worden begonnen naar de energieoptimale of energiezuinige rijstrategie. In deze paragraaf wordt eerst de energieoptimale rijstrategie wiskundig afgeleid. Daarna wordt besproken hoe het algoritme in MATLAB is verwerkt. Tot slot wordt van de energiezuinige rijstrategie een conclusie weergegeven.

### **Wiskundig herleiden energieoptimale rijstrategie**

Bij de energieoptimale rijstrategie zal het er om gaan om de mechanische energie, die nodig is om een trein in beweging te brengen, te minimaliseren (zie formule (2.1)). Mechanische energie is nodig in geval van accelereren en 'cruisen'. Tijdens het uitrollen is de tractie uitgeschakeld en verbruikt de trein in principe geen energie. Tot slot kan er energie gewonnen worden, indien de trein de beschikking heeft over recupererende remmen (elektrodynamisch (ED)), waarbij de trein op de motor remt en daarmee elektriciteit terugwint en terug levert aan de bovenleiding. In Nederland is er beperkt materieel dat gebruik kan maken van recupererend remmen. Het

---

<sup>18</sup> Een opgaande helling is steil als de snelheid niet gelijk of boven het gewenste niveau gehouden kan worden met maximaal vermogen (Howlett, 2000, p. 66; Howlett & Pudney, 1995, p. 251 & 287).

<sup>19</sup> Een neergaande helling is steil als de snelheid niet op of onder de gewenste snelheid gehouden kan worden tijdens het 'cruisen' of uitrollen (Howlett, 2000, p. 66; Howlett & Pudney, 1995, p. 251 & 287).

materieel dat dit kan zijn DD-AR+mDDM, NID/DDZ, SLT en VIRM. De recuperatie die echter vanuit DD-AR+mDDM en NID/DDZ leverbaar is, is vrij nihil. Bij SLT en VIRM is deze terug gewonnen energie groter. Recupererend remmen is vooral interessant bij gebieden waarbij de afstand tussen stations vrij klein is en de trein al vrij snel moet remmen, bijvoorbeeld binnen de Randstad. De reden hiertoe is dat er weinig speling is om uit te rollen. Bij grotere afstanden is er voor de trein meer ruimte om uit te gaan rollen en blijft er minder over om recupererend te gaan remmen. Ook in heuvel- of berglandschap zijn de baten van het toepassen van recupererend remmen groter.

Om het model te versimpelen wordt aangenomen dat remmen niet bijdraagt aan het energieverbruik (geen baten vanuit recupererend remmen). Deze aanname is mogelijk doordat de stations op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen redelijk ver uit elkaar liggen om uit te gaan rollen met de trein. Ook is de winst uit de retourstroom vanuit recupererend remmen door de lage bovenleidingspanning niet zo groot als in landen als Zweden of Zwitserland en is er niet echt sprake van sterk heuvelachtig gebied. Bovendien is het vanuit de optimale besturingstheorie gewenst om te remmen met maximale (service) remkracht (veelal toepassen van andere remmen als pneumatisch en magneet naast de ED), omdat de trein daardoor met de gegeven rijtijd tot een lagere snelheid kan accelereren en dus minder energie nodig heeft (T. Albrecht, 2008). Daardoor blijft er wel minder tijd over om energie terug te winnen door middel van het toepassen van enkel de ED-remmen. Ook blijkt uit de literatuur dat de kosten voor remmen veelal niet worden meegenomen in de energieberekeningen van de optimale rijstrategie (Howlett et al., 2009).

De theorie die hieronder volgt is opnieuw ontleend aan hoofdstuk vijf uit het boek 'Railway Timetable & Traffic' door T. Albrecht (2008, pp. 83-89), de collegesheets van het vak 'CT5803-09 Railway Traffic Management' van Goverde (2011, pp. 3-10), het artikel van Howlett, Pudney en Vu (2009, pp. 2693-2695), het artikel van Liu en Golovitcher (2003, pp. 921-924) en het artikel van Su, Li, Tang en Gao (2012, pp. 2-5). Voor het oplossen van vergelijking (2.1) en differentiaalvergelijking (4.10) wordt er gebruik gemaakt van de optimale besturingstheorie ('optimal control theory'). Daarbij gaat het erom om voor een bepaald probleem een besturingsmechanisme te vinden zodat een bepaalde doelfunctie wordt geoptimaliseerd. Het besturingsprobleem bestaat daarbij uit een geoptimaliseerde kostenfunctie die een functie is van toestands- en besturingsvariabelen. Het traject van de geoptimaliseerde toestandsvariabelen die de kostenfunctie minimaliseert wordt beschreven door een set van differentiaalvergelijkingen. Door middel van toepassing van Pontryagin's maximum principe of door middel van het oplossen van de Hamilton-Jacobi-Bellman vergelijking kan de kostenfunctie worden geminimaliseerd. Voor de toepassing op het gebied van rijdende treinen zijn de tractie- en de remkracht de besturingsparameters en zijn de treinpositie en de snelheid de (tijdsafhankelijke) toestandsvariabelen. Daarnaast wordt het probleem beperkt door opgelegde randvoorwaarden, bijvoorbeeld maximale baanvaksnelheid, begintijd, eindtijd, beginsnelheid en eindsnelheid. Daarbij wordt hier gebruik gemaakt van het principe van Pontryagin, omdat hiermee grote problemen rondom dimensionaliteit die ontstaan bij dynamisch programmeren ('dynamic programming') worden vermeden. Tevens wordt in de literatuur ook veelal de voorkeur gegeven aan het Pontryagin principe bij het toepassen van optimale treinbesturing, omdat daaruit meteen de optimale rijregimes volgen (T. Albrecht, 2008; Goverde, 2011; Howlett et al., 2009; Liu & Golovitcher, 2003; Su et al., 2012). In bijlage 11 is het maximum principe van Pontryagin te vinden dat in dit onderzoek is toegepast.

Met behulp van formule (4.10) wordt de optimale treinbesturing bepaald. Daarbij dient de optimale besturing gevonden te worden die een trein van station A naar station B laat rijden gegeven de beschikbare rijtijd  $T$  met zo min mogelijk tractie-energie gebruik. Hierbij wordt aangenomen dat het remmen van de trein geen energie kost en ook geen energie oplevert. Het trekkrachtdeel wordt als volgt gedefinieerd:

$$u^+(x) = \max(u(x), 0). \quad (4.18)$$

Het doel is dus om de mechanische energie  $E_{mech}$  te minimaliseren:

$$\min_u E_{mech}(v, u) = \int_0^x u^+(x) dx. \quad (4.19)$$

Onderworpen aan formules (4.3) en (4.10), randvoorwaarden (4.6), (4.7) en (4.8) en aan de randvoorwaarden ( $v_{max}$  is de maximaal toegestane snelheid):

$$t(0) = t_0, \quad t(X) = T, \quad (4.20)$$

$$v(0) = v_0, \quad v(X) = v_X, \quad (4.21)$$

$$v(x) \in [0, v_{max}(x)]. \quad (4.22)$$

Vervolgens dient de optimale besturingsvariabele  $\hat{u}(x)$  volgens het maximum principe van Pontryagin de Hamiltoniaan of Hamilton functie te maximaliseren. Deze Hamiltoniaan wordt als volgt gedefinieerd (afgeleid vanuit bijlage 11, alleen nu is de toestandsvariabele gedifferentieerd naar de afstand in plaats van de tijd):

$$\begin{aligned} H(v, t, u, \lambda, \phi) &= -u^+(x) + \lambda(x) \cdot \left( \frac{u(x) - r(x, v)}{v} \right) + \phi(x) \cdot \frac{1}{v}, \\ &= -u^+(x) + \lambda(x) \cdot \left( \frac{u(x)}{v} - \frac{r(x, v)}{v} \right) + \frac{\phi(x)}{v}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Waarin  $\lambda(x)$  de eerste co-toestand variabele en  $\phi(x)$  de tweede co-toestand variabele is. De differentiaalvergelijking voor de co-toestand variabele  $\lambda(x)$  is:

$$\frac{d\lambda}{dx} = -\frac{\partial H}{\partial v}(v, t, \hat{u}, \lambda, \phi). \quad (4.24)$$

Formule (4.24) wordt nu verder uitgeschreven:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{dx} &= -\frac{\partial H}{\partial v}(v, t, \hat{u}, \lambda, \phi) = -\left( \lambda(x) \cdot \left( -\frac{u(x)}{v^2} - \left( \frac{\partial r}{\partial v}(x, v) - \frac{r(x, v)}{v^2} \right) \right) - \frac{\phi(x)}{v^2} \right), \\ &= -\lambda(x) \cdot \left( -\frac{u(x)}{v^2} - \frac{\partial r}{\partial v}(x, v) + \frac{r(x, v)}{v^2} \right) + \frac{\phi(x)}{v^2}, \\ &= \lambda(x) \cdot \left( \frac{u(x)}{v^2} + \frac{\partial r}{\partial v}(x, v) - \frac{r(x, v)}{v} \right) + \frac{\phi(x)}{v^2}, \\ &= \frac{\lambda(x) \cdot u(x) + \lambda(x) \cdot v \cdot \frac{\partial r}{\partial v}(x, v) - \lambda(x) \cdot r(x, v) + \phi(x)}{v^2}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

De differentiaalvergelijking van de tweede co-toestandvariabele  $\phi(x)$  luidt:

$$\frac{d\phi}{dx} = -\frac{\partial H}{\partial t}(v, t, \hat{u}, \lambda, \phi) = 0. \quad (4.26)$$

Merk op dat formule (4.26) niet expliciet van de tijd  $t$  afhangt en dus is de partiële afgeleide naar  $t$  gelijk aan nul. Hieruit volgt dat  $\phi(x) = \phi$  met  $\phi$  een constante.

Nu wordt met de optimale besturingsvariabele  $\hat{u}(x)$  de Hamilton functie gemaximaliseerd:

$$\max_{\hat{u}} H(v, t, u, \lambda, \phi) = \max_{\hat{u}} \left( -u^+(x) + \frac{\lambda(x) \cdot u(x)}{v} - \frac{\lambda(x) \cdot r(x, v)}{v} + \frac{\phi}{v} \right). \quad (4.27)$$

De gemaximaliseerde Hamilton functie (formule (4.27)) wordt vervolgens verdeeld in twee regimes afhankelijk van de besturingsvariabele  $u(v)$ :

$$H = \begin{cases} -u(x) + \frac{\lambda(x) \cdot u(x)}{v} - \frac{\lambda(x) \cdot r(x, v)}{v} + \frac{\phi}{v} & \text{tractieregime als } u(x) \geq 0 \\ \frac{\lambda(x) \cdot u(x)}{v} - \frac{\lambda(x) \cdot r(x, v)}{v} + \frac{\phi}{v} & \text{remregime als } u(x) < 0. \end{cases}$$

Oftewel:

$$H = \begin{cases} u(x) \cdot \left( \frac{\lambda(x)}{v} - 1 \right) - \frac{\lambda(x) \cdot r(x, v)}{v} + \frac{\phi}{v} & \text{als } u(x) \geq 0 \\ u(x) \cdot \frac{\lambda(x)}{v} - \frac{\lambda(x) \cdot r(x, v)}{v} + \frac{\phi}{v} & \text{als } u(x) < 0. \end{cases} \quad (4.28)$$

De Hamiltoniaan is dus een lineaire functie in  $u$  voor zowel positieve als negatieve waarden van  $u$ . De coëfficiënt van  $u$  is de schakelfunctie waarvan het teken bepaalt welke waarde  $\hat{u}$  moet hebben om de Hamiltoniaan te maximaliseren. Voor niet-negatieve waarde van  $u$  is de schakelfunctie  $\left(\frac{\lambda(x)}{v} - 1\right)$  en voor negatieve  $u$  is het  $\frac{\lambda(x)}{v}$ . In de situaties waar de schakelfunctie nul is ( $\lambda = v$  en  $\lambda = 0$  respectievelijk) gelden singuliere oplossingen die overeen komen met een 'cruising' fase. De situatie  $\lambda = 0$  kan niet voor komen over een interval groter dan een punt zodat deze singuliere oplossing vervalst. Daarop volgt de volgende optimale besturing  $\hat{u}(x)$  die de Hamiltoniaan maximaliseert:

$$\hat{u}(x) = \begin{cases} u_{max}(x) & \text{voor } \lambda(x) > v(x) \quad \text{Maximale acceleratie} \\ [0, u_{max}(x)] & \text{voor } \lambda(x) = v(x) \quad \text{Cruising} \\ 0 & \text{voor } \lambda(x) < v(x) \quad \text{Uitrollen} \\ -u_{min}(x) & \text{voor } \lambda(x) \leq 0 \quad \text{Remmen.} \end{cases} \quad (4.29)$$

De optimale rijstrategie bestaat dus uit vier rijregimes, afgeleid uit formule (4.29):

- Maximaal accelereren;
- 'Cruising' (constante snelheid);
- Uitrollen (geen tractie gebruiken);
- Maximale service remming.

Voordat dit allemaal in MATLAB geïmplementeerd kan worden, dient eerst formule (4.25) uitgeschreven te worden. Daarbij gaat het specifiek om het bepalen van de functie  $\frac{\partial r}{\partial v}(x, v)$ .

Daarvoor dient formule (4.9) gedifferentieerd worden naar de snelheid  $v$ . Dit leidt tot de volgende formule:

$$\frac{\partial r}{\partial v}(x, v) = \frac{w_2 + 2 \cdot w_3 \cdot v}{m_{trein}}. \quad (4.30)$$

Nu is het mogelijk om de optimale 'cruising' snelheid of kruissnelheid te bepalen. Hierbij geldt dat  $\lambda(x) = v(x) = v_{cruis}$  (waarbij  $v_{cruis}$  de optimale 'cruising' snelheid is) volgens formule (4.29) en geldt dat  $\lambda'(x) = v'(x)$ . Hieruit volgt:

$$\frac{v_{cruis} \cdot u(x) + v_{cruis}^2 \cdot \frac{\partial r}{\partial v}(x, v_{cruis}) - v_{cruis} \cdot r(x, v_{cruis}) + \phi}{v_{cruis}^2} = \frac{u(x) - r(x, v_{cruis})}{v_{cruis}}. \quad (4.31)$$

Vergelijking (4.31) wordt als volgt verder uitgeschreven:

$$\phi = -v_{cruis}^2 \cdot \frac{\partial r}{\partial v}(x, v_{cruis}). \quad (4.32)$$

Deze bovenstaande vergelijking is echter nog niet oplosbaar, omdat er twee onbekenden zijn ( $v_{cruis}$  en  $\phi$ ) en slechts één vergelijking. Vanuit het maximum principe van Pontryagin is bekend dat de Hamiltoniaan over het optimale traject constant  $C_0$  is voor  $u(x) > 0$ . Dit leidt tot de volgende vergelijking voor de Hamiltoniaan (tractie regime):

$$H(v, t, u, \lambda, \phi) = -u(x) + \frac{\lambda(x) \cdot u(x)}{v} - \frac{\lambda(x) \cdot r(x, v)}{v} + \frac{\phi}{v} = C_0. \quad (4.33)$$

De optimale 'cruising' snelheid  $v_{cruis}$  kan als volgt bepaald. Allereerst wordt formule (4.33) herschreven en numeriek opgelost:

$$\phi = v \cdot C_0 + v \cdot u(x) - \lambda(x) \cdot u(x) + \lambda(x) \cdot r(x, v). \quad (4.34)$$

In de 'cruising' fase geldt voor vergelijking (4.34):

$$\begin{aligned} \phi &= v_{cruis} \cdot C_0 + v_{cruis} \cdot u(x) - v_{cruis} \cdot u(x) + v_{cruis} \cdot r(x, v_{cruis}), \\ &= v_{cruis} \cdot C_0 + v_{cruis} \cdot r(x, v_{cruis}). \end{aligned} \quad (4.35)$$

Nu kunnen vergelijking (4.32) en vergelijking (4.35) aan elkaar gelijk worden gesteld:

$$\begin{aligned} -v_{cruis}^2 \cdot \frac{\partial r}{\partial v}(x, v_{cruis}) &= v_{cruis} \cdot C_0 + v_{cruis} \cdot r(x, v_{cruis}), \\ C_0 &= -v_{cruis} \cdot \frac{\partial r}{\partial v}(x, v_{cruis}) - r(x, v_{cruis}). \end{aligned} \quad (4.36)$$

Daaruit volgt zowel de waarde voor  $\phi$  die constant is op het optimale traject als voor de constante  $C_0$  van de Hamiltoniaan. Tevens blijkt uit formule (4.30) dat  $\frac{\partial r}{\partial v}(x, v) > 0$  en dus geldt voor formule (4.32) dat  $\phi < 0$  en voor geldt voor formule (4.34) dat  $C_0 < 0$ . Deze gegevens



worden vervolgens gebruikt om formule (4.32) op te lossen, waaruit de optimale kruissnelheid  $v_{cruis}$  volgt.

### Algoritme energiezuinige rijstrategie

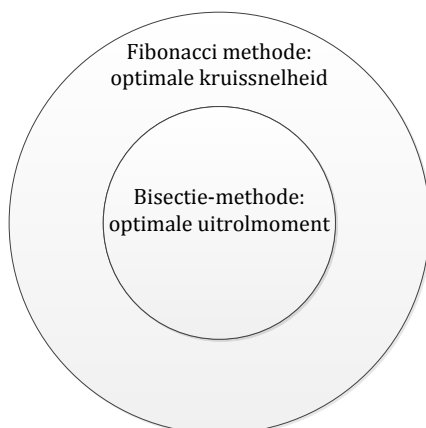
De volgende stap die genomen wordt is het bepalen van de omslagpunten tussen de rijregimes en de optimale kruissnelheid. Vanuit de theorie is bekend hoe de oplossing (de optimale rijstrategie) er uit ziet (formule (4.29)). Vergelijking (4.10) is de kern van het ontwikkelde algoritme in MATLAB en bepaalt het snelheidsprofiel over de afstand. De belangrijkste formules die gebruikt worden binnen het algoritme zijn te vinden in Figuur 4-4.

$$\frac{dv}{dx} = \frac{u(v) - r(x, v)}{v}$$

$$\hat{u}(x) = \begin{cases} u_{max}(x) & \text{voor } \lambda(x) > v(x) & \text{Maximale acceleratie} \\ [0, u_{max}(x)] & \text{voor } \lambda(x) = v(x) & \text{Cruising} \\ 0 & \text{voor } \lambda(x) < v(x) & \text{Uitrollen} \\ -u_{min}(x) & \text{voor } \lambda(x) \leq 0 & \text{Remmen} \end{cases}$$

**Figuur 4-4: belangrijkste formules algoritme (boven: formule (4.10) en onder: formule (4.29))**

Met behulp van deze formules bepaalt het algoritme per sectie (met een constante maximaal toegestane snelheid) het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid. Dit gebeurt in twee schillen (zie Figuur 4-5), waarbij de uiteindelijke doelfunctie is om het tractie-energieverbruik te minimaliseren. Allereerst berekent de binnenste schil van het algoritme met behulp van de bisectie-methode het optimale uitrolmoment. Hiervoor wordt het uitrolmoment als variabele ingesteld en is de kruissnelheid gegeven. De doelfunctie is om het nulpunt te vinden in de benodigde rijtijd gegeven het uitrolmoment en de gegeven rijtijd vanuit de dienstregeling. Vervolgens wordt met behulp van de Fibonacci functie (zoekalgoritme) de optimale kruissnelheid bepaald in de buitenste schil van het algoritme. Hierbij is de doelfunctie het minimaliseren van het energieverbruik binnen de gegeven tijd vanuit de dienstregeling en de variabele is de kruissnelheid. Samenvattend bepaalt het algoritme voor continu per kruissnelheid het optimale uitrolmoment gegeven de beschikbare rijtijdspeling en zoekt vervolgens de optimale kruissnelheid waarmee het tractie-energieverbruik geminimaliseerd wordt. De werking van de methode alsmede de implementatie ervan in MATLAB staat uitvoerig omschreven in bijlage 10.3. Daarbij is in de bijlage 10.4 ook uitleg te vinden van de opbouw van de MATLAB files.



**Figuur 4-5: overzicht werking algoritme optimale treinbesturing**

### **Conclusie energieoptimaal**

Geconcludeerd wordt dat het bepalen van de energiezuinige of energieoptimale rijstrategie een stuk ingewikkelder is dan de tijdoptimale rijstrategie. Het doel bij de energieoptimale rijstrategie is om met zo min mogelijk tractie-energie en gegeven de tijd van de dienstregeling van beginpunt naar eindpunt te reizen. Met behulp van de optimale besturingstheorie en het maximaliseringsprincipe van Pontryagin is het mogelijk om de optimale rijregimes en de overgang daartussen wiskundig te definiëren (acceleratie, 'cruising', uitrollen en remmen). In MATLAB is een algoritme opgesteld dat de energieoptimale rijstrategie berekent, gebaseerd op het feit dat bekend is hoe de oplossing van de optimale rijstrategie eruit ziet. De twee variabelen in het algoritme zijn het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid per sectie. Met behulp van de bisectie-methode wordt het optimale uitrolmoment bepaald en het Fibonacci zoekalgoritme berekent de optimale kruissnelheid. In paragraaf 5.2.2 wordt aangetoond dat het algoritme in het model de optimale rijstrategie volgens de theorie goed benaderd.

### **4.4 Beschrijving pilot NS Reizigers**

Met de implementatie van energiezuinig rijden wordt het beschikbaar hebben van nauwkeurige referentietijden steeds belangrijker. Immers, de doorkomst- en aankomsttijden worden gebruikt door een machinist om de voortgang ten opzichte van het geplande tijdspad precies te monitoren. Op deze manier kan optimaal punctueel en energiezuinig gereden worden.

De aangeboden tijden in de huidige dienstregeling zijn daar eigenlijk te grofmazig voor, omdat hier het gebruik van afrondingen op hele minuten worden toegepast. Daarom is onderzocht hoe de stap naar kwart minuten gemaakt kan worden. Het idee van een dienstregeling aanbieden in kwart minuten tijden voor machinisten is ontstaan bij het werkbezoek van een delegatie van NS Reizigers en ProRail aan de Japanse spoorwegen. Een kwart minuten dienstregeling houdt in dat de dienstregeling aangeboden wordt op 15 seconden in plaats van hele minuten. Daarbij worden de klantijden (aankomst- en vertrektijden) op stations gelijk gehouden. Voor het aanbieden van een dienstkaartje met daarop een dienstregeling in kwart minuten wordt gebruik gemaakt van een eigen ontworpen rekenspreadsheet in Excel. Deze spreadsheet rekent aan de hand van een groot aantal planregels de Donna rijtijden zelf om naar een dienstkaartje met daarop een dienstregeling in kwart minuten.

Het doel van de pilot is het onderzoeken of kleinere, nauwkeurigere, tijdseenheden (kwart minuten) voor machinisten leiden tot een heldere en meer robuuste dienstregeling en betere resultaten in termen van energiezuinig rijden dan de huidige dienstregeling in hele minuten.

De volgende onderzoeksvragen zijn er voor de pilot opgesteld:

1. Is het mogelijk om een eenduidige tijdreeks voor de dienstregeling van de machinist te publiceren die past bij de klantijd (spoorboekje 2012)?
2. Kan de machinist met de nieuw aangeboden dienstregeling omgaan?
3. Komen er vanuit de pilot vragen naar voren die onderzoek naar nog kleinere tijdseenheden dan 15 seconden rechtvaardigen?
4. Leidt het aanbieden van tijdreeksen in kwart minuten tot een betere punctualiteit, grotere robuustheid van de dienstregeling en kleinere spreiding per dienstregelpunt?
5. Welke effecten zijn er bij het aanbieden van andere tijdreeksen in de dienstregeling op de omliggende treinen van de pilotserie?
6. Welke effecten heeft het aanbieden van kleinere tijdsreeksen op de zomerdienstregeling en op de normale dienstregeling?
7. Wat is het resultaat van de pilot ten aanzien van energiebesparing?

De pilot strekt zich tot slot uit op de sprinter (SPR) serie 7400 op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen. De pilot wordt uitgevoerd in augustus tot en met november in 2012. De machinisten die deelnemen in de steekproef dienen aselect gekozen te worden, in ieder geval zodanig de steekproef representatief is voor alle machinisten in Nederland. Het aantal machinisten dat nodig is voor de pilot, zullen er minimaal 20 zijn en maximaal 60 van de standplaats Utrecht. In totaal zijn er 30 machinisten voor de pilot geselecteerd.

De resultaten van de pilot voor de onderzoeksvragen worden verkregen door middel van gesprekken met machinisten en feedback van hen, analyses van het energieverbruik van de treinnummers door middel van de methode van relatief energieverbruik en bandbreedtegrafieken van treinnummers en omliggende treinen alsmede aankomst en vertrektijden op stations voor de punctualiteit in de uitvoering en robuustheid van de dienstregeling.

#### 4.5 Beschrijving case studie

Het model dat in dit onderzoek ontwikkeld wordt zal worden toegepast in de praktijk. Dit zal gebeuren in combinatie met de pilot voor NS Reizigers. Tijdens deze pilot wordt, zoals vermeld in de vorige paragraaf, onderzoek gedaan naar de effecten van een kwart minuten dienstregeling. Het model uit dit onderzoek zal met de gegeven dienstregeling met betrekking tot aankomst- en vertrektijden (klanttijden) de energiezuinige rijstrategie bepalen vanuit de optimale besturingstheorie. De output van dit model levert voor de case studie vervolgens een dienstkaartje op in kwart minuten, dat daarna in de Railpockets van machinisten wordt gebracht (digitaal). Voor machinisten die de pilot rijden betekent dit dat zij als variant binnen de pilot het dienstkaartje kunnen rijden wat volgens de optimale besturingstheorie de energiezuinigste rijstijl oplevert. Uiteindelijk is gezien de beperkte tijd enkel eenmalig een meting verricht in de praktijk van het model. Daarbij is gebruik gemaakt van een eigen ontworpen papieren dienstkaartje.

Het doel van deze case studie is om te kijken wat de gevolgen zijn van het theoretische bepaalde optimum in de praktijk. Tevens wordt ook het energieverbruik van deze methode vergeleken met die van de UZI-methode. Daaruit blijkt ook hoe goed de UZI-methode op dit moment is. In dit geval betekent het wel dat de dienstregeling die vanuit het model komt statisch is (dienstkaartje), maar in principe is het mogelijk om het model aan te passen (uit te breiden) en ervoor te zorgen dat het rekening houdt met de actuele omstandigheden (dynamisch model). Dit is mogelijk interessant onderwerp voor een vervolgonderzoek.

## 5 Resultaten

Tijdens de modelbouw worden stap voor stap resultaten gegeneerd. De tussenresultaten worden gebruikt om te onderzoeken of het model werkt zoals dat verwacht is. Daarnaast worden de uiteindelijke modelresultaten gebruikt voor de analyse van de energieoptimale rijstrategie op het baanvak van de pilot en voor de vergelijking tussen de energieoptimale rijstrategie en de UZI-methode van NS Reizigers. De resultaten worden in dit hoofdstuk behandeld. De uitkomsten van de kalibratie komen in paragraaf 5.1 aan bod. Paragraaf 5.2 behandelt de resultaten van de verificatie. Vervolgens wordt de validatie van het model in paragraaf 5.3 uiteengezet. De pilot voor NS Reizigers brengt ook resultaten met zich mee, die worden toegelicht in paragraaf 5.4. Tot slot komen in paragraaf 5.5 de resultaten van de case studie aan bod, die van belang zijn voor de schakeling tussen het theoretische model en de praktijk.

### 5.1 Kalibratie

Bij kalibratie of ijking worden de parameterwaarden van het model zodanig aangepast, zodat het model een realistische output genereert. De kalibratie gebeurt aan de hand van beschikbare gegevens van materieeloverzichten vanuit Lloyd's Register Rail Europe B.V. Aan de hand daarvan wordt na een grondige analyse een conclusie getrokken. De inputdata van het materieel is afkomstig van TreinPlein en is te vinden in bijlage 8 (NSR/Lloyd's, 2012).

#### 5.1.1 Analyse model vs. materieelgegevens Lloyd's Register Rail

Op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen rijdt voornamelijk het materieeltype SLT. Vanuit de planning en de praktijk is bekend dat dit SLT IV (4 bakken) of SLT VI (6 bakken) is. In het model is uitgegaan van SLT VI, omdat dit materieel de slechtste prestaties levert van de twee (meest ongunstige situatie). SLT VI heeft namelijk 2 tractie installaties per treinstel, terwijl SLT IV 1,5 tractie installaties heeft.

Het probleem is echter dat er geen data beschikbaar is van SLT waarmee het model gekalibreerd kan worden. Om toch te onderzoeken of de juiste formules en parameters gebruik worden, is gekeken naar het materieel waarvan wel data beschikbaar is. De ijking is daarom uitgevoerd aan de hand van bestaande gegevens van materieel van Lloyd's Register Rail Europe B.V. Lloyd's Register Rail blijkt namelijk in opdracht van NS Reizigers in 2009 enkele energieberekeningen te hebben gedaan voor de verschillende rijregimes voor verschillend type materieel. Zo bevat het geleverde Excel bestand gegevens per rijregime (acceleratie, 'cruisen', uitrollen en remmen) per snelheid (stapjes van 1 km/h) van onder andere de trekkracht, de treinweerstand, de versnelling, de afgelegde afstand, de tijdsduur en het energieverbruik. De data in het Excel bestand van Lloyd's Register Rail bevat enkel gegevens van de materieeltypes VIRM IV/VI, ICM (*Intercitymaterieel*) III/IV en SGM II/III gegevens. Gekozen is om VIRM (1) IV te vergelijken. De reden hiervan is dat hiervan ook data beschikbaar is in OpenTrack op de TU Delft, waarmee het model mogelijk ook vergeleken kan worden. Bovendien heeft VIRM IV zeer goede uitrolkarakteristieken. Hiermee is het mogelijk om te onderzoeken of de juiste parameters en formules in het model zijn toegepast. Immers worden voor SLT dezelfde formules als voor VIRM gebruikt, enkel de parameters zijn anders.

Voor zowel de gegevens van Lloyd's Register Rail als voor het model is uitgegaan van dezelfde invoer. Zo zijn hellingen, boogstralen en tunnels niet meegenomen bij de resultaten van Lloyd's Register Rail. Daarom is bij de vergelijking ook in het model geen rekening gehouden met heuvels, bogen en tunnels. De maximale baanvaksnelheid is aangenomen op 140 km/h. In de resultaten zijn de trekkrachtgrafiek, de treinweerstandgrafiek, de snelheid, de afgelegde afstand, de tijdsduur en het energieverbruik met elkaar vergeleken.

De overeenkomsten en verschillen tussen het model en de gegevens van Lloyd's Register Rail Europe B.V. zijn grafisch duidelijk te zien. Allereerst is in Figuur 5-1 (linksboven) de trekkrachtgrafiek te zien die voor het model is gebruikt. Daaruit valt af te leiden dat de functie heel erg goed door de gegeven datapunten van het materieel geleverd uit TreinPlein past (NSR/Lloyd's, 2012). Vervolgens is de trekkrachtcurve vergeleken met de resultaten vanuit de gegevens van de Excel sheet van Lloyd's Register Rail. Uit Figuur 5-1 (rechtsboven) blijkt dat de datapunten in het hyperbolische gedeelte van de grafiek iets boven de datapunten vanuit de gegevens van Lloyd's Register Rail liggen. Tevens begint deze hyperbolische fase ook iets later dan de gegevens van Lloyd's Register Rail. De afwijking bij 140 km/h bedraagt 7,95% ten opzichte van de gegevens van Lloyd's Register Rail. Onderzocht is wat de oorzaak hiervan is. Daarbij is door de datapunten van Lloyd's Register Rail een regressielijn geschat. De resultaten van de bepaling van de coëfficiënten van de grafiek zijn te vinden in Tabel 5-1. Daaruit blijkt dat de coëfficiënten voor de trekkracht exact gelijk zijn. Het verschil wordt veroorzaakt door het feit dat de datapunten vanuit TreinPlein gegeven worden per stapgrootte van 2 km/h, terwijl de gegevens van Lloyd's Register Rail per 1 km/h worden gegeven. Het gevolg is dat de gegevens van Lloyd's Register Rail aangeven dat de trein tot en met 39 km/h een constante trekkracht heeft, terwijl de gegevens van TreinPlein de constante snelheid geven tot en met 38 km/h. De nauwkeurigheid van de gegevens van Lloyd's Register Rail is groter, door de kleinere stapgrootte in snelheid.

Ten tweede blijkt uit Figuur 5-1 (linksonder) dat de treinweerstand in het model ook iets hoger is dan vanuit de gegevens van Lloyd's Register Rail blijkt. De afwijking van de treinweerstand bedraagt 2,08% bij 140 km/h ten opzichte van de gegevens van Lloyd's Register Rail.

In Figuur 5-2 is de vergelijking gemaakt voor de acceleratiefase. Hierin blijkt duidelijk dat de afstand, tijd, snelheid en energieverbruik vrij goed overeen komen met de gegevens van Lloyd's Register Rail. De afgelegde afstand afwijking van het model ten opzichte van die van Lloyd's Register Rail tijdens de acceleratiefase bedraagt -2,28%. De afwijking in tijdsduur van het model ten opzichte van de gegevens van Lloyd's Register Rail bedraagt tijdens de acceleratiefase -1,99% en de afwijking in het energieverbruik ten opzichte van de gegevens van Lloyd's Register Rail bedraagt -3,36%.

Figuur 5-3 laat de resultaten van de 'cruising' fase van het model zien, waarbij het vooral gaat over het energieverbruik over de afstand. Dit is echter niet direct vergelijkbaar met de gegevens van Lloyd's Register Rail, omdat zij het energieverbruik per km bepalen. Daarom is het energieverbruik van het model herleid tot het verbruik per km. Hieruit blijkt dat de afwijking ten opzichte van de resultaten van Lloyd's Register Rail -0,11% bedragen. Het energieverbruik in de kruisfase komt dus heel goed overeen met de resultaten van Lloyd's Register Rail.

De verschillen tussen het model en de gegevens van Lloyd's Register Rail met betrekking tot de uitroloffase zijn helder grafisch te zien in Figuur 5-4. Uit de analyse van de uitroloffase vanuit het model ten opzichte van de geleverde gegevens van Lloyd's Register Rail blijkt dat vanaf een beginsnelheid van 140 km/h tot en met stilstand de trein er in het model sneller over doet in zowel afstand als tijd dan volgens de gegevens van Lloyd's Register Rail. De afwijking voor de afgelegde afstand bedraagt -14,21% ten opzichte van de gegevens van Lloyd's Register Rail. In de tijd is deze afwijking -7,63%. De afwijkingen zijn relatief groot ten opzichte van de acceleratiefase. Daarbij dient wel opgemerkt te worden dat een trein langer uitrolt dan dat deze versneld.

Tot slot is de vergelijking tussen het model en de gegevens van Lloyd's Register Rail voor de remfase te zien in Figuur 5-5. Ook hier komen de resultaten van het model voor de afstand, snelheid en tijd goed overeen met de gegevens van Lloyd's Register Rail. De afwijking tussen het model en de gegevens van Lloyd's Register Rail bedraagt -3,25% voor de afgelegde afstand. De afwijking van het model ten opzichte van de gegevens van Lloyd's Register Rail in tijdsduur is

-1,85%. Vanuit het model wordt er gebruik gemaakt van remstand 4 (176,3 kN), met de gegeven massa van VIRM 1 IV (259.200 kg) komt dit neer op een deceleratie van constant 0,68 m/s<sup>2</sup>. Uit de gegevens van Lloyd's Register Rail blijkt dat de deceleratie afhankelijk is van de snelheid, zie Figuur 5-6. De vorm van deze grafiek met een piek in de deceleratie over de snelheid is wel merkwaardig. Een normale remming van een machinist ziet er zo niet uit (meer lineair verloop van de remvertraging) en daarnaast zal de remming veelal een continue functie zijn om dit goed te kunnen modelleren. Aanbevolen wordt om verder onderzoek te doen naar de reden van deze piek in de remvertraging. Wel verklaart de analyse van de grafiek het verschil tussen het model en de gegevens van Lloyd's Register Rail voor de remming van de trein.

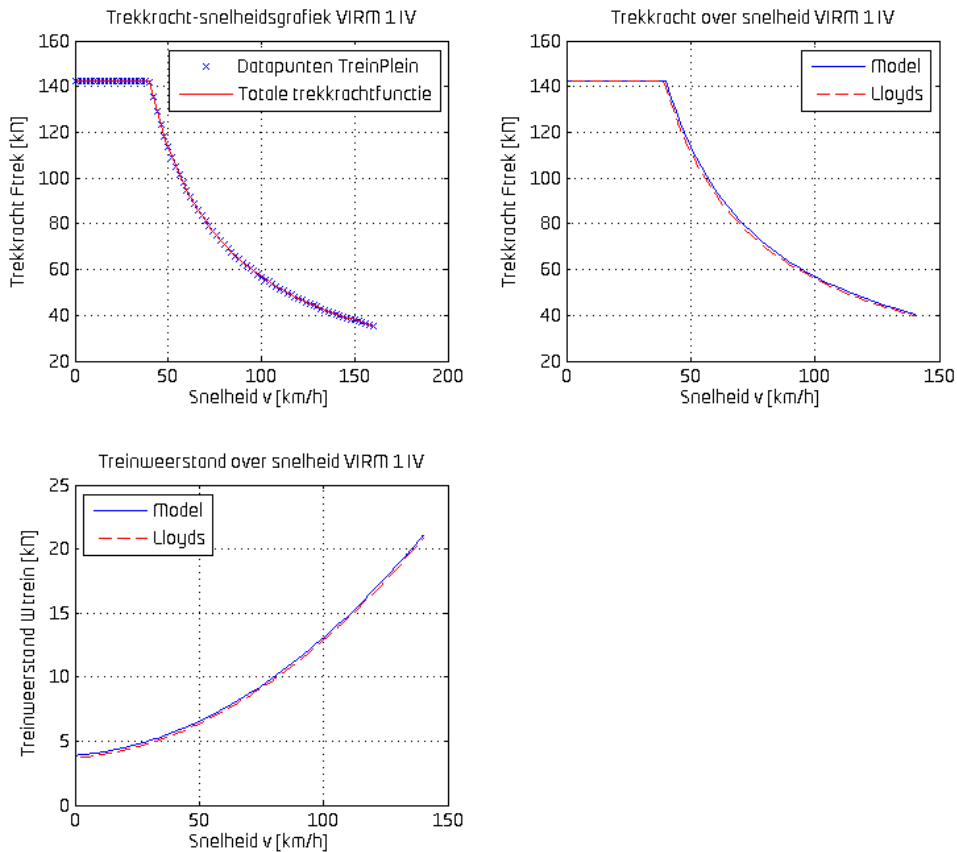
Mogelijke oorzaken voor de afwijkingen kunnen tot slot ook liggen aan het feit dat de coëfficiënten voor de trekkracht en treinweerstand die zijn gebruikt in het model gebaseerd zijn op gegevens van TreinPlein. Deze zijn onlangs door Lloyd's Register Rail opnieuw bepaald en het bestand van Lloyd's Register Rail met de gegevens maakt nog gebruik van de oude coëfficiënten. De oude coëfficiënten zijn ook niet meer beschikbaar op TreinPlein, waardoor een grondige vergelijking tussen het model en de gegevens van Lloyd's Register Rail niet mogelijk is.

### 5.1.2 Conclusie

Uit de kalibratie van het model voor het materieeltype VIRM 1 IV aan de hand van de gegevens van Lloyd's Register Rail wordt geconcludeerd dat de parameterwaarden in het model goed zijn afgestemd en dat de formules correct zijn toegepast. De resultaten laten zien dat de data van het model over het algemeen goed overeenkomt met de gegenereerde data van Lloyd's Register Rail. De grootste afwijkingen worden waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat Lloyd's Register Rail op TreinPlein van nieuwe coëfficiënten voor de trekkracht en treinweerstand gebruik maakt, terwijl het databestand van Lloyd's Register Rail hier geen gebruik van maakte.

Aangezien de data vanuit TreinPlein ook afkomstig is van Lloyd's Register Rail en de data van VIRM (1) IV redelijk goed overeen komt met de gegevens van Lloyd's Register Rail, wordt verwacht dat de data van SLT VI ook goed is afgestemd. Dit zal tevens ook blijken gedurende de verificatie, de validatie en de praktijkproef van het model.

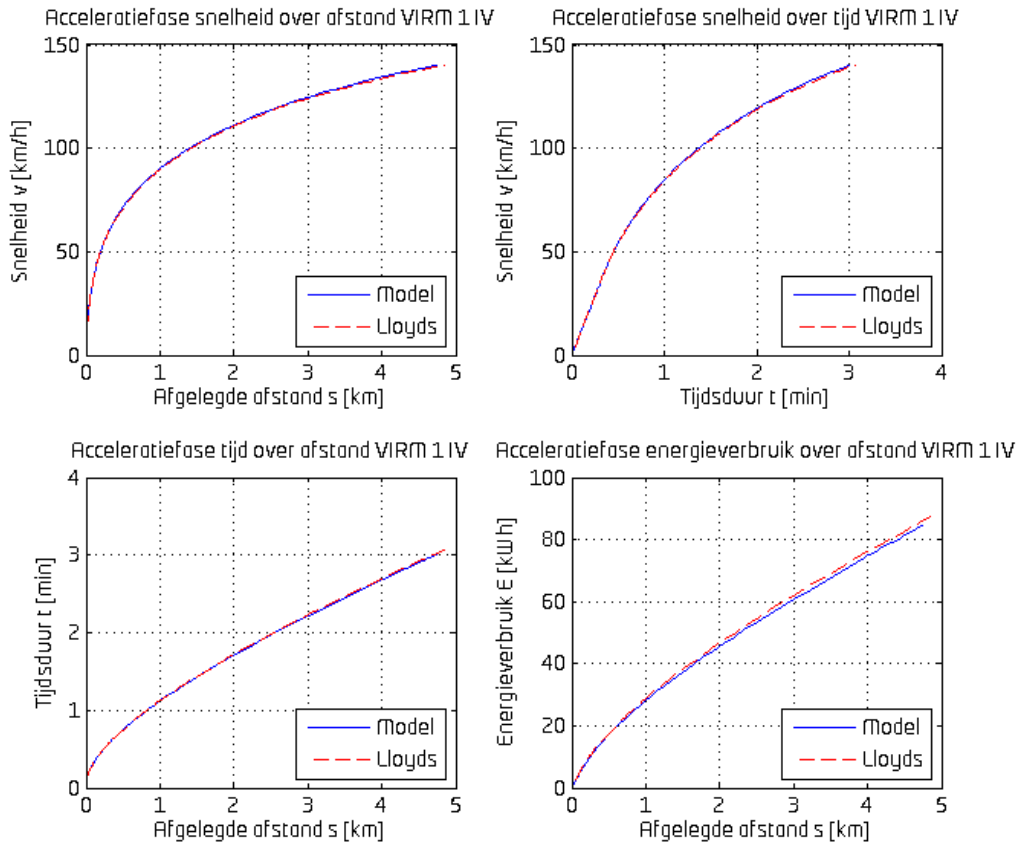




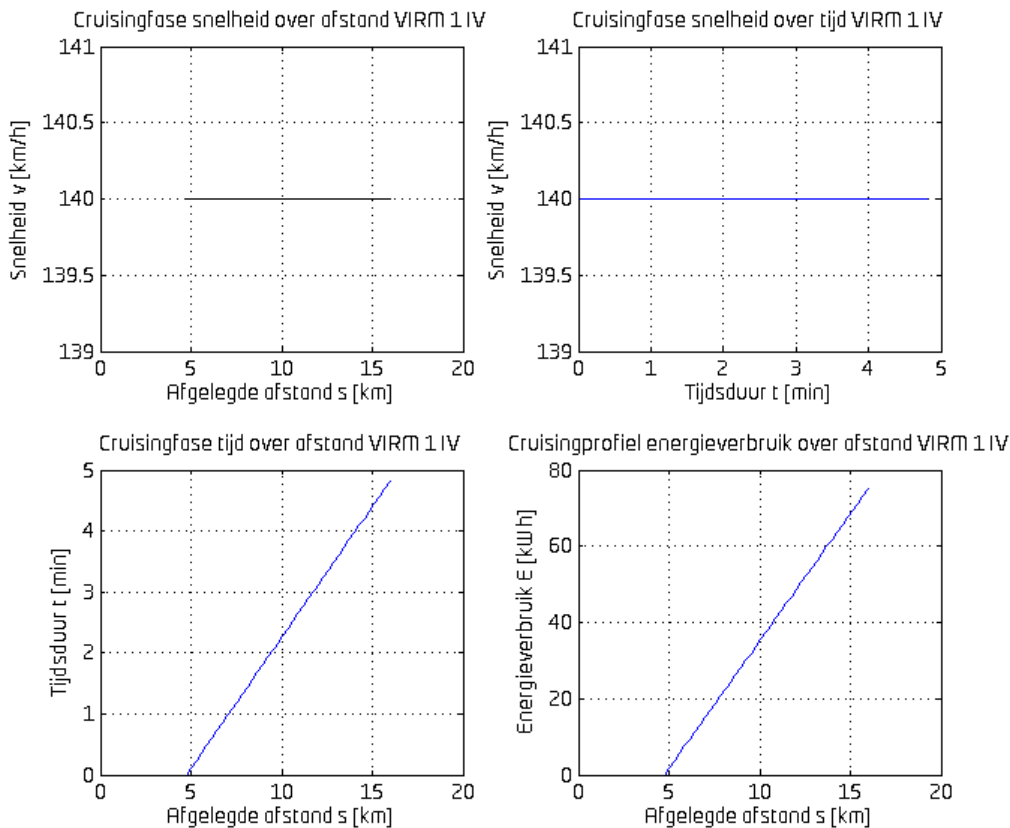
Figuur 5-1: trekkraft model ten opzichte van de datapunten vanuit TreinPlein (linksboven), trekkraft model ten opzichte van de gegevens van Lloyd's Register Rail (rechtsboven) en treinweerstand model ten opzichte van de gegevens van Lloyd's Register Rail (linksonder)

	$c_0$	$c_1$	Omslagpunt
<b>Model</b>	$1.04 \cdot 10^9$	$1.55 \cdot 10^6$	38 km/h
<b>Lloyd's Register Rail gegevens</b>	$1,04 \cdot 10^9$	$1,55 \cdot 10^6$	39 km/h
<b>Afwijking model vs. Lloyd's</b>	0%	0%	-2,56%

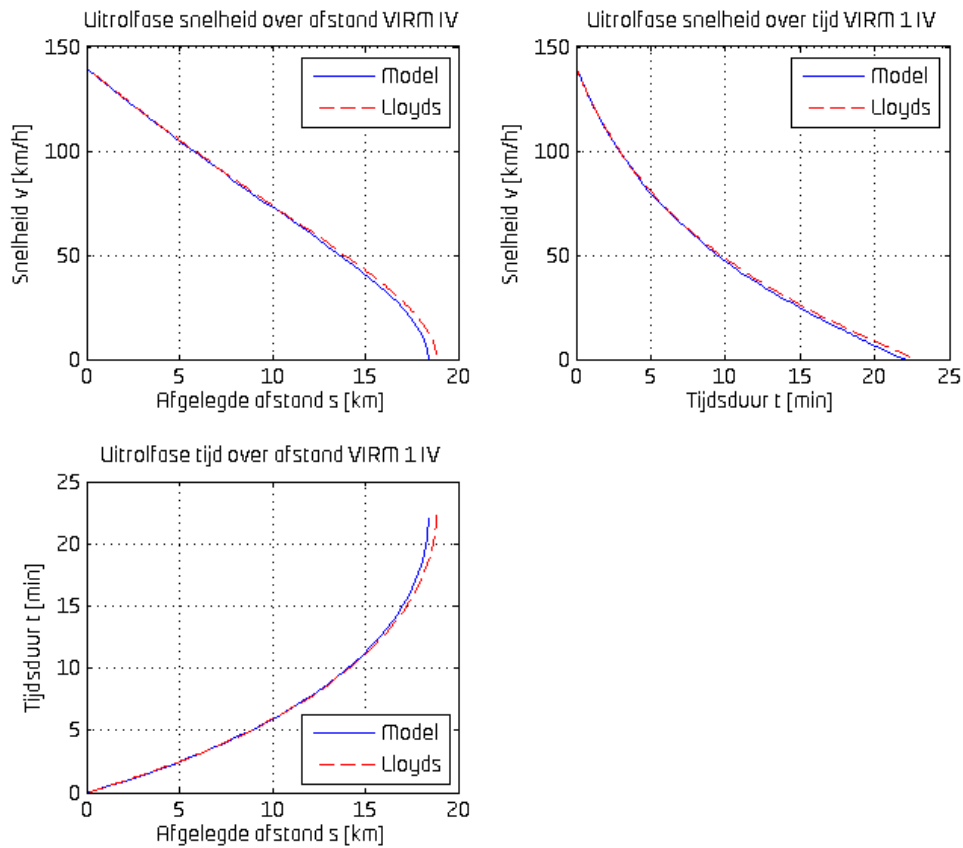
Tabel 5-1: vergelijking regressie analyse model met gegevens Lloyd's Register Rail ( $c_0$  = coëfficiënt constant deel grafiek,  $c_1$  = coëfficiënt hyperbolisch deel grafiek en omslagpunt = locatie waar constant deel grafiek over gaat in hyperbolisch deel)



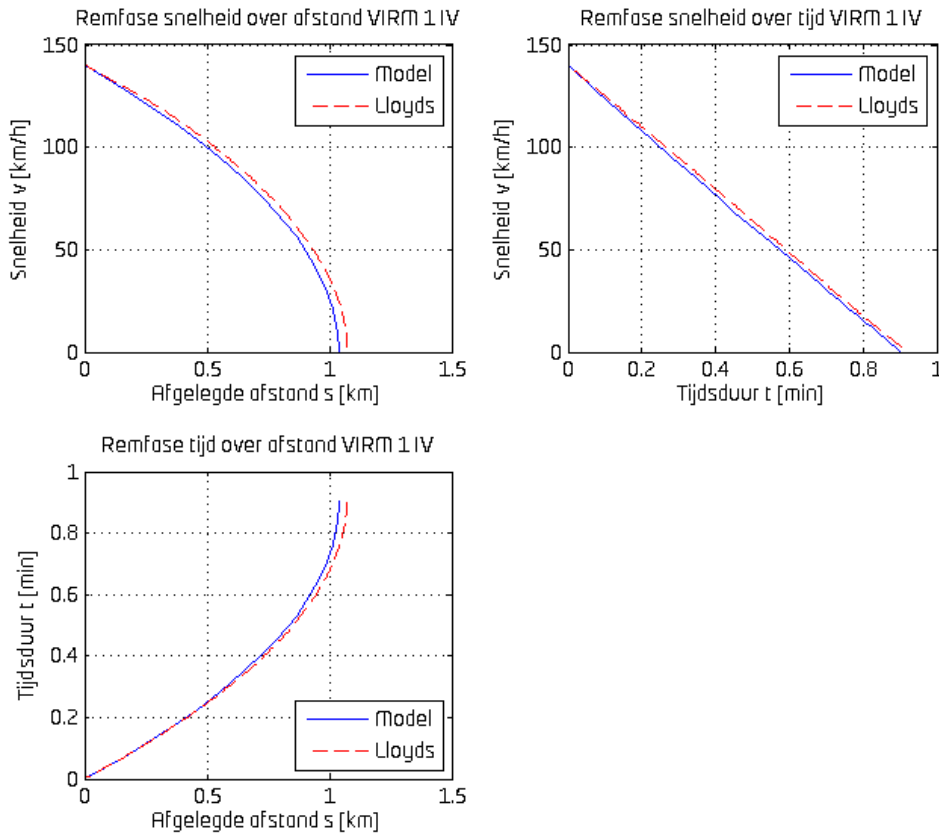
**Figuur 5-2: acceleratiefase model vs. Lloyd's Register Rail (linksboven: snelheid over afstand, rechtsboven: snelheid over tijd, linksonder: tijd over afstand en rechtsonder: energie over afstand)**



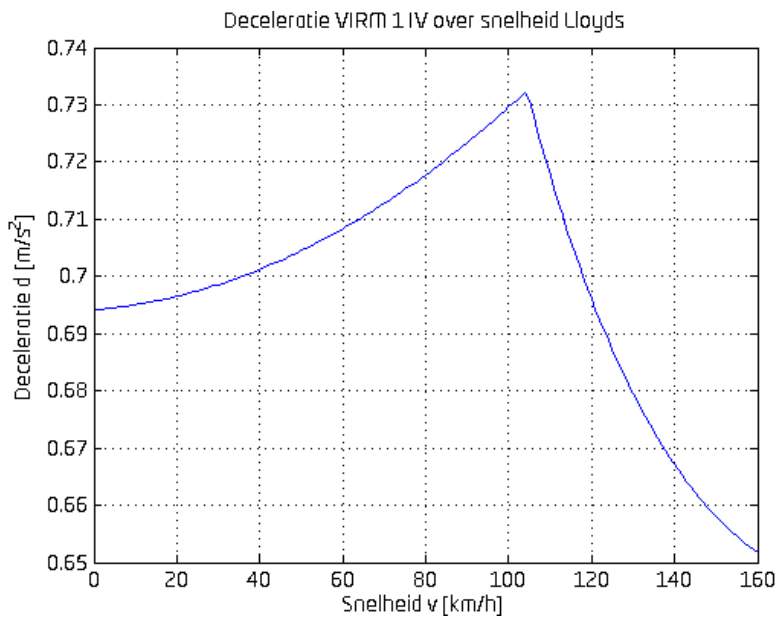
**Figuur 5-3: 'cruising' of kruisfase model (linksboven: snelheid over afstand, rechtsboven: snelheid over tijd, linksonder: tijd over afstand en rechtsonder: energie over afstand)**



**Figuur 5-4: uitroffase model vs. Lloyd's Register Rail (linksboven: snelheid over afstand, rechtsboven: snelheid over tijd en linksonder: tijd over afstand)**



**Figuur 5-5: remfase model vs. Lloyd's (linksboven: snelheid over afstand, rechtsboven: snelheid over tijd en linksonder: tijd over afstand)**



Figuur 5-6: deceleratie over snelheid bij gegevens Lloyd's Register Rail voor VIRM 1 IV voor remfase

## 5.2 Verificatie

In deze paragraaf wordt gekeken in hoeverre de modelresultaten overeen komen met de verwachtingen. Tevens wordt er geverifieerd hoe de modelresultaten zich verhouden met de UZI-methode van NS Reizigers. Daarnaast wordt gekeken naar de optimale verdeling van de rijtijdspeling. Ook wordt in deze paragraaf stap voor stap de modelbouw laten zien. Zo behandelt subparagraaf 5.2.1 de tijdoptimale rijstrategie in het model. Daarna wordt het model uitgebreid naar de energieoptimale rijstrategie in subparagraaf 5.2.2. Vervolgens wordt in subparagraaf 5.2.3 het model toegepast op het bestaande baanvak en vergeleken met de UZI-methode van NSR. Tot slot wordt er gekeken naar de gevolgen van de herverdeling van de beschikbare rijtijdspeling, waarmee de gevolgen van het straktrekken geanalyseerd kunnen worden. Dit gebeurt in subparagraaf 5.2.4. De paragraaf wordt in subparagraaf 5.2.5 afgerond met een conclusie.

### 5.2.1 Tijdoptimale rijstrategie

In deze subparagraaf wordt de verificatie van de tijdoptimale rijstrategie kort behandeld. Een uitvoerige omschrijving van de verificatie van deze rijstrategie is te vinden in bijlage 12.1. Het materieel dat gebruikt is voor deze strategie is VIRM 1 IV, waarmee het mogelijk is om het model te vergelijken met gegevens van Lloyd's Register Rail Europe B.V. zoals dat in paragraaf 5.1 bij de kalibratie gebeurd is. Het baanvak is fictief en is 17 km lang en er geldt een maximum baanvakssnelheid van 140 km/h.

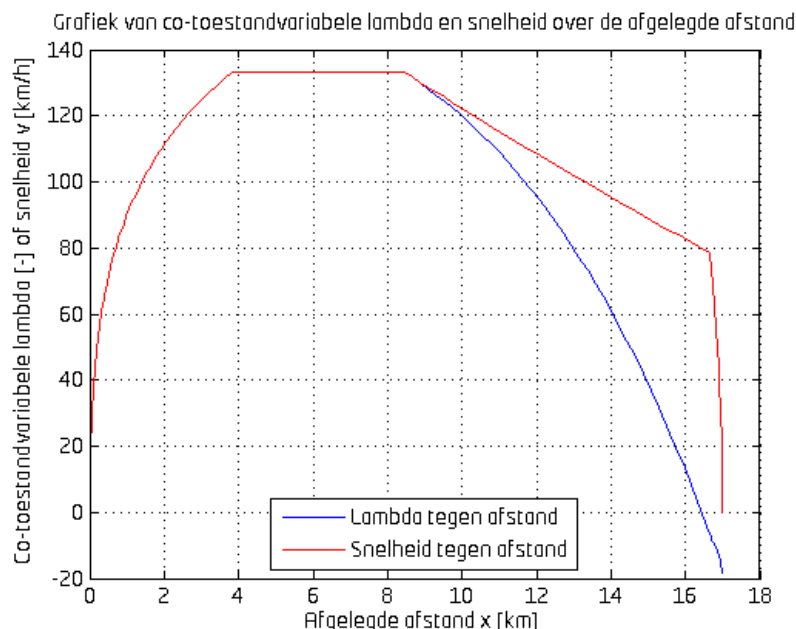
Bij de tijdoptimale rijstrategie zijn verschillende scenario's doorlopen, zoals variaties in lengte van het baanvak, andere begin- en/of eindsnelheid en het wel of niet meenemen van hellingen bogen en/of tunnels. Uit de analyse in bijlage 12.1 blijkt dat het model bij de verschillende scenario's resultaten genereert die overeen komen met de verwachtingen.

### 5.2.2 Energieoptimale strategie

De energieoptimale rijstrategie wordt in deze subparagraaf kort besproken. Voor een uitvoerige beschrijving van de verificatie van deze rijstrategie wordt er verwezen naar bijlage 12.2. Het energieoptimale algoritme zal altijd eerst onderzoeken welke tijdsduur een trein minimaal nodig heeft om van A naar B te reizen. Indien er nog ruimte is, kan het energiezuinige model worden toegepast om te kijken hoeveel er nog bespaard kan worden. De materieel en infrastructuur karakteristieken zijn identiek aan die van de tijdoptimale rijstrategie (VIRM 1 IV en 17 km lang baanvak met maximumsnelheid van 140 km/h).

Bij de verificatie van de energieoptimale rijstrategie in bijlage 12.2 zijn de verschillende scenario's net als bij de tijdoptimale rijstrategie doorlopen. Alleen is de invloed van tunnels ditmaal niet meegenomen, omdat op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen waar het model uiteindelijk op wordt toegepast ook geen sprake is van tunnels. Opnieuw blijkt dat de modelresultaten aan de verwachtingen voldoet.

Ten slotte is gecontroleerd of het toegepaste algoritme uit paragraaf 4.3.2 klopt met de theorie. Aangezien het niet mogelijk is om met twee vergelijkingen ((4.32) en (4.35)) ten minste drie onbekenden op te lossen ( $v_{cruis}$ ,  $\mu$  en  $C_0$ ) en het niet mogelijk is gebleken om nog een derde vergelijking te vinden, is de optimale kruissnelheid uit het model gebruikt om te kijken of de uitkomsten van het model de optimale rijstrategie genereren. Met de gegeven  $v_{cruis}$  is het namelijk mogelijk om de andere onbekenden te bepalen en vervolgens de gewone differentiaalvergelijking van  $\lambda(x)$  in formule (4.25) op te lossen. Dit gebeurt vanaf het begin van de uitrolfase tot en met het einde van de remfase. Uit vergelijking (4.29) volgt namelijk dat bij het begin van de uitrolfase  $\lambda(x) = v_{cruis}$  en bij het omslagpunt van de uitrolfase naar de remfase geldt  $\lambda(x) = 0$ . Dit is vervolgens getoetst en het resultaat hiervan is te vinden in Figuur 5-7.



Figuur 5-7: controle model door  $\lambda(x)$  over  $x$  en  $v(x)$  over  $x$

Vanuit de modelanalyse blijkt dat de optimale kruissnelheid 133,3 km/h is bij het basis baanvak bij een maximale baanvakssnelheid van 140 km/h. De grafiek laat zien dat de functie  $\lambda(x)$  de  $x$ -as snijdt op 16,437 km. Volgens het model eindigt de uitrolfase bij 16,663 km. De afwijking tussen het model en de theorie is daarmee bij het omslagpunt van de uitrol- naar de remfase is 1,37%. Dit duidt aan dat het model het optimum niet precies bepaalt, maar daar wel heel dicht in de buurt komt (goede benadering). Mogelijke oorzaken van deze afwijkingen zijn te wijten aan de afrondingen van de algoritmes in MATLAB en aan de gestelde nauwkeurigheid van de verschillende berekeningen. Zo is bij het nauwkeuriger afstellen van de ODE berekening van  $\lambda(x)$  in MATLAB gebleken dat de afwijking tussen het model en het optimum volgens de theorie ook afnam (naar 1,09%). Aanbevolen wordt daarom om verder onderzoek te doen naar de wiskundige formulering in MATLAB om het exacte optimum te vinden.

### 5.2.3 Totale model met UZI-methode

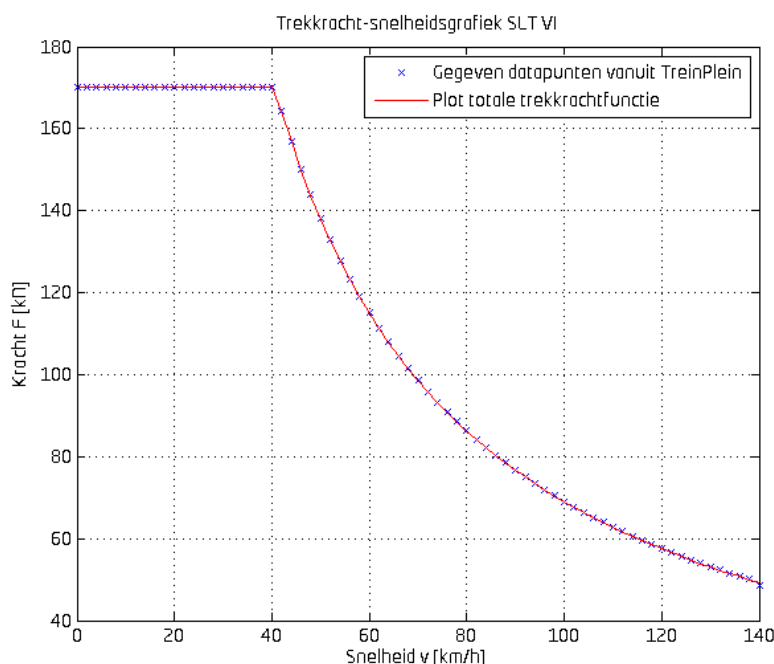
Deze subparagraaf behandelt het totale model met de UZI-methode op het traject Utrecht Centraal – Rhenen voor de treinserie 7400. Allereerst worden de inputgegevens voor het model

weergegeven. Daarna volgen de resultaten van het model. Tot slot leidt dit allen tezamen tot een conclusie.

### Inputgegevens model

Het materieeltype dat bij de planning voor de 7400 serie wordt gebruikt is SLT VI (6 bakken) richting Utrecht Centraal (A7400) en richting Rhenen (B7400) 2x SLT IV (8 bakken opgesplitst in twee treinstellen van 4 bakken). Gekozen is in het model SLT VI te gebruiken. De uitleg daarvan is besproken in subparagraaf 5.1.1. Daarbij worden de B7400 serie vanuit de basisuurpatronen dienstregeling 2012 genomen. In het andere halfuur (D7400) is de dienstregeling immers identiek. In het geval van een korte stop (K) geeft Donna de vertrektijd weer. Daarbij wordt aangenomen dat de halteertijd van SLT 0,6 minuten bedraagt bij een korte stop, zoals dit ook in Donna is verwerkt. De aankomsttijd bij een korte stop is volgens Donna de vertrektijd minus de halteertijd. In principe worden de berekende niet afgeronde tijden gebruikt uit Donna, behalve als de berekende vertrektijd kleiner is dan de plantijd. Immers mag een trein niet eerder vertrekken dan volgens de dienstregeling gegeven is. Ook wordt de aankomsttijd gebruikt in plaats van de berekende tijd, indien er geen sprake is van een korte stop.

In het model is de trekkrachtgrafiek opgesteld van SLT VI door de gegeven datapunten. Aangezien op het Nederlandse baanvak dat met het Automatische treinbeïnvloeding (ATB) systeem is ingericht, maximaal 140 km/h heeft als baanvaksnelheid en SLT op dit moment enkel met ATB als treinbeïnvloedingssysteem rijdt, wordt de trekkrachtgrafiek beperkt tot 140 km/h. Bovendien is de maximale baanvaksnelheid op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen ook 140 km/h. Door deze beperking in maximale snelheid komt de trekkrachtgrafiek goed overeen met de gegeven trekkracht vanuit TreinPlein (NSR/Lloyd's, 2012), zie Figuur 5-8.



Figuur 5-8: trekkracht grafiek SLT VI door gegeven data (tot en met 140 km/h)

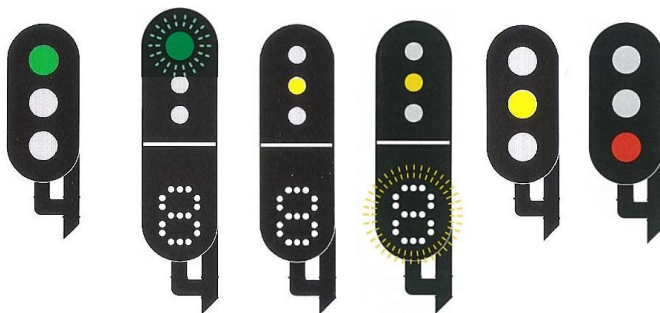
Het gehele baanvak tussen Utrecht Centraal en Rhenen is uitgerust met Automatische treinbeïnvloeding (ATB) Eerste Generatie (EG). Dit systeem grijpt in (in de vorm van een noodremming) als de machinist de aangegeven snelheid bijvoorbeeld door een sein (te lang) overschrijdt. Dit systeem kent vijf verschillende coderingen die staan voor de snelheden 40, 60, 80, 130 of 140 km/h. De ATB snelheid is uiteindelijk het minimum van de huidige baanvaksnelheid, de aangekondigde snelheidsbeperking en de snelheidslimiet dat bij het vorige sein is aangekondigd (T. Albrecht, Gassel, Binder, et al., 2010). In geval van bijvoorbeeld een



baanvakssnelheid van 100 km/h geeft de ATB een maximale snelheid weer van 130 km/h. Met dit ATB systeem en het ATB remcriterium (minimaal remstand 1) dient rekening te worden gehouden in het model in het geval er een snelheidsreductie op het baanvak is.

Ook zijn in het model verschillende seinbeelden meegenomen die zich in de praktijk voordoen. Deze worden hierna toegelicht en ze zijn te zien in Figuur 5-9 (NSR, 2005, pp. 2.3-2.6):

- Een hoog geplaatst groen licht: voorbijrijden toegestaan met inachtneming van de plaatselijke snelheid. Indien bij vertrek de plaatselijke snelheid niet bekend is, is voorbijrijden met een snelheid van ten hoogste 40 km/h toegestaan.
- Een hoog geplaatst knipperend groen licht met een door wit licht gevormd getal: voorbijrijden toegestaan met ten hoogste de door het getal<sup>20</sup> aangegeven snelheid.
- Een hoog geplaatst geel licht met een door knipperend wit licht gevormd getal: snelheid begrenzen tot de door het getal aangegeven snelheid. Ingeval een remming is ingezet en het volgende lichtsein een verdere begrenzing van de snelheid gebiedt, wordt de remming niet onderbroken.
- Hoog geplaatst geel licht met een door wit licht gevormd getal: snelheid begrenzen tot de door het getal aangegeven snelheid. De door het getal aangegeven snelheid wordt bij het volgende lichtsein niet overschreden.
- Hoog of laag geplaatst geel licht: snelheid begrenzen tot 40 km/h en afhankelijk van zicht en beremming met een zodanige snelheid verder te rijden om voor het eerstvolgende sein, dat stoppen gebiedt, te kunnen stoppen.
- Hoog of laag geplaatst rood licht: stoppen voor het sein.



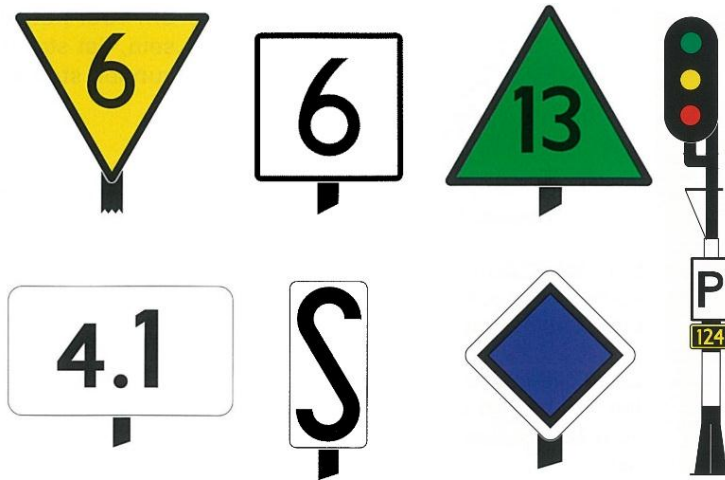
**Figuur 5-9: mogelijke seinbeelden op baanvak Utrecht Centraal – Rhenen voor het model (1<sup>e</sup> van links = groen, 2<sup>e</sup> van links = groen knipper getal, 3<sup>e</sup> van links = geel getal, vierde van links = geel getal knipper, vijfde van links = geel en uiterst rechts = rood) (NSR, 2005, pp. 2.3-2.6)**

Tevens zijn er een aantal typen borden van belang voor het model. Deze worden gebruikt voor het bepalen van de infrastructuur in het model en de koppeling van de modelresultaten aan baanvakelementen. Deze borden visueel te zien in Figuur 5-10 en worden hieronder toegelicht (NSR, 2005, pp. 3.1-3.3; 4.4; 12.11; 12.18; 16.11):

- Snelheidsverminderingbord: snelheid begrenzen tot de door het getal aangegeven snelheid.
- Snelheidsbord: rijden toegestaan met ten hoogste de door het getal aangegeven snelheid.
- Baanvakssnelheidsbord: verhoging van de snelheid naar de door het getal aangewezen snelheid toegestaan. In geval geen cijfer vermeld wordt, is een snelheid van 125 km/h toegestaan.
- Kilometer bord/hectometerbord: aanduiding van de kilometer ligging.
- Verkenbord: aanduiding van de nadering van een perron voor reizigers op remafstand.
- Cijferbord: aanduiding van de plaats waar de voorzijde van een trein tot stilstand moet komen voor een goede dienstvoering.

<sup>20</sup> Getal dient met 10 km/h vermenigvuldigd te worden om de daadwerkelijke snelheid te bepalen.

- *P-bord: aanduiding van een P-sein*<sup>21</sup>.
- *Seinnummerbord: aanduiding van het nummer van het lichtsein.*



**Figuur 5-10: belangrijkste bebording langs baanvak Utrecht Centraal – Rhenen voor het model (linksboven = snelheidsverminderingbord, boven midden = snelheidsbord, rechtsboven = baanvaksnelheidsbord, linksonder = kilometer/hectometerbord, onder midden = verkenbord, rechtsonder = cijferbord en uiterst rechts: P-sein met P-bord en seinnummer) (NSR, 2005, pp. 2.2; 3.1-3.3; 12.11; 12.18; 16.11)**

Bij een aantal stations op het baanvak komt het voor dat het seinbeeld richting het station geel-rood is in plaats van groen. Dit doet zich bijvoorbeeld voor bij de zogenaamde stop-door schakelingen, waarbij achter het station een overweg ligt die niet al te lang gesloten dient te blijven. Bij het gele seinbeeld dient de trein de remming in gang te zetten. Deze dient te voldoen aan het ATB criterium, dat minimaal remstand 1 (ook wel de ATB remming genoemd) voorschrijft en dit remcriterium dient direct na het passeren van het gele seinbeeld in werking te worden gezet. De trein remt vervolgens af tot de ATB snelheid (extra 'cruising' fase) of remt direct erna met de maximale service remkracht tot de eindsnelheid van de sectie (T. Albrecht, Gassel, Binder, et al., 2010). Het remcriterium zorgt er dus voor dat de ideale rijstrategie vanuit energie oogpunt niet gereden kan worden, doordat de trein al eerder moet gaan remmen. Ook bij een snelheidsverminderingbord dient de trein minimaal volgens het ATB remcriterium te remmen.

Als de trein in de tijdoptimale strategie rijtijd over houdt ten opzichte van de gegeven tijd van de dienstregeling, dan is het mogelijk voor de trein om energiezuinig te rijden. Allereerst wordt dan gekeken naar de energieoptimale rijstrategie. Vervolgens wordt onderzocht of het mogelijk is om de UZI-methode (BASIS of PRO) toe te passen. Hiervoor moet er wel voldoende speling beschikbaar zijn, want de UZI-methode gaat uit van circa 5% rijtijdspeling tussen twee stations. Bij de UZI-methode wordt normaal gesproken remstand 1 of 2 gebruikt (een lichte remming). In het model wordt voor remstand 2 gekozen, omdat hierdoor zoveel mogelijk tijd over blijft voor de trein om uit te rollen. Tot slot wordt in het model aangenomen dat de machinist veel ervaring en wegbekendheid heeft van het baanvak. Het is namelijk op het traject veelal niet mogelijk om letterlijk de UZI-methode toe te passen, waardoor er expert kennis van de machinist nodig is om de juiste maximumsnelheid en het juiste uitrolmoment te bepalen.

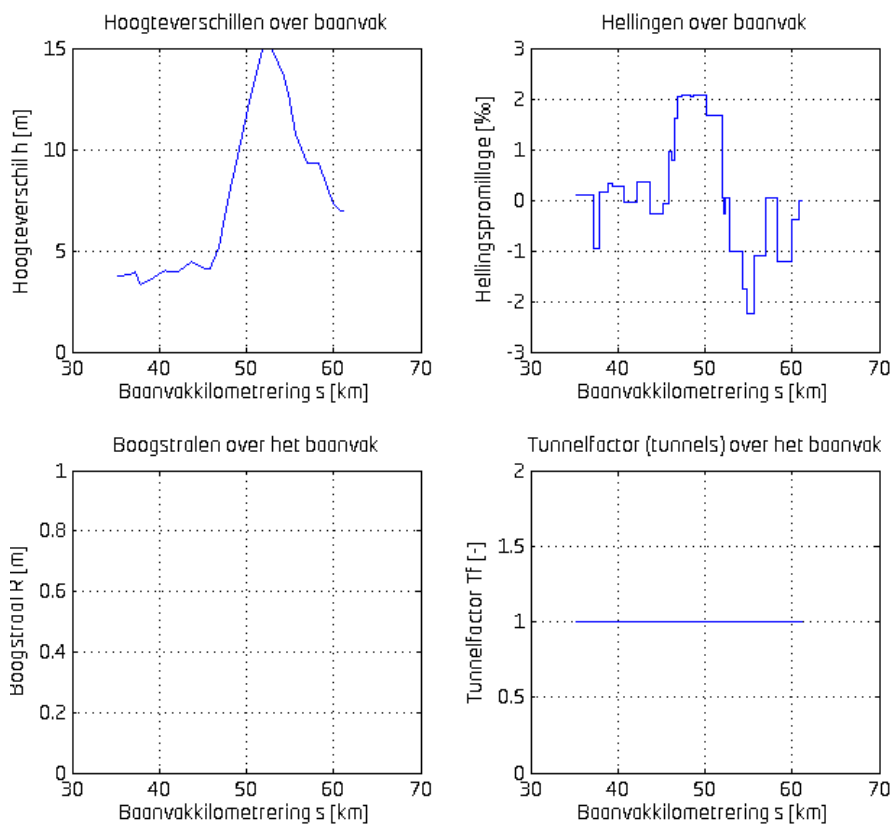
Met deze gegevens kan het model worden toegepast op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen.

<sup>21</sup> Een permissief (P) sein is een sein dat door een machinist bij een rood seinbeeld met de snelheid rijden op zicht gepasseerd mag worden (na, indien mogelijk, overleg met verkeersleiding). P-seinen kunnen niet door verkeersleiding bediend worden, zoals bediende seinen en ze zijn meestal geplaatst op bloksecties waarachter geen wissels zijn gelegen.

Daarbij is het gehele traject opgedeeld in gedeeltes waarbij de maximale baanvaksnelheid constant is. Voor de verschillende tijden is de dienstregeling van de B7400 serie gebruikt (vertrektijd van :43 uit Utrecht Centraal). De kilometering is op het traject Utrecht Centraal – De Haar aansluiting volgens het kilometerlint Amsterdam Centraal (Asd) – Zevenaar grens (Zvg) en op het traject De Haar – Rhenen volgens het kilometerlint Rhenen – De Haar aansluiting. De baanweerstand voor het traject Utrecht Centraal – De Haar aansluiting zijn te vinden in Figuur 5-11 en voor het traject De Haar aansluiting – Rhenen zijn te vinden in Figuur 5-12. Het traject Rhenen – Utrecht Centraal is niet onderzocht in dit onderzoek, omdat daar niet voldoende tijd voor beschikbaar was. Mogelijk kan hier in vervolgonderzoek verder naar gekeken worden.

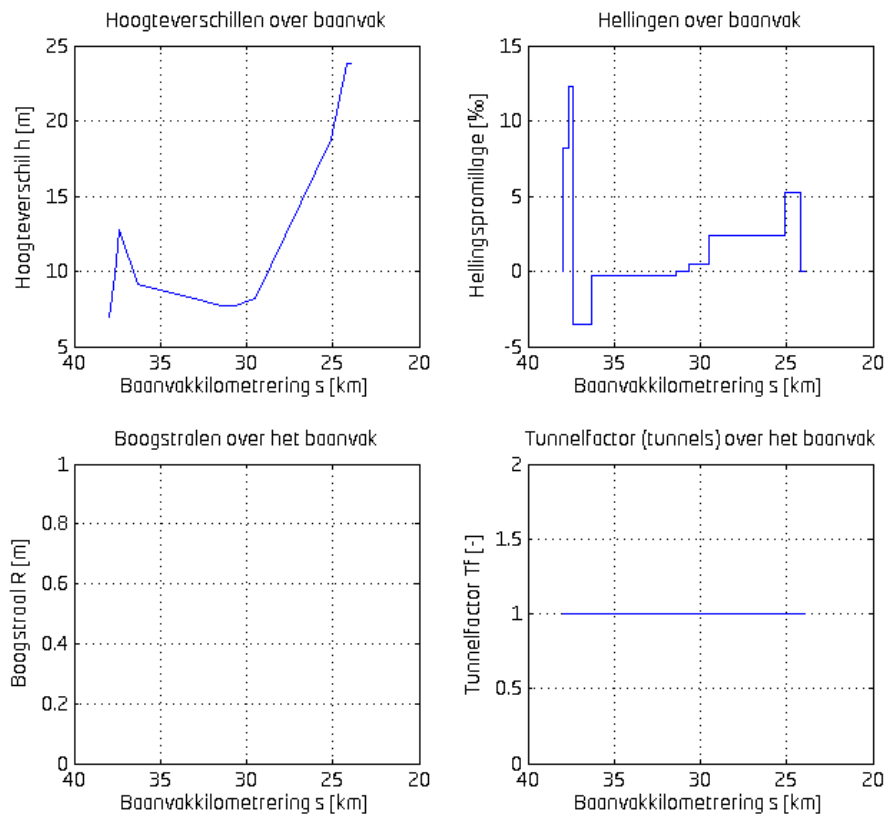
Op het baanvak komen de volgende dienstregelpunten voor:

- Knooppunt Utrecht Centraal (Ut);
- Aansluiting Utrecht aansluiting goederen emplacement (Utva);
- Aansluiting Lunetten aansluiting kruispunt (Lak);
- Halte<sup>22</sup> Bunnik (Bnk);
- Station Driebergen-Zeist (Db);
- Goederenemplacement Maarn goederen emplacement (Mrg);
- Halte Maarn (Mrn);
- Aansluiting De Haar aansluiting (Har);
- Halte Veenendaal West (Vndw);
- Overloop Veenendaal West overloopwissels (Vndwo);
- Station Veenendaal Centrum (Vndc), en;
- Halte Rhenen (Rhn).



**Figuur 5-11: baanweerstand Ut – Har (linksboven: hoogteverschil, rechtsboven: hellingpromillage, linksonder: boogstraal en rechtsonder: tunnelfactor)**

<sup>22</sup> Een halte is een station zonder inhaal- of kruisingsmogelijkheid (ProRail, 2010).



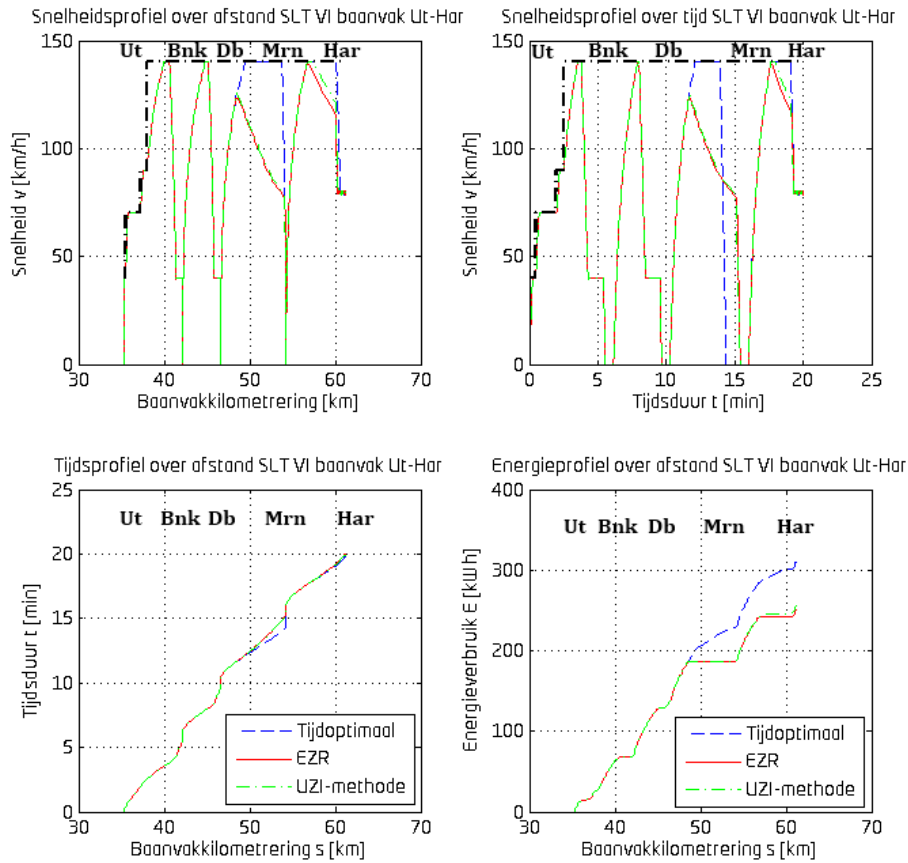
**Figuur 5-12: baanweerstand Har – Rhn (linksboven: hoogteverschil, rechtsboven: hellingpromillage, linksonder: boogstraal en rechtsonder: tunnelfactor)**

### Resultaten traject Utrecht Centraal – Rhenen

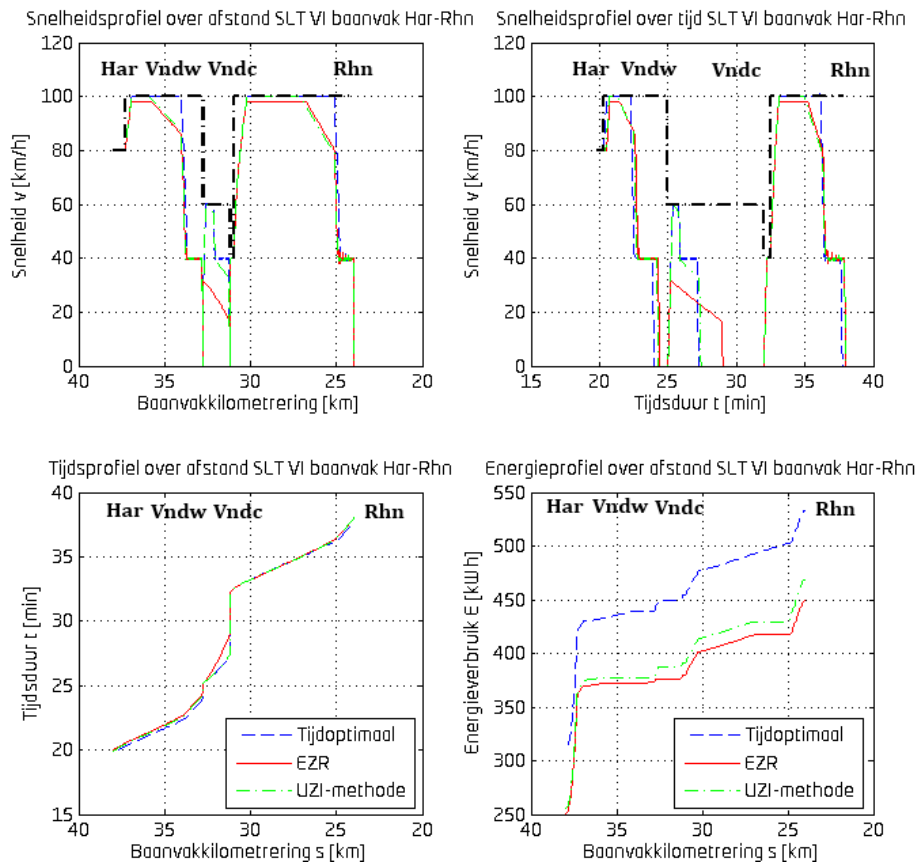
Bij het traject Utrecht Centraal – Rhenen is allereerst per sectie waar de maximumsnelheid constant is onderzocht of de tijdoptimale rijstrategie gehaald kan worden. Indien dit mogelijk is, is er gekeken of er rijtijdspeling is. Deze rijtijdspeling wordt vervolgens gebruikt voor de energieoptimale rijstrategie en de voor de UZI-methode.

De resultaten zijn weergegeven voor de trajecten Utrecht Centraal – De Haar aansluiting (Ut – Har) en voor De Haar aansluiting – Rhenen (Har – Rhn). De reden hiervoor is het feit dat de afgelegde afstand uitgedrukt is in de baanvakkilometring, die tussen Ut – Har en Har – Rhn verschillend is, zoals hiervoor al is uitgelegd. De volgende resultaten zijn voor dit traject verkregen:

- Snelheidsprofiel over afstand traject Ut – Har (linksboven in Figuur 5-13) en Har – Rhn (linksboven in Figuur 5-14) en bijlage 13.1.13 (vergroting van figuren).
- Snelheidsprofiel over tijd traject Ut – Har (rechtsboven in Figuur 5-13) en Har – Rhn (rechtsboven in Figuur 5-14) en bijlage 13.1.13 (vergroting van figuren).
- Tijdsprofiel over afstand traject Ut – Har (linksonder in Figuur 5-13) en Har – Rhn (linksonder in Figuur 5-14) en bijlage 13.1.13 (vergroting van figuren).
- Energieprofiel over afstand traject Ut – Har (rechtsonder in Figuur 5-13) en Har – Rhn (rechtsonder in Figuur 5-14) en bijlage 13.1.13 (vergroting van figuren).
- Energieverbruik per sectie en in totaal (Tabel 5-2) samen met de karakteristieken van de energieoptimale rijstrategie en de UZI-methode.



**Figuur 5-13: snelheidsprofielen, tijdsprofiel en energieprofiel op het baanvak Ut – Har (zwarte gestreepte lijn geeft maximum toegestane snelheid weer)**



**Figuur 5-14: snelheidsprofielen, tijdsprofiel en energieprofiel op het baanvak Har – Rhn (zwarte gestreepte lijn geeft maximum toegestane snelheid weer)**



Sectie	Maximum baanvak-snelheid [km/h]	Energieverbruik per rijstrategie							
		Tijdoptimaal	Energieoptimaal				UZI-methode		
		Energie-verbruik [kWh]	Energie-verbruik [kWh]	Optimale kruis-snelheid [km/h]	Optimale uitrol-moment [baanvak km]	Energie-verbruik [kWh]	Uitschakel-snelheid [km/h]	Uitschakel-moment voor volgend dienst-regelpunt [min]	
Ut14	40	4,3	4,3	40	-	4,3	-	-	
Ut17	70	12,2	12,2	70	-	12,2	-	-	
Ut19	90	9,6	9,6	90	-	9,6	-	-	
Ut - Bnk	140	41,9	41,9	140	-	41,9	-	-	
Bnk - Db	140	71,2	71,2	140	-	71,2	-	-	
Db - Mrn	140	89,7	47,0	123,4	48,67	47,6	125	-	
Mrn - Har	140	81,6	64,8	138,8	56,96	68,7	-	2	
Har1	80	5,3	5,3	80	-	5,3	-	-	
Har - Vndw	100	18,5	11,5	98,1	35,76	12,0	-	3	
Vndw - Vndc	60	10,3	2,5	31,5	32,69	9,0	60	-	
Vndc1	40	4,3	4,3	40	-	4,3	-	-	
Vndc - Rhn	100	78,9	69,3	98,3	26,79	77,1	-	3	
<b>Totaal</b>		427,8	343,8			363,1			

Tabel 5-2: energieverbruik per rijstrategie en karakteristieken voor energieoptimale rijstrategie en UZI-methode voor traject Ut - Rhn (opmerking: bij de UZI-methode is of de uitschakelsnelheid (snelheid waarbij tractie wordt uitgeschakeld) gegeven of het uitschakelmoment (tijdstip voor aankomsttijd/doorkomsttijd volgend dienstregelpunt waarop de tractie wordt uitgeschakeld))



Het totale energieverbruik op het traject Utrecht Centraal – Rhenen volgens de tijdoptimale rijstrategie is 427,8 kWh (zie Tabel 5-2). In de energiezuinige rijstrategie wordt er 343,9 kWh verbruikt. De UZI-methode verbruikt op het gehele traject 363,1 kWh. De besparing van de energieoptimale ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie op het gehele traject is 19,6%. NS Reizigers betaalt 10 eurocent per kWh voor het verbruik van elektriciteit. Dit levert dus een besparing op van € 8,39 per rit. De energiebesparing van de UZI-methode ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie op het gehele traject is 15,1%, wat neerkomt op een energiebesparing van € 6,46 per rit. Tevens is de energieoptimale rijstrategie 5,3% zuiniger dan de UZI-methode op het traject Utrecht Centraal naar Rhenen (besparing van € 1,93 per rit). Ten slotte kost een modelrun per sectie in MATLAB ongeveer 10 minuten.

Uit de bovenstaande analyse van het traject Utrecht Centraal richting Rhenen blijkt tevens dat de dienstregeling vrij strak is ingepland. Er zijn maar een beperkt aantal secties op het traject waar energiezuinig gereden kan worden, te weten Driebergen-Zeist – Maarn, Maarn – De Haar aansluiting, De Haar aansluiting – Veenendaal West, Veenendaal West – Veenendaal Centrum en Veenendaal Centrum – Rhenen. Deze trajecten zijn nader bekeken om de details van de verschillende rijstrategieën beter te belichten.

Tabel 5-2 laat zien dat de relatief grootste energiebesparingen vallen op de secties Bnk – Db en Vndw – Vndc. De oorzaak daarvan is het feit dat op deze twee secties relatief veel rijtijdspeling is. De rijtijdspeling is op de sectie Db – Mrn ruim 61,1 s, terwijl de benodigde rijtijd 247,5 s is (speling van 24,7%). Hierdoor is er veel ruimte om energiezuinig te rijden, waardoor de hoge besparingen mogelijk zijn van bijna 50%. Tevens is de afwijking tussen de energieoptimale rijstrategie en de UZI-methode hier relatief erg klein. Dit komt doordat de optimale rijstrategie in deze situatie ook bijna geen kruisfase stelt. Hierdoor begint de trein vrij dicht bij de UZI uitroelsnelheid met uitrollen.

Daarnaast is er verhoudingsgewijs zeer veel speling op de sectie Vndw – Vndc, te weten 78,6%. De rijtijdspeling is namelijk 105,3 s terwijl er slechts 134,4 s nodig zijn. Daarnaast is de afstand tussen beide stations kort (circa 1,5 km), waardoor de trein bij de energieoptimale rijstrategie een zeer lage kruissnelheid kan halen om tijdig te arriveren op Vndc, te weten 31,5 km/h. Hierdoor is bij de energieoptimale rijstrategie een besparing van 75,4% ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie mogelijk. Bij de UZI-methode is de besparing 12,6% ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie. Dit komt doordat het bij de UZI-methode niet gewenst is om met zeer lage snelheden te gaan uitrollen, waardoor de trein eenmalig accelereert tot de maximum toegestane snelheid van 60 km/h.

Een uitvoerige analyse per sectie van de verschillende rijstrategieën van de secties is te vinden in bijlage 13.1.

### **Conclusie traject Utrecht Centraal – Rhenen**

Uit de analyse van het traject Utrecht Centraal richting Rhenen wordt geconcludeerd dat de dienstregeling vrij strak is ingepland. Er zijn maar een beperkt aantal secties op het traject waar energiezuinig gereden kan worden. Op het traject Ut – Db is de dienstregeling zo strak is ingepland, dat de trein standaard te laat aankomt en vertrekt op de stations Bunnik en Driebergen-Zeist. Daarnaast heeft de trein daarna erg veel rijtijdspeling, wat een gevolg is van het straktrekken van de dienstregeling. Zo levert dit bijvoorbeeld op het traject Vndw – Vndc zeer veel rijtijdspeling op, zoveel zelfs dat de trein met een snelheid van 31,5 km/h zou kunnen uitrollen en op tijd op station Veenendaal Centrum kan komen.

Over het gehele traject blijkt dat door energiezuinig te rijden op de trajecten waar dit kan, een besparing van 19,6% mogelijk is. Dit is een financiële besparing van € 8,39 per rit. Daarnaast is ook de UZI-methode vergeleken met het theoretische optimum. Ten opzichte van het theoretische optimum is er in theorie nog een extra besparing mogelijk van 5,3% bij de UZI-

methode op het traject Ut – Rhn (besparing van € 1,93 per rit). Opgemerkt dient wel te worden dat de UZI-methode in dit onderzoek sterk afhankelijk is van de ervaring en de wegbekendheid van de machinist. Daarbij is uitgegaan van de ideale situatie waarbij de trein niet later arriveert op het station dan volgens de planning kan en zo dicht mogelijk op de geplande aankomsttijd het station binnen rijdt.

Vanuit het model blijkt dat de dienstregeling is strak getrokken. Volgens de theorie is het beter voor zowel de punctualiteit als voor de mogelijkheden tot energiezuinig rijden om de rijtijd gelijkmatig over het traject te spreiden (T. Albrecht, 2008). Dit wordt vervolgens in de volgende subparagraaf onderzocht.

#### 5.2.4 Herverdeling rijtijdspeling

Deze subparagraaf bespreekt de herverdeling van de rijtijdspeling, zodat het beter mogelijk is om energiezuinig te gaan rijden en de trein daardoor punctueel kan rijden. Allereerst worden de resultaten besproken van het totale traject Ut – Rhn. Daarna volgt de conclusie ten aanzien van de herverdeling van de rijtijdspeling.

##### *Resultaten traject Utrecht Centraal – Rhenen*

Vanuit het model blijkt dat de rijtijdspeling niet optimaal verdeeld is, want zelfs in de tijdoptimale rijstrategie komt de trein te laat op de stations Bunnik en Driebergen-Zeist en heeft de trein vervolgens veel rijtijdspeling tussen Driebergen-Zeist – Maarn en Veenendaal West – Veenendaal Centrum. Daarom is gekozen om de rijtijdspeling die volgens het model beschikbaar is, uniform her te verdelen. Dit betekent dat tussen de verschillende stations op de secties waar energiezuinig rijden mogelijk (en rendabel) is, relatief evenveel rijtijdspeling wordt gegeven. Daardoor veranderen deels de tijden (plantijden) in de dienstregeling. Alleen de plantijd in Ut en de doorkomsttijd in Har zijn niet aangepast, omdat anders treinen in de nabijheid van de trein gehinderd worden.

Het trajectdeel wordt hiervoor in twee delen opgeknipt. De reden is dat de trein op een bepaald tijdstip De Haar aansluiting gepasseerd moet hebben, omdat de trein anders de achterliggende 3000 intercityserie naar Nijmegen (Nm) gaat hinderen. Vandaar dat er gekozen is om de rijtijd voor Har en na Har uniform over het traject te verdelen. Voor de deeltrajecten Ut14 – Ut19 en het gedeelte bij Har1 waar de maximum baanvaknelheid 80 km/h is en Vndc1 waar de maximum baanvaknelheid 40 km/h is, geldt dat er tijdoptimaal gereden wordt. De reden hiervoor is het feit dat de meeste baten op de sectie achter de bovengenoemde secties te winnen zijn, doordat er geen station tussendoor is en de baanvaknelheid na deze secties groter is dan de baanvaknelheid op de sectie zelf.

Het eerste resultaat van de analyse van de herverdeelde rijtijdspeling zijn de nieuwe rijtijden met speling en de nieuwe plantijden. Deze zijn te vinden in Tabel 5-3. Allereerst valt duidelijk op uit de tabel dat de rijtijdspeling voor het traject Ut19 – Har gelijk is (8,6%) en voor het traject Har – Rhn ook (20,5%). De rijtijdspeling tussen Ut en Har is 7,4%, wat komt door het feit dat er tussen Ut14 en Ut19 tijdoptimaal gereden wordt. In totaal blijft de rijtijdspeling gelijk, te weten 12,6%.

Uit de tabel blijkt duidelijk dat de korte stop tijden voor de stations Bunnik (Bnk) en Driebergen-Zeist (Db) in tijd naar achter zijn verplaatst, zodat de trein daar ook energiezuinig kan rijden. Daarnaast valt op dat de trein later door station Veenendaal West komt en bijna volgens de oude plantijd op station Veenendaal Centrum komt. Daardoor heeft de trein nog steeds minimaal drie minuten aan halteertijd op dit station, om te wachten op de tegentrein uit Rhenen.

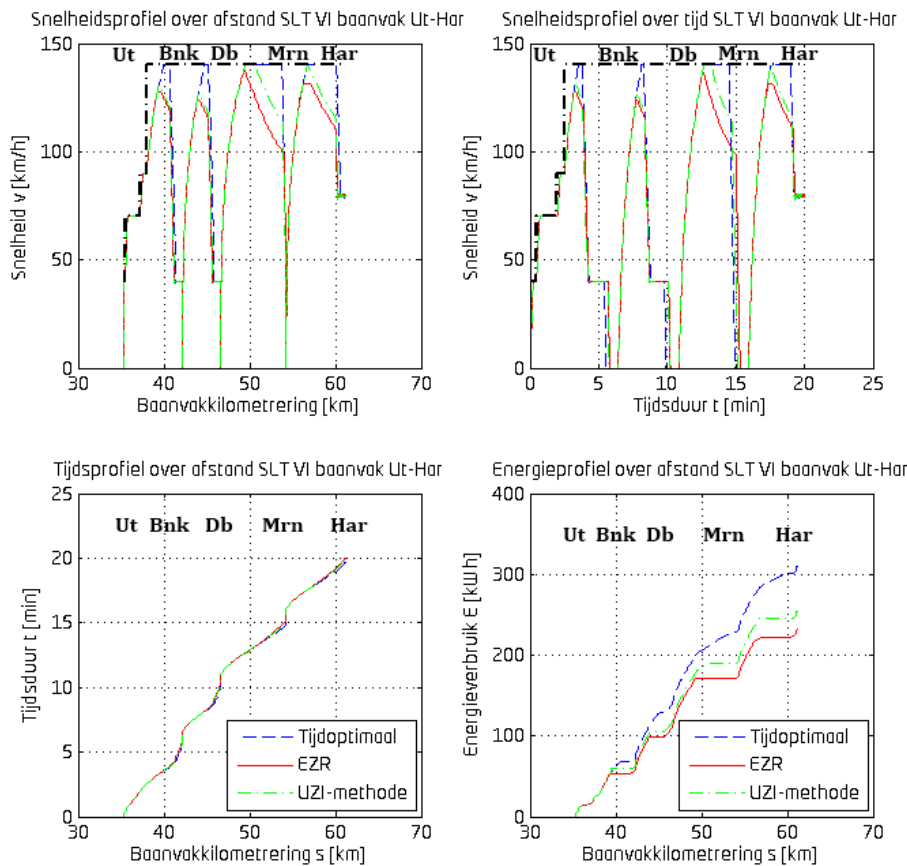


Dienstregelpunt	Activiteit	Plantijd Donna [min]	Tijd-optimaal	Energieoptimaal								
			Rijtijd [s]	Rijtijd [s]	Plantijd model [min]	Speling t.o.v. tijdoptimaal [s]	Speling t.o.v. tijdoptimaal [%]	Herverdeelde speling [s]	Herverdeelde speling [%]	Nieuwe rijtijd [s]	Nieuwe plantijd [min]	
Ut	V	43			43,0							43,0
Ut14	D		28,4	28,4		0,0	0,0%	0,0	0,0%	28,4		
Ut17	D		90,3	90,3		0,0	0,0%	0,0	0,0%	90,3		
Ut19	D		30,7	30,7		0,0	0,0%	0,0	0,0%	30,7		
Bnk	K	49	182,8	182,8	49,1	0,0	0,0%	15,8	8,6%	198,6		49,4
Db	K	53	211,2	211,2	53,3	0,0	0,0%	18,2	8,6%	229,4		53,8
Mrn	K	59	247,5	308,7	59,0	61,2	24,7%	21,4	8,6%	268,9		58,9
Har	D	3	226,2	240,0	3,0	13,8	6,1%	19,5	8,6%	245,8		3,0
<b>Deeltotaal Ut - Har</b>			1.017,1	1.092,1		75,0	7,4%	75,0	7,4%	1.092,1		
<b>Deeltraject Ut19 - Har</b>			867,7	942,6		75,0	8,6%	75,0	8,6%	942,6		
Vndw	K	8	253,2	264,0	8,0	10,8	4,3%	45,8	18,1%	299,0		8,6
Vndc	A	12	134,4	240,0	12,0	105,6	78,6%	24,3	18,1%	158,7		11,9
Vndc	V	15			15,0							15,0
Rhn	A	21	344,0	359,9	21,0	15,9	4,6%	62,2	18,1%	406,2		21,8
<b>Deeltotaal Har - Rhn</b>			731,5	863,9		132,4	18,1%	132,4	18,1%	863,9		
<b>Totaal</b>			1.748,6	1.955,9		207,3	11,9%	207,3	11,9%	1.955,9		

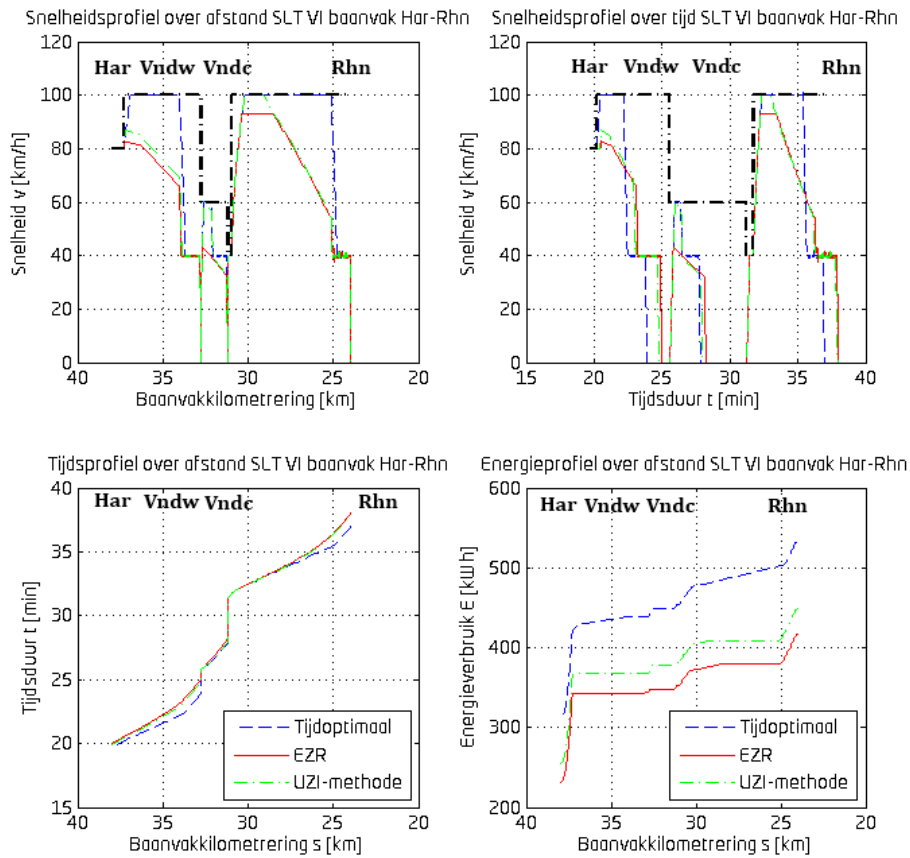
Tabel 5-3: herverdeelde rijtijdspeeling uniform over de deeltrajecten Lak - Har en Har - Rhn voor treinserie B7400

Opnieuw is het traject Ut – Rhn opgesplitst in het traject Ut – Har en Har – Rhn. De volgende resultaten zijn voor dit traject verkregen:

- Snelheidsprofiel over afstand traject Ut – Har (linksboven in Figuur 5-15) en Har – Rhn (linksboven in Figuur 5-16) en bijlage 13.2.8 (vergroting van figuren).
- Snelheidsprofiel over tijd traject Ut – Har (rechtsboven in Figuur 5-15) en Har – Rhn (rechtsboven in Figuur 5-16) en bijlage 13.2.8 (vergroting van figuren).
- Tijdsprofiel over afstand traject Ut – Har (linksonder in Figuur 5-15) en Har – Rhn (linksonder in Figuur 5-16) en bijlage 13.2.8 (vergroting van figuren).
- Energieprofiel over afstand traject Ut – Har (rechtsonder in Figuur 5-15) en Har – Rhn (rechtsonder in Figuur 5-16) en bijlage 13.2.8 (vergroting van figuren).
- Energieverbruik per sectie en in totaal Tabel 5-4) samen met de karakteristieken van de energieoptimale rijstrategie en de UZI-methode.



**Figuur 5-15: snelheidsprofielen, tijdsprofiel en energieprofiel op het baanvak Ut – Har (zwarte gestreepte lijn geeft maximum toegestane snelheid weer)**



**Figuur 5-16: snelheidsprofielen, tijdsprofiel en energieprofiel op het baanvak Har - Rhn (zwarte gestreepte lijn geeft maximum toegestane snelheid weer)**



Sectie	Maximum baanvak-snelheid [km/h]	Energieverbruik per rijstrategie							
		Tijdoptimaal	Energieoptimaal				UZI-methode		
		Energie-verbruik [kWh]	Energie-verbruik [kWh]	Optimale kruis-snelheid [km/h]	Optimale uitrol-moment [baanvak km]	Energie-verbruik [kWh]	Uitschakel-snelheid [km/h]	Uitschakel-moment voor volgend dienst-regelpunt [min]	
Ut14	40	4,3	4,3	40	-	4,3	-	-	
Ut17	70	12,2	12,2	70	-	12,2	-	-	
Ut19	90	9,6	9,6	90	-	9,6	-	-	
Ut - Bnk	140	41,9	28,1	127,4	39,67	33,7	135	-	
Bnk - Db	140	71,2	56,6	124,5	44,03	57,7	125	-	
Db - Mrn	140	89,7	60,2	137,8	49,40	72,5	-	2	
Mrn - Har	140	81,6	60,4	131,3	57,10	64,4	140	-	
Har1	80	5,3	5,3	80	-	5,3	-	-	
Har - Vndw	100	18,5	1,7	82,8	37,24	3,4	85	-	
Vndw - Vndc	60	10,3	4,7	43,1	32,64	9,0	60	-	
Vndc1	40	4,3	4,3	40	-	4,3	-	-	
Vndc - Rhn	100	78,9	64,3	93,0	28,50	66,5	-	5	
<b>Totaal</b>		427,8	311,7			343,1			

Tabel 5-4 per rijstrategie en karakteristieken voor energieoptimale rijstrategie en UZI-methode voor traject Ut - Rhn (opmerking: bij de UZI-methode is of de uitschakelsnelheid (snelheid waarbij tractie wordt uitgeschakeld) gegeven of het uitschakelmoment (tijdstip voor aankomsttijd/doorkomsttijd volgend dienstregelpunt waarop de tractie wordt uitgeschakeld))



Uit de bovenstaande analyse blijkt dat door de herverdeling van de rijtijdspeling het mogelijk is om tussen alle stations energiezuinig te gaan rijden. Tabel 5-4 laat de resultaten zien van het energieverbruik van de verschillende rijstrategieën per sectie. De besparingen per sectie verschillen aanzienlijk, maar liggen verhoudingsgewijs wel dicht bij elkaar. Dit komt doordat op de ene sectie nu meer rijtijdspeling beschikbaar is dan voor de andere ten opzichte van de verdeling uit Donna. Uit de analyse blijkt dat de energieoptimale rijstrategie in totaal 27,1% minder energie verbruikt dan de tijdoptimale rijstrategie op het traject Utrecht Centraal – Rhenen. Dit is een besparing van € 11,61 per rit op de energiekosten. De UZI-methode verbruikt 19,8% minder energie dan de tijdoptimale rijstrategie op het gehele traject (besparing van € 8,47 per rit). Op het traject Utrecht Centraal – Rhenen valt er met de energieoptimale rijstrategie nog 9,1% aan energie te besparen ten opzichte van de UZI-methode, oftewel een besparing van € 3,14 per rit.

Vergeleken met de rijtijdspelingverdeling vanuit Donna (zie Tabel 5-3) blijkt dat de energieoptimale rijstrategie nu 9,4% zuiniger is (een besparing van € 3,22 per rit). De UZI-methode is 5,5% zuiniger bij de uniform verdeelde rijtijdspeling ten opzichte van de Donna verdeling (een besparing van € 2,02 per rit). Naast het feit dat de trein nu tijdig op de stations Bunnik en Driebergen-Zeist komt, zorgt de herverdeling van de rijtijdspeling ook voor aanzienlijke mogelijkheden in energiebesparing. Een grondige analyse van de besparingen in energieverbruik per sectie staat beschreven in bijlage 13.2.

### **Conclusie herverdeling rijtijdspeling**

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat door de herverdeling van de rijtijdspeling het mogelijk is om tussen alle stations energiezuinig te gaan rijden. Bovendien blijkt tevens dat hierdoor zowel in de energieoptimale rijstrategie als bij de toepassing van de UZI-methode er meer mogelijkheden zijn om energiezuinig te rijden. Zo is er voor de energieoptimale rijstrategie een besparing mogelijk van 9,4% (€ 3,22 per rit) en voor de UZI-methode is een besparing van 5,5% (€ 2,01 per rit) mogelijk. Daarnaast komt de trein nu tijdig op de stations Bunnik en Driebergen-Zeist. Daardoor verbetert de punctualiteit op het traject Utrecht Centraal – Rhenen dus ook. Bovendien heeft de herverdeling geen gevolgen voor overige treinen op het traject, want de achterliggende 3000 IC serie naar Nijmegen (Nm) is het dichtst achter de treinserie 7400 bij Har. Aangezien de doorkomsttijd hier gehandhaafd blijft, treden er dus geen veranderingen op. Tevens heeft de trein dezelfde vertrektijd in Ut.

### **5.2.5 Conclusie**

Uit de verificatie wordt allereerst geconcludeerd dat het model resultaten genereert die aan de verwachtingen voldoen. Ook blijkt dat het algoritme in het model het theoretische optimum goed benaderd. Desondanks is het van belang om in vervolgonderzoek de daadwerkelijke wiskundige formulering in MATLAB te krijgen.

Uit de toepassing van het model op het baanvak van de pilot blijkt dat er slechts een beperkt aantal secties zijn waar energiezuinig gereden kan worden. Dit komt met name door het straktrekken van de dienstregeling. Met de energieoptimale rijstrategie is een besparing van 19,6% (€ 8,39 per rit) mogelijk in energieverbruik ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie. De UZI-methode presteert in de optimale condities ook erg goed, met een besparing van 15,1% (€ 6,46 per rit) ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie. Er valt dus in theorie nog een extra besparing te halen van 5,3% (€ 1,93 per rit) gegeven de huidige dienstregeling. Uit bijlage 6 blijkt dat er wekelijks 263 ritten worden gemaakt van Utrecht Centraal naar Rhenen. Hiermee is het mogelijk om jaarlijks bijna € 26.400 aan energiekosten op dit traject te besparen met de energieoptimale rijstrategie ten opzichte van de UZI-methode.

Indien de huidige rijtijdspeling wordt herverdeeld volgens een uniforme verdeling blijkt dat er nog extra besparingen mogelijk zijn, zonder dat dit gevolgen heeft voor omliggende treinen. De trein vertrekt dezelfde tijd uit Ut en Vndc en heeft dezelfde doorkomsttijd te Har. Met de energieoptimale rijstrategie is een extra besparing mogelijk van 9,4% (€ 3,22 per rit) en met de UZI-methode is een extra besparing van 5,5% (€ 2,01 per rit) mogelijk. Jaarlijks zijn dit besparingen van bijna € 44.000 respectievelijk bijna € 27.500 op het traject Ut – Rhn. Dit laat zien dat het idee van het straktrekken ook voor energiezuinig rijden ongunstig is, naast het feit dat de trein op de stations aan begin van het baanvak niet punctueel rijdt. Aanbevolen wordt om verder onderzoek te doen naar de optimale rijtijdspelingverdeling, op een zodanige manier dat de veiligheid niet in het geding komt en de punctualiteit en de mogelijkheid tot energiezuinig te rijden verbeterd.

## 5.3 Validatie

Nu de resultaten vanuit de verificatie bekend zijn is het mogelijk om het model te gaan valideren. Daarbij wordt onderzocht of de modelresultaten overeen komen met de praktijk. De validatie is enkel uitgevoerd voor het tijdoptimale deel van het model, omdat er geen energiegegevens per treinrit bekend zijn. Allereerst worden de gegenereerde rijtijden vergeleken met de rijtijden uit de praktijk. Dit gebeurt aan de hand van de bandbreedtegrafiek van de treinserie 7400 vanuit Trento. Daarnaast worden de rijtijden vergeleken met de rijtijden uit Donna waarin de dienstregeling ontworpen wordt.

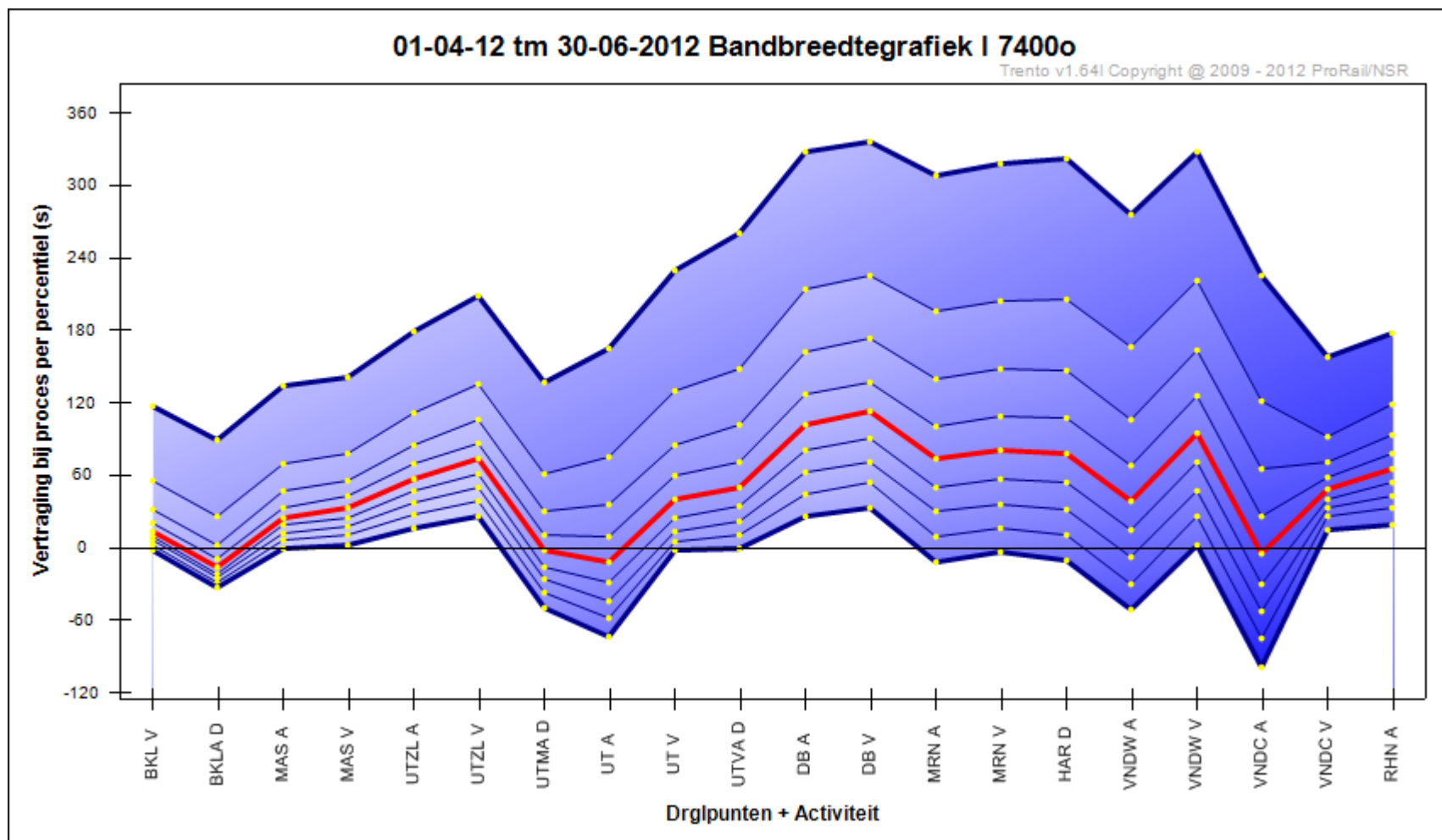
### 5.3.1 Bandbreedtegrafiek

De bandbreedtegrafiek uit Trento van de 7400 oneven serie gedurende de periode 1 april t/m 30 juni 2012 is te vinden in Figuur 5-17. Uit dit figuur valt af te leiden dat de meerderheid van de treinen te laat is op de dienstregelpunten Utrecht Centraal tot en met Veenendaal West. Het vijftig percentiel (rode lijn) schommelt op dit gedeelte van het traject constant rond de 1 minuut vertraging en deze vertraging loopt tot en met Driebergen-Zeist op (bij station Bunnik is er geen detectiepunt en wordt er dus geen data gemeten). Ook uit het model blijkt dat de trein op zowel station Bunnik als Driebergen-Zeist in de tijdoptimale strategie met 8,2 s respectievelijk 15,4 s te laat binnenkomt (gegeven ideale omstandigheden).

Toch blijkt het tiende percentiel van alle treinen te vroeg op station Maarn aan te komen en die treinen blijven daar vervolgens de vertrektijd afwachten. Dit komt overeen met de resultaten uit het model. Deze laten ook zien dat er tussen Driebergen-Zeist en Maarn relatief veel rijtijdspeling zit (ruim 1 minuut). Hierdoor kunnen de treinen volgens het model (in ideale omstandigheden) ruim een minuut voor de oorspronkelijke aankomsttijd binnen komen en zouden ze vervolgens de vertrektijd moeten afwachten. De opgelopen vertraging blijft volgens de bandbreedtegrafiek bij De Haar aansluiting ongeveer gelijk. Het model laat zien dat als de trein op tijd uit Maarn vertrekt, deze voldoende speling heeft om op tijd door dienstregelpunt Har te komen en zelfs energiezuinig te rijden.

Tussen De Haar aansluiting en station Veenendaal West zit enige rijtijdspeling. Dit blijkt zowel uit de modelresultaten als uit de bandbreedtegrafiek. Uit de bandbreedtegrafiek blijken de lijnen van de percentielen duidelijk af te nemen bij aankomst te station Veenendaal West. Vervolgens nemen de percentielen sterk toe bij het vertrek uit Veenendaal West. De reden hiervan is de stop-door schakeling op dit station, waardoor de spoorbomen van de overweg pas sluiten en het sein veilig wordt gegeven als de trein op het station tot stilstand is gekomen. De bandbreedtegrafiek laat daarna zien dat er ruim voldoende speling is om op tijd in Veenendaal Centrum te komen; veel treinen komen er zelfs te vroeg aan. Dit blijkt ook uit het model, want bij de tijdoptimale rijstrategie komt de trein 105,6 s te vroeg aan op station Veenendaal Centrum.

De treinen vertrekken vervolgens wel te laat uit station Veenendaal Centrum volgens de bandbreedtegrafiek, waardoor de halteertijd op station Veenendaal Centrum vrij lang wordt (circa vijf minuten). Dit komt doordat de tegentrein uit station Rhenen volgens de planning precies op het moment station Veenendaal Centrum moet binnenrijden als de trein naar Rhenen moet vertrekken. Dit blijkt in de praktijk veelal niet haalbaar, waardoor de trein in Veenendaal Centrum langer moet wachten totdat de rijweg door ARI (Automatische Rijweginstelling) veilig is gesteld. De treinen halen in de praktijk daarom de geplande aankomsttijd in Rhenen ook niet. Ook hier lijkt de dienstregeling erg strak te zijn getrokken, doordat de treinen tussen vertrek uit Veenendaal Centrum en aankomst in Rhenen extra vertraging oplopen. Het model laat zien dat er in ideale omstandigheden 16 s speling is, maar deze speling is niet voldoende. Energiezuinig rijden kan op dit traject meer gestimuleerd worden door een latere vertrektijd uit Veenendaal Centrum op te geven en de aankomsttijd in Rhenen te verruimen. Immers staat de trein daar toch 19 minuten te keren, terwijl de minimale keertijd van SLT zes minuten bedraagt. Ook kan het eerder laten vertrekken uit Rhenen een interessante optie zijn, zodat de trein eerder op station Veenendaal Centrum aankomt en dus minder hinder voor de tegentrein naar Rhenen veroorzaakt.



Figuur 5-17: bandbreedtegrafiek sprintersserie 7400 oneven traject Breukelen - Rhenen periode 1 april 2012 t/m 30 juni 2012

### 5.3.2 Model vs. Donna

In deze subparagraaf wordt het model vergeleken met de resultaten uit Donna, waarmee de uiteindelijke dienstregeling in de praktijk wordt ontworpen. Allereerst worden de kale rijtijden vergeleken. Daarna wordt de rest van de dienstregeling bekeken.

#### *Rijtijden*

Met de modelresultaten van de tijdoptimale rijstrategie is het mogelijk om te onderzoeken in hoeverre de resultaten van de kale rijtijd uit Donna haalbaar zijn. De resultaten van deze analyse zijn te vinden in Tabel 5-5. Uit deze resultaten blijkt dat de rijtijden op het traject Utrecht Centraal naar Lunetten aansluiting kruispunt (Lak) in het model iets lager zijn dan Donna. Dit ligt onder andere aan het vertrekpunt in Utrecht Centraal. In Donna is deze gegeven op spoor 11b, terwijl het model gebruik maakt van spoor 14b. De reden voor deze afwijking is het feit dat tijdens de Donna fase spoor 14 werd verbouwd, terwijl tijdens de pilot fase dit perron weer beschikbaar is gekomen. Aangezien de dienstregeling tijdens de pilot getest is, is spoor 14b gekozen als vertrekpunt. Hierdoor kan het zijn dat de rijweginstelling gunstiger is, waardoor de trein eerder door de dienstregelpunten Utva en Lak gaat. Het verschil wordt steeds minder, doordat de trein een stijgende helling berijdt. Donna houdt geen rekening met hellingen voor reizigerstreinen, waardoor Donna de situatie te gunstig inschat.

Tussen Lak en Driebergen-Zeist (Db) zijn bij Donna de rijtijden veel lager dan volgens het model. Op dit trajectdeel zitten er een aantal stijgende hellingen. Dit zijn ook precies de trajecten die in de praktijk niet haalbare tijden zijn voor machinisten op de 7400 serie.

Tussen Driebergen-Zeist en Maarn goederen emplacement (Mrg) is er ook sprake van een stijgende helling. Toch blijkt hier de rijtijd vanuit het model korter te zijn dan volgens Donna. Mogelijk worden op trajecten met stijgende hellingen indirect correctiefactoren toegepast, immers rijdt de trein hier door de Utrechtse Heuvelrug. Het lijkt er in ieder geval op dat in Donna rekening is gehouden op dit trajectdeel met de stijgende hellingen.

Van Maarn goederen emplacement naar Maarn (Mrn) is er sprake van een dalende helling, waardoor de trein zelfs eerder op station Maarn komt dan volgens Donna. Dit geldt ook voor het traject van Maarn naar de Haar aansluiting (Har).

Ook voor de secties Mrn – Har, Har – Vndw (Veenendaal West) en Vndw – Vndwo (Veenendaal West overloopwissels) zijn de rijtijden van Donna beduidend lager dan het model berekent. Een mogelijke verklaring ligt ook hier bij het feit dat er sprake is van stijgende hellingen, waarmee Donna geen rekening houdt. De rijtijdspeling is echter op dit trajectdeel wel voldoende, waardoor de trein wel op tijd op de dienstregelpunten komt.

Bij het traject van Vndwo naar Vndc (Veenendaal Centrum) blijkt dat het model veel meer rijtijd nodig is dan volgens Donna. In dit geval ligt dat niet aan het feit dat er een helling is, want er is sprake van een lichte neergaande helling. Mogelijk is het seinbeeld in Donna anders dan in het model. Het kan zijn dat Donna er vanuit gaat dat de trein opschakelt tot aan de baanvaksnelheid (80 km/h), terwijl in de praktijk de maximumsnelheid 60 km/h is, vanwege het seinbeeld geel zes. Ook kan het zijn dat het rempunt in Donna voor het afremmen met het ATB remcriterium naar 40 km/h op een andere punt begint dan in het model.

Ten slotte is ook voor het traject Vndc – Rhn (Rhenen) meer rijtijd nodig vanuit het model dan in de praktijk. Dit komt doordat de trein richting Rhn een helling op rijdt, waarmee Donna geen rekening houdt.

Geconcludeerd wordt dat de belangrijkste oorzaak voor de verschillen tussen het model en Donna zitten in het feit dat Donna geen rekening houdt met hellingen voor reizigerstreinen. Deze blijken toch een aanzienlijke invloed te hebben op het traject Utrecht Centraal – Rhenen. Ook het feit dat Donna nog niet gevalideerd is kan ertoe bijdragen dat de Donna rijtijden afwijken van de modelresultaten. Aanbevolen wordt om Donna zo snel mogelijk te laten valideren, zodat de berekende tijden beter overeen komen met de praktijk.

Dienstregel- punt	Acti- viteit	Plantijd [min]	Donna kale rijtijd [s]	Model tijdoptimaal		
				Kale rijtijd [s]	Model- Donna [s]	(Model- Donna/Donna) [%]
Ut	V	43				
Utva	D	45	96,0	82,5	-13,5	-14,1%
Lak	D	46	54,0	52,7	-1,3	-2,5%
Bnk	K	49	156,0	197,1	41,1	26,3%
Db	K	53	192,0	211,2	19,2	10,0%
Mrg	D	57	186,0	179,8	-6,2	-3,4%
Mrn	K	59	72,0	67,8	-4,3	-5,9%
Har	D	3	228,0	226,2	-1,8	-0,8%
Vndw	K	8	228,0	253,2	25,2	11,0%
Vndwo	D	9	42,0	33,6	-8,5	-20,1%
Vndc	A	12	84,0	100,8	16,8	20,0%
Vndc	V	15				
Rhn	A	21	330,0	344,0	14,0	4,2%

Tabel 5-5: Donna kale rijtijden (zonder rijtijdspeling) gebaseerd op de B7400 treinserie vs. model tijdoptimaal (afwijking modeluitkomsten ten opzichte van Donna)

### Dienstregeling

Naast de rijtijden is ook de dienstregeling geanalyseerd. De dienstregeling is vergeleken met de gegeven Donna dienstregeling (plantijden) en met de kwart minuut dienstregeling van de pilot van NS Reizigers (zie Tabel 5-6). De tijden vanuit de plantijd en vanuit de kwart minuten dienstregeling komen goed met elkaar overeen. De tijden in de kwart minuten dienstregeling geven enkel nauwkeuriger het tijdspad aan dat de machinist dient te volgen. De verschillen met het berekende model zijn wel aanzienlijk. Zo komt de trein volgens het model eerder door de dienstregelpunten Utva en Lak. Het model laat echter zien dat de trein te laat door Bunnik en Driebergen-Zeist komt met de tijdoptimale rijstrategie. Uit de plan- en kwart minuten tijden blijkt duidelijk dat de tijden zijn strakgetrokken. De tijden bij Mrg tot en met Vndwo zijn ongeveer aan elkaar gelijk. De aankomsttijd te Veenendaal Centrum is bij het model gelijk aan de plantijd, terwijl de kwart minuten tijd daar twee minuten voor aankomt. Het is immers in de praktijk niet heel erg gewenst om met een snelheid van 30 km/h te gaan uitrollen (voor de beleving reizigers en de veiligheid ten aanzien van overwegen die langer dicht liggen). Ten slotte zijn de tijden tussen Vndc en Rhn ook nagenoeg gelijk.



Dienstregelpunt	Activiteit	Plantijd [min]	Kwart minuten tijd [min]	Berekende tijd model [min]
Ut	V	43	43,00	43,00
Utva	D	45	44,75	44,37
Lak	D	46	45,75	45,25
Bnk	K	49	48,50	49,14
Db	K	53	52,25	53,26
Mrg	D	57	56,25	56,48
Mrn	K	59	58,50	59,00
Har	D	3	3,00	3,00
Vndw	K	8	7,50	8,00
Vndwo	D	9	8,75	8,85
Vndc	A	12	10,00	12,00
Vndc	V	15	15,00	15,00
Rhn	A	21	20,75	21,00

Tabel 5-6: vergelijking dienstregeling model met plantijden en kwart minuten tijden (geven aankomsttijd van machinist weer bij korte stop)

### 5.3.3 Conclusie

Uit de validatie wordt geconcludeerd dat de modelresultaten van de tijdoptimale rijstrategie goed overeen komen met de praktijk. Zo blijkt uit de bandbreedtegrafiek duidelijk dat de treinen op het begin van het baanvak richting Rhenen te laat op de station Driebergen-Zeist komen. Het model laat ook zien dat dit in de tijdoptimale strategie niet haalbaar is. Vervolgens blijkt in het tweede gedeelte van het baanvak veel rijtijdspeling te zitten. In de bandbreedtegrafiek blijkt dit uit het feit dat de lijnen dichter richting de 0 minuten vertraging lijn lopen. In het model blijkt dit doordat er rijtijdspeling ontstaat waarmee de trein energiezuinig kan rijden.

Tevens blijkt uit de analyse van de rijtijden dat de tijden uit Donna veelal lager zijn dan die uit het model in de tijdoptimale rijstrategie. Een mogelijke oorzaak hiervoor is dat Donna geen rekening houdt met baanweerstand (voor reizigerstreinen), terwijl op het traject wel wat hellingen aanwezig zijn. Het model houdt hier wel rekening mee, waardoor dit beter de werkelijkheid nabootst. Aanbevolen wordt om Donna grondig te valideren en te onderzoeken of het ook mogelijk is om hellingen ook bij reizigerstreinen mee te nemen.

Daarnaast blijkt uit de analyse van de dienstregeling dat de bestaande dienstregeling en de kwart minuten dienstregeling redelijk zijn strakgetrokken. Dit betekent dat er op het begin van het traject Ut – Rhn geen speling is en in het tweede deel van het traject veel speling is. De dienstregelingtijden tussen Ut en Db zijn hierdoor niet haalbaar. Dit blijkt ook duidelijk uit de tijden vanuit het model. Aanbevolen wordt om de dienstregeling realistischer op te stellen, zodat deze ook over het hele traject haalbaar is. Indien dat niet mogelijk is, is het van belang om dit minstens te communiceren met de machinisten, om hun vertrouwen in de dienstregeling te laten behouden. Daarnaast is het ook in het kader van de betrouwbaarheid van de dienstregeling voor de klant van belang om op tussenstations tijden te geven die realistisch zijn en niet zodanig dat klanten merken dat de trein standaard te laat aankomt en vertrekt. Door realistischere dienstregelingtijden verbetert mogelijk ook het imago van de trein voor de klant, vooral voor degene die op de strakgetrokken tussenstations staan te wachten.

Tot slot is alleen het tijdoptimale deel van het model gevalideerd. Voor de validatie van het energieoptimale model zijn praktijkmetingen nodig van het energieverbruik van de

energieoptimale rijstrategie of van de UZI-methode per treinrit. Aanbevolen wordt om hier vervolgonderzoek naar te doen.

## 5.4 Pilot NS Reizigers

Op het moment van schrijven van de afstudeerscriptie was de pilot nog niet afgerond. Daarom is gekozen om in dit rapport de tussenresultaten van de pilot te verwerken. Deze tussenrapportage is op 18 oktober 2012 uitgevoerd om de machinisten feedback te geven over de stand van zaken met betrekking tot de pilot. Op dat moment was de pilot bijna twee maanden in uitvoering. De terugkoppeling is opgesteld naar aanleiding van feedback van de machinisten die deelnamen aan de pilot. Zij deden dit deels schriftelijk, maar daarnaast heeft het projectteam van de pilot ook alle machinisten individueel gebeld om hun feedback te vragen. De belangrijkste opmerkingen vanuit deze tussenpeiling zijn als volgt:

- Het eerste stuk traject vanuit Utrecht Centraal (tot en met Driebergen-Zeist) is niet logisch ingelegd wat tijd betreft om energiezuinig te kunnen rijden. De tijden kloppen ook niet met de realiteit (door straktrekken). Machinisten gaven daarbij aan welke tijden wel haalbaar zijn en die zij dus ook rijden in de praktijk.
- De rol van de hoofdconductor (hc) is heel erg belangrijk in verband met het scherp op tijd willen vertrekken.
- De meeste machinisten gaven aan dat het een verbetering is om met behulp van kleinere tijdseenheden te rijden, omdat het hen een betere referentie gaf op hun tijdspad.
- De secundewijzer in het dienstkaartje ontbreekt op het beeldscherm van de Railpocket. Deze wordt toegevoegd.
- Een groot aantal machinisten heeft volgens het kwart minuten dienstkaartje kunnen rijden en geeft ook aan dat het beter bij de realiteit komt dan het originele dienstkaartje.
- Geef in plaats van locaties op doorkomstpunten ook extra punten in de vorm van kilometreringen aan. Dit geeft machinisten meer handvatten om de dienstregeling punctueel te kunnen rijden (meer controlepunten om te checken of de machinist nog op het tijdspad rijdt).

## 5.5 Case studie

In deze paragraaf worden de resultaten van de case studie besproken. Allereerst wordt de praktijkmeting behandeld. Daarin wordt een vergelijking gemaakt tussen de theoretische uitkomsten van het model en de uitkomsten van de praktijk. Daarna wordt de paragraaf afgerond met een conclusie.

### 5.5.1 Analyse praktijkmeting

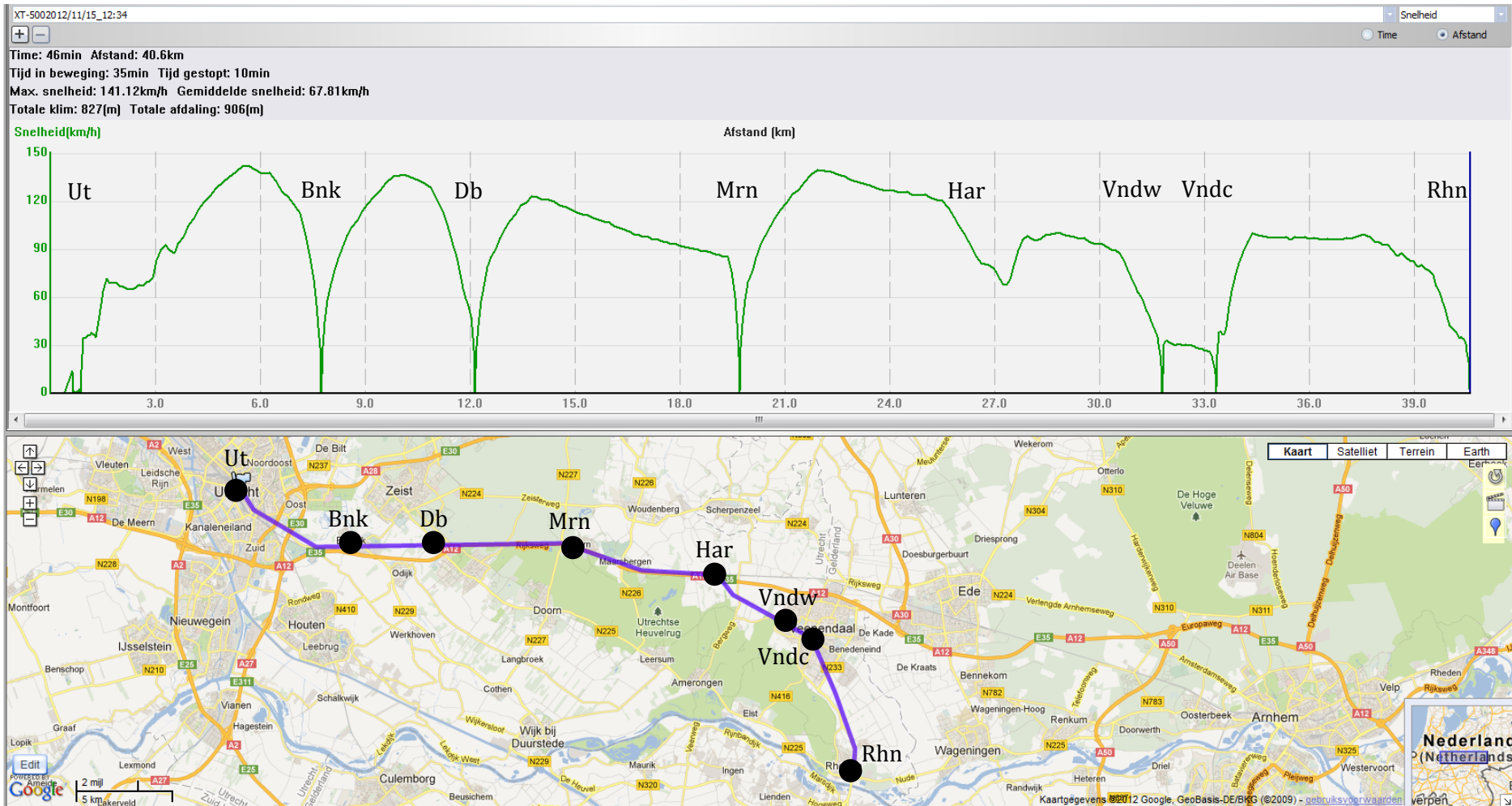
De modelresultaten zijn toegepast in de praktijk. Dit is gebeurd op donderdag 15 november 2012 voor treinnummer 7443 met vertrektijd 12:43 uit station Utrecht Centraal richting Rhenen. Hiervoor is met behulp van het model een dienstregeling ontworpen die door de machinist van de treinrit indien mogelijk zoveel mogelijk is gevolgd. Het dienstkaartje dat hiervoor gebruikt is, is te vinden in Tabel 5-7.

De trein (SLT VI met treinstelnummer 2655) werd in zijn geheel bediend door mensen van de afdeling Materieel en Energie van NS Reizigers. De trein is bestuurd door machinist Lex Veldhuis. Tijdens de testrit reed hij zo goed mogelijk de dienstregeling volgens het model. Tevens gaf Gerben Scheepmaker hem de nodige instructies, zodat hij zich zoveel mogelijk op het rijden van de trein kon focussen. De hoofdconductor was Dolf ter Horst en de tweede conductor was Ralph Luijt. Beiden hebben hun best gedaan om het vertrekproces zo optimaal mogelijk te laten verlopen en dat is ook gelukt. De GPS tracker voor de GPS metingen is tien minuten voor vertrek in Ut aangezet om tijdig data te registreren. Deze verrichtte om de 5 s een meting. Het resultaat van de meting is te vinden in Figuur 5-18 (snelheidsprofiel) en Figuur 5-19 (tijdsprofiel). In Tabel 5-8 zijn de locaties van de dienstregelpunten uit de beide figuren nauwkeuriger weergegeven.

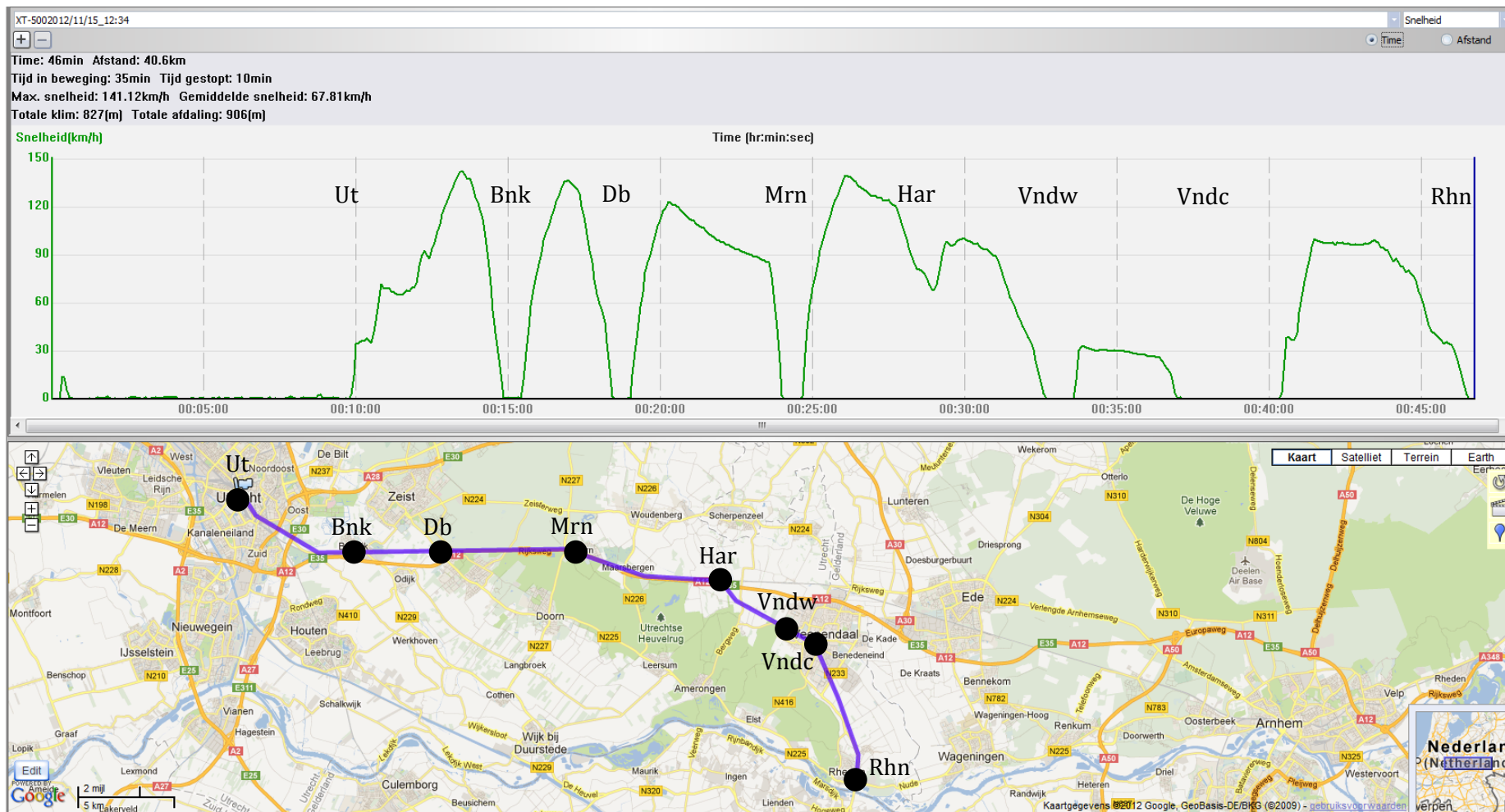


Dienstregel-punt	Acti-viteit	Berekende tijd model [uur:min:s]	Maximum-snelheid [km/h]	Uitschakel-punt [km]	Uitschakelpunt element	Remmen tot seinbeeld/bord element	Rempunt voor remmen tot stilstand [km]	Rempunt element
Ut	V	12:43:00	40					
Utva	D	12:44:24	70					
Lak	D	12:45:18	90					
Bnk	K	12:49:00	140			P-sein 905 (40,661 km)	42,108	Ruim 50 m voor bediend sein 907 (42,150 km)/einde perron Bnk
Db	K	12:53:00	140			P-sein 913 (45,160 km)	46,550	Ruim 50 m voor bediend sein 114 (46,592 km)/einde perron Db
Mrg	D	12:56:30	123	48,667	iets voor P-sein 915 (48,675 km)		54,104	Ongeveer begin perron Mrn ( $v = 77 \text{ km/h}$ )
Mrn	K	12:59:00						
Har	D	13:03:00	139	56,965	iets voor P-sein 929 (56,97 km)	Bediend sein 156 (60,005 km)		
Vndw	K	13:08:00	98	35,756	Ongeveer 150 m voor P-sein 555 (35,595 km)	P-sein 557 (29,823 km)	32,822	Ongeveer begin perron Vndw
Vndwo	D	13:08:48	32	32,688	iets na overweg De Reede (32,706 km)	Snelheidsvermindering-bord 4 (32,150 km)	31,225	Ruim 50 m voor bediend sein 224 (31,216 km)/einde perron Vndc
Vndc	A	13:12:00						
Vndc	V	13:15:00						
Rhn	A	13:21:00	98	26,786	iets voor overweg Noordelijke Meentsteeg (27,881 km)	Voorsein 569 (25,118 km)	24,017	Circa 50 m voor stootjuk (23,975 km)

Tabel 5-7: dienstkaartje energieoptimale rijstrategie voor treinnummer 7443



Figuur 5-18: resultaat case studie snelheidsprofiel over afstand met Google Earth afbeelding van het meettraject (inclusief belangrijkste dienstregelpunten)



Figuur 5-19: resultaat case studie tijdsprofiel over afstand met Google Earth afbeelding van het meettraject (inclusief belangrijkste dienstregelpunten)



Dienstregelpunt	Locatie volgens Figuur 5-18 [km]	Activiteit	Tijd volgens Figuur 5-19 [h:min:s]	Rijtijd praktijk [s]	Rijtijd model [s]
Ut	0,883	V	00:09:45	305	332
Bnk	7,758	A	00:14:50	180	211
		V	00:15:25		
Db	12,148	A	00:18:25	305	309
		V	00:19:00		
Mrn	19,709	A	00:24:05	230	240
		V	00:24:40		
Har	26,726	D	00:28:30		
Vndw	31,801	A	00:32:40	250	264
		V	00:33:35	205	240
Vndc	33,340	A	00:37:00	380	260
		V	00:40:20		
Rhn	40,592	A	00:46:40		
Totaal afgelegde afstand	39,709	Totaal benodigde tijd	00:36:55	1.855	1.956

Tabel 5-8: dienstregelpunten locaties in Figuur 5-18 en Figuur 5-19 (A = aankomst, D = doorkomst en V = vertrek) en rijtijden (praktijk en model)

De trein kwam redelijk laat Utrecht Centraal binnen, doordat de voorliggende 3143 intercity naar Nm te laat vertrok en daardoor vertrok de sprinter ook een minuut te laat uit Ut (beide treinen vertrokken van spoor 14). Deze vertraging was echter bij Bunnik al ingehaald, want de trein blijkt in de praktijk sneller te kunnen rijden dan de tijdoptimale rijstrategie in theorie (zie Tabel 5-8). De weersomstandigheden waren ook erg gunstig. Zo was het wel bewolkt met windkracht 1 Bft uit zuidoostelijke richting, maar was het spoor droog (geen slippen), waardoor het gebruik van de maximale acceleratie en remstand 4 voor remmen tot stilstand goed toegepast kon worden. Ook waren er relatief weinig reizigers, waardoor de halteertijd van 0,6 minuut bij korte stops gehaald werd.

Allereerst blijkt uit de praktijkmeting dat de gegeneerde dienstregeling van de energieoptimale rijstrategie uit het model haalbaar is. De trein kwam op tijd aan op alle stations en ook was de doorkomsttijd van De Haar aansluiting op tijd. Uit Tabel 5-8 blijkt zelfs dat de trein minder rijtijd nodig heeft dan het model stelt in de energiezuinige rijstrategie.

Ten tweede blijkt dat de acceleratiefase van de verschillende secties korter te zijn in de praktijk dan in het model. Uit de resultaten in Tabel 5-9 blijkt dat op het traject Ut – Har de benodigde afstand om de maximale snelheid te bereiken voor het model groter is dan de praktijk. Tevens blijkt de trein in de praktijk niet altijd de kruissnelheid te rijden. Op een aantal secties was de acceleratieafstand groter, maar dit komt doordat de trein op dat moment niet met maximale tractie versnelde.

Ten derde blijkt dat de kruisfase of ‘cruising’ fase in de praktijk beduidend korter duurde dan het model voorzag, zie Tabel 5-9. Op een aantal secties blijkt de trein zelfs direct na acceleratie over te zijn gegaan in uitrollen.



Tevens bleek ook dat de uitroleigenschappen van SLT VI in de praktijk gunstiger te zijn dan in het model. Zo had de trein een hogere snelheid bij de uitrolfase van Driebergen-Zeist naar Maarn. Volgens het model had de snelheid hier ongeveer 77 km/h moeten zijn, terwijl in de praktijk deze snelheid circa 87 km/h was. Daarnaast blijkt dit ook tussen Veenendaal West en Veenendaal Centrum sterk. Nadat de trein hier had opgeschakeld tot een snelheid van 32 km/h, had de trein nog een snelheid van bijna 26 km/h voor het remmen op station Veenendaal Centrum. Tevens kwam de trein zelfs enige seconden te vroeg aan (zie Tabel 5-8). Tot slot bleek dat in de praktijk meer afstand beschikbaar was voor uitrollen dan volgens de theorie (zie Tabel 5-10).

Ten vijfde blijkt de remfase in de praktijk anders te zijn dan die in de theorie. Volgens het model dient de trein na een ATB remming nog de snelheid constant te moeten houden (tweede kruisfase). In de praktijk blijkt dit niet het geval te zijn, want de trein kan van de remstand 1 gelijk overgaan naar remstand 4. Dit blijkt het duidelijkste uit Figuur 5-18 en Figuur 5-19 bij de stations Bunnik, Driebergen-Zeist en Veenendaal West. Dit laat zien dat remstand 1 in het model te sterk is. Daardoor kwam er in de praktijk geen tweede kruisfase voor (zie Tabel 5-9). Uit Tabel 5-10 blijkt tevens dat de remming in remstand 4 langer duurt dan de theorie. Dit komt mede door het feit dat de snelheid aan het begin van de remfase hoger is dan volgens de theorie, waardoor er een grotere afstand nodig is om de trein tot stilstand te brengen.

Uit het bovenstaande blijkt dus dat de praktijkuitkomst gunstiger is dan die van het model. Een mogelijke oorzaak hiervoor is het feit dat de coëfficiënten van de treinkarakteristieken te conservatief zijn opgesteld door Lloyd's Register Rail. Ook was er sprake van gunstige weersomstandigheden (geen gladde sporen en weinig wind), terwijl de coëfficiënten mogelijk geijkt zijn op minder gunstige omstandigheden.



Sectie	Acceleratiefase				Kruisfase of 'cruising' fase					
					Maximumsnelheid		Afwijkende (ATB) maximumsnelheid			
	Model		Praktijk		Model	Praktijk	Model		Praktijk	
	Afstand [m]	Maximumsnelheid [km/h]	Afstand [m]	Maximumsnelheid [km/h]	Afstand [m]	Afstand [m]	Afstand [m]	Maximumsnelheid [km/h]	Afstand [m]	Maximumsnelheid [km/h]
Ut14	74	40	67	36	168	352				
Ut17	219	70	306	68	1.485	1.330				
Ut19	310	90	228	89	420	383				
Ut19 - Bnk	2.035	140	1.948	141	640		738	40		
Bnk - Db	2.629	140	2.038	136	351	380	700	40		
Db - Mrn	1.804	123	1.624	123	271					
Mrn - Har	2.394	139	2.239	139	311		880	80		
Har1		80		68	685					
Har - Vndw	335	98	583	98	1.193	954	978	40		
Vndw - Vndc	46	32	135	33	46					
Vndc1	74	40	73	38	181					
Vndc - Rhn	736	98	801	97	3.435	3.211	923	40		144
Totaal	10.656		10.042		9.185	6.610	4.219		772	

Tabel 5-9: acceleratie- en kruisfase afstanden model vs. praktijk per sectie



Sectie	Uitrolfase		Remfase				Totaal	
			Remstand 1 (ATB remcriterium)		Remstand 4 (tot stilstand remmen)			
	Model	Praktijk	Model	Praktijk	Model	Praktijk	Model	Praktijk
	Afstand [m]	Afstand [m]	Afstand [m]	Afstand [m]	Afstand [m]	Afstand [m]	Totale afstand [m]	Totale afstand [m]
Ut14							242	419
Ut17							1.704	1.636
Ut19							730	611
Ut19 - Bnk			740	869	42	620	4.195	4.209
Bnk - Db		729	720	1.132	42	105	4.442	4.384
Db - Mrn	5.436	5.599			156	339	7.668	7.562
Mrn - Har	3.035	3.567	280	1.099			6.900	6.905
Har1		731					685	731
Har - Vndw	1.726	1.700	230	1.068	42	151	4.505	4.456
Vndw - Vndc	1.463	1.231			7	173	1.562	1.539
Vndc1		166					255	239
Vndc - Rhn	1.672	1.932	180	751	37	138	6.983	6.833
Totaal	13.334	15.860	2.150	5.457	327	995	39.871	39.5

Tabel 5-10: uitrol- en remfase en totale afstanden model vs. praktijk per sectie

### 5.5.2 Conclusie case studie

Geconcludeerd wordt uit de case studie dat het model toepasbaar is in de praktijk. Wel blijkt sterk dat de eigenschappen van de treinweerstanden in theorie mogelijk minder gunstig zijn afgesteld dan deze in de praktijk zijn (mogelijk te conservatief afgesteld door Lloyd's Register Rail). Dit houdt in dat bijvoorbeeld de treinweerstand groter is in theorie, dan deze in de praktijk blijkt te zijn. Dit verklaart wellicht het feit dat de trein langer uitrolt in de praktijk dan het model stelt. Ook is de remkracht van remstand 1 in de praktijk minder krachtig als die volgens het model (toepasbaar bij een geel seinbeeld). In de praktijk moet de trein zelfs bij remmen om op tijd tot stilstand te komen, terwijl het model stelt dat de trein een tweede 'cruising' fase nodig heeft.

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat de treinkarakteristieken mogelijk te conservatief zijn opgesteld door Lloyd's Register Rail. Aanbevolen wordt om deze waardes opnieuw te onderzoeken en indien noodzakelijk te (her)ijken aan de hand van praktijkmetingen. Ook wordt aanbevolen om grondiger onderzoek naar de remkarakteristieken te doen, aangezien de remfase van de trein complexer is dan op basis van de huidige gegevens kan worden gemodelleerd (remkracht is niet constant, maar afhankelijk van de snelheid).

Wel dient er vermeld te worden dat er ideale omstandigheden waren: zo was er geen neerslag, bijna geen wind, goede rijweginstelling, goede samenwerking met de hoofdconducteur en conducteur, een goede gemotiveerde machinist en een tegentrein bij Vndc die te vroeg binnen kwam (waardoor op tijd vertrokken kon worden uit Vndc naar Rhn). Daarnaast is het in de praktijk niet mogelijk om met een gegeven papieren dienstkaartje exact het snelheidsprofiel van het model te volgen, hiervoor is de hulp nodig van exacte locatiemeting (bijvoorbeeld met behulp van een 'Driver Advisory System'). Tevens is er gebruik gemaakt van een model, dat slechts een deel van de werkelijkheid representeert. Bovendien is er sprake van slechts één meting en dienen de uitspraken niet direct gegeneraliseerd te worden. Om wetenschappelijk betrouwbare uitspraken te doen, wordt het sterk aanbevolen om meerdere praktijkmetingen uit te voeren.

## 6 Conclusies

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om energiezuinig rijden (EZR) beter te waarborgen in de dienstregeling. Daarbij is een model in MATLAB opgesteld dat de energieoptimale rijstrategie berekent. De hoofdvraag van dit onderzoek luidde:

*Welke stappen moeten worden gezet zodat er een model ontstaat waarmee het uitrolmoment en de kruissnelheid bepaald worden en daarmee de rijtijdspeeling zo goed mogelijk verdeeld wordt?*

Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een model waarmee het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid voor treinen en de daarbij behorende rijtijdspeelingverdeling bepaald kunnen worden; rekening houdend met de gewenste robuustheid, de mogelijkheden om energiezuinig te rijden en de gewenste punctualiteit in de dienstuitvoering. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste resultaten samengevat aan de hand van de onderzoeksvragen en daaruit worden conclusies getrokken. In de volgende paragrafen worden de verschillende deelvragen beantwoord.

### *Hoe werkt energiezuinig rijden en wat levert het op?*

Uit onderzoek in de literatuur is gebleken dat EZR betekent dat een machinist de trein zodanig bestuurt, dat het tractie-energieverbruik verlaagd wordt. Een machinist kan energiezuinig rijden indien de veiligheid niet in het geding komt en de trein op tijd rijdt. In dat geval wordt de rijtijdspeeling die beschikbaar is gebruikt om energiezuinig te rijden. De voordelen van EZR zijn dat een trein minder energie verbruikt, wat bijdraagt aan de vermindering van de CO<sub>2</sub> uitstoot en een vermindering van de kosten aan energie voor de vervoerder betekent. Ook wordt hierdoor de belasting en de slijtage op de infrastructuur en het materieel verminderd en is de geluidshinder minder, doordat de trein veelal met een lagere snelheid rijdt. Dit levert voor de vervoerder en de infrastructuurbeheerder besparingen op voor beheer en onderhoud. Tot slot zorgt energiezuinig rijden ervoor dat het rijcomfort voor de reizigers en de conducteurs verbetert, bijvoorbeeld doordat de trein met een minder hoge snelheid door een afbuigend wissel heen rijdt.

### *Wat is de huidige stand van zaken bij de rijtijdspeelingverdeling?*

Literatuuronderzoek laat zien dat de huidige stand van zaken met betrekking tot rijtijdspeeling in Nederland is dat de verdeling in principe wordt gedaan op basis van de plannormen volgens de Netverklaring. Dit gebeurt door de planners in het dienstregelingontwerpprogramma Donna. Het ontwerp van de dienstregeling in Donna is echter nog niet optimaal, doordat conflicten niet automatisch worden gecontroleerd, Donna nog niet gevalideerd is, er onhaalbare randvoorwaarden worden gesteld en doordat de dienstregeling wordt strakgetrokken. Vanuit de planfase wordt er op dit moment dus onvoldoende aandacht besteed aan energiezuinig rijden. Om de punctualiteit te verbeteren voert NS Reizigers onderzoek uit naar het model SOM, waarmee de rijtijdspeelingverdeling verbeterd wordt. Het is echter nog niet duidelijk welke effecten dit op het totale energieverbruik van treinen in het netwerk heeft.

### *Hoe kan met de gegeven data een model ontwikkeld worden om het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid te bepalen?*

In MATLAB is een model gebouwd waarmee de optimale rijstrategie bepaald kan worden. Het algoritme in het model is gebaseerd op de optimale besturingstheorie en bepaalt met behulp van de variabelen (uitrolmoment en kruissnelheid) de rijstrategie waarbij het energieverbruik (gegeven de tijd uit de dienstregeling) wordt geminimaliseerd. Met behulp van de vergelijkingen die het gedrag van een trein omschrijven (rijregimes), de infrastructuur data, de materieeldata, de gegeven dienstregeling en gegevens uit de praktijk, is het model gebouwd, getoetst en toegepast.

### ***Hoe verhouden de modelresultaten zich met de bestaande energiezuinig rijden methodes?***

Het model in MATLAB is vergeleken met de bestaande NS Reizigers methode voor energiezuinig rijden: de UZI-methode. De analyse is toegepast op het traject Utrecht Centraal – Rhenen voor de sprinterserie 7400 met materieeltype SLT VI. De resultaten laten zien dat dit traject op dit moment niet ideaal is voor EZR. De strakgetrokken dienstregeling zorgt ervoor dat de trein standaard te laat op de stations Bunnik en Driebergen-Zeist komt en vervolgens op een aantal secties zeer veel speling heeft. Op de secties waar energiezuinig gereden kan worden blijkt dat de energieoptimale rijstrategie uit het model een besparing oplevert van 19,6% ten opzichte van de tijdoptimale rijstrategie op het gehele traject. Dit komt neer op een financiële besparing van € 8,39 per rit voor de energieoptimale rijstrategie, gegeven het feit dat NS Reizigers € 0,10 per kWh aan elektriciteitsverbruik betaalt. De UZI-methode, tezamen met de ervaring en wegbekendheid van een machinist, levert in ideale omstandigheden een besparing op van 15,1% (€ 6,46 per rit) op het gehele traject. Daarmee valt er voor NS Reizigers in theorie nog een extra besparing op het traject te behalen van 5,3% (€ 1,93 per rit) door de toepassing van de energieoptimale rijstrategie op het traject Utrecht Centraal – Rhenen. Jaarlijks levert dit een besparing op van bijna € 26.400 aan energiekosten op dit traject.

### ***Welk verband is er tussen de modelresultaten en de werkelijkheid?***

De validatie van het model toont aan dat de resultaten goed overeenkomen met de praktijk. Het effect van het straktrekken van de dienstregeling komt in de praktijk sterk naar voren, doordat de treinen op het begin van het traject standaard te laat aankomen en verder op het traject te vroeg aankomen. Daarnaast blijkt ook uit de vergelijking van de rijtijden van het model met de rijtijden uit Donna, dat de rijtijden uit Donna veelal korter zijn dan die van het model. De reden hiervan is dat Donna nog niet gevalideerd is en voor reizigerstreinen hellingen niet meegenomen worden in Donna, terwijl het model daar wel rekening mee houdt. Ook laat de vergelijking van de dienstregeling van het model met de dienstregeling van Donna en de 'kwart minuten' pilot zien dat de dienstregeling tussen Utrecht Centraal en Driebergen-Zeist niet haalbaar is. Ten slotte is het model succesvol eenmalig toegepast in de praktijk. De rijtijden uit de ontworpen energieoptimale dienstregeling waren haalbaar. Bovendien is gebleken dat de treinkarakteristieken mogelijk te conservatief zijn afgesteld. Zo bleek de trein in de praktijk langer uit te rollen en minder krachtig te remmen om aan het ATB remcriterium te voldoen.

### ***Leidt het toepassen van het opgestelde model tot een verbetering van de rijtijdspeling?***

Daarnaast is onderzocht of energiezuinig rijden meer baten heeft bij een andere verdeling van de totale rijtijdspeling. Hieruit is gebleken dat bij een uniforme verdeling van de rijtijdspeling extra energiebesparingen mogelijk zijn, zonder dat omliggende treinen gehinderd worden. Bij de energieoptimale rijstrategie is een besparing van 9,4% (€ 3,22 per rit) mogelijk en voor de UZI-methode is een besparing van 5,5% (€ 2,01 per rit) mogelijk op het traject Utrecht Centraal – Rhenen. Jaarlijks is dit op het totale traject een besparing bij de energieoptimale rijstrategie van bijna € 44.000 en bij de UZI-methode van bijna € 27.500. Ook hieruit blijkt dat het straktrekken van de dienstregeling niet gewenst is wanneer EZR wordt toegepast.

Uiteindelijk is een werkend model in MATLAB opgesteld dat resultaten genereert die het optimum zeer goed benaderen. Het model bepaalt, gegeven de gewenste robuustheid en de gewenste punctualiteit in de dienstuitvoering, de energieoptimale rijstrategie door het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid te bepalen. Het is echter niet gelukt om het model uit te breiden om de optimale rijtijdspelingverdeling te bepalen.

Desondanks dient te worden vermeld dat het model slechts een model is dat de werkelijkheid vereenvoudigd weergeeft. In de praktijk is EZR veel complexer, doordat verschillende factoren het succes ervan bepalen, zoals de machinist, de hoofdconductor, de treindienstleider, het weer, het type materieel, de drukte op de perrons, de vertraging en de rijtijdspeling. De winst die verwacht wordt te behalen door een nauwkeuriger model, is dat hierdoor een beter advies aan de machinist gegeven kan worden en dit kan tot meer energiebesparingen leiden.



## 7 Aanbevelingen

Op basis van de conclusies uit het vorige hoofdstuk worden de volgende aanbevelingen gedaan.

### 1. *Laat het idee van het straktrekken van de dienstregeling los*

De huidige manier van rijtijspelingverdeling is niet optimaal. Door het straktrekken blijken treinen op bepaalde trajectdelen standaard te laat te komen en bovendien niet energiezuinig te kunnen rijden. Onderzoek naar het herverdelen van de rijtijspeling en het loslaten van het idee van het straktrekken van de dienstregeling is sterk gewenst.

### 2. *Valideer Donna*

Een andere oorzaak voor het feit dat de dienstregelingstijden niet haalbaar zijn, wordt mogelijk veroorzaakt door het feit dat het dienstregelingontwerpprogramma Donna niet gevalideerd is. Daarbij is het ook van belang om te onderzoeken of de baanweerstand meegenomen kunnen worden bij de berekening van de rijtijden van reizigerstreinen. Onderzoek hiernaar wordt sterk aanbevolen.

### 3. *Onderzoek mogelijkheden bij de planning van de dienstregeling om EZR mee te nemen*

Bij de planning wordt nog geen rekening gehouden met EZR. Dit onderzoek laat zien dat er met EZR veel besparingen mogelijk zijn, voor zowel de vervoerder als voor de infrastructuurbeheerder. Door EZR eerder in de ontwerpketen van de dienstregeling mee te nemen, is uiteindelijk minder inspanning nodig om EZR succesvol toe te passen en zijn de baten van EZR mogelijk groter. Aanbevolen wordt om vervolgonderzoek te doen naar hulpmiddelen waarmee tijdens de planning rekening met EZR gehouden kan worden. Op dit moment vindt onderzoek plaats hoe EZR (UZI-methode) in DONS meegenomen kan worden. Een andere mogelijkheid is om te onderzoeken in hoeverre het mogelijk is om het energieverbruik bij de ontworpen treinpaden weer te geven in Donna, omdat hiermee de uiteindelijke dienstregeling ontworpen wordt. Een mogelijkheid is het onderzoeken naar het weergeven van de snelheidsprofielen (snelheid-afstand diagrammen) in Donna van de ontworpen treinseries. Deze snelheidsprofielen tonen de tijdoptimale rijstrategie indien er geen rijtijspeling is en de UZI-methode indien er rijtijspeling is. Daarbij kan onderzocht worden of het energieverbruik en/of de energiebesparing kan worden weergegeven, die bepaald kunnen worden vanuit de snelheidsprofielen. Hiermee is het mogelijk om een goede afweging te maken tussen het straktrekken van de dienstregeling en het creëren van rijtijspeling voor energiezuinig rijden.

### 4. *Onderzoek de mogelijkheden om de UZI-methode verder te verbeteren*

De energiebesparingen kunnen worden vergroot bij NS Reizigers door naast het optimale uitrolmoment, ook de optimale kruissnelheid mee te nemen bij de UZI-methode. Dit onderzoek laat zien dat de combinatie van beide leidt tot een betere benadering van de energieoptimale rijstrategie. Vervolgonderzoek naar deze verbetering bij de UZI-methode wordt sterk aanbevolen.

### 5. *Onderzoek de gevolgen van SOM op het totale energieverbruik van treinen*

NS Reizigers voert onderzoek uit naar het model SOM dat zorgt voor verbeteringen van de rijtijspelingverdeling. Dit model wordt in de nabije toekomst gebruikt om een compleet ontworpen dienstregeling te optimaliseren door een cyclische dienstregeling te zoeken met zo min mogelijk gewogen vertraging voor treinen gegeven een verstoringsscenario. Op dit moment is niet duidelijk welke gevolgen dit heeft op het totale energieverbruik van treinen. Aanbevolen wordt om hier verder onderzoek naar te doen.

#### 6. *Voer meer praktijkmetingen uit en (her)ijk mogelijk de parameters van het model*

Tijdens de case studie van het model is gebleken dat de praktijkresultaten gunstiger waren dan de resultaten van het model. Aangezien er slechts één meting is verricht wordt allereerst aanbevolen om meerdere praktijkmetingen van het model uit te voeren. Indien ook deze aantonen dat de praktijkresultaten gunstiger zijn dan de theorie, wordt aanbevolen om de treinweerstandcoëfficiënten opnieuw grondig te analyseren en mogelijk te (her)ijken. Tevens is het ook gewenst om een grondige analyse uit te laten voeren naar de remkracht. Deze remkracht kan bijvoorbeeld geanalyseerd worden aan de hand van de verzamelde GPS data van de gemeten treinritten. Dit is van belang om het daadwerkelijke optimum van energiezuinig rijden beter te benaderen.

#### 7. *Valideer het energieoptimale deel van het model*

Het tijdoptimale deel van het model is in dit onderzoek gevalideerd aan de hand van de bandbreedtegrafiek uit Trento en de rijtijden uit Donna. De energieoptimale rijstrategie in het model is nog niet gevalideerd, omdat hiervoor gegevens nodig zijn van het tractie-energieverbruik per rit. Dit kan aan de hand van energiegegevens van het model zelf (praktijkmeting) of aan de hand van energiegegevens van de UZI-methode (bijvoorbeeld met behulp van energiemeters). Aanbevolen wordt om in vervolgonderzoek het energieoptimale deel van het model te valideren.

#### 8. *Analyseer de verzamelde GPS data*

Daarnaast is voor het onderzoek veel GPS data op het baanvak Utrecht Centraal – Rhenen geregistreerd. Deze data is echter nog niet verwerkt of geanalyseerd. Deze data kan gebruikt worden in een mogelijk vervolgonderzoek om bijvoorbeeld de correctiefactoren in Trento te valideren of om het uitrolmoment in het model te kalibreren.

#### 9. *Onderzoek de mogelijkheden naar de optimale rijtijdspelingverdeling*

Het oorspronkelijk doel van dit onderzoek was om een model te ontwikkelen dat naast de optimale rijstrategie ook de optimale rijtijdspelingverdeling bepaalt. Dit had het uitgebreide of 'extention' (XT) model moeten zijn. In deze situatie wordt de dienstregeling op tussenstations losgelaten en worden alleen de aankomsttijden op knopen, cruciale dienstregelpunten (zoals aansluitingen) en eindstations gebruikt. Het XT model bepaalt daarmee niet alleen het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid, maar ook de optimale verdeling van de rijtijdspeling om te zorgen voor zowel een robuuste dienstregeling als een dienstregeling met de mogelijkheid tot energiezuinig rijden. Vervolgonderzoek naar dit model wordt sterk aanbevolen om op die manier ook de huidige manier van rijtijdspelingverdeling in Nederland te kunnen verbeteren.

#### 10. *Implementeer de wiskundige formules van de optimale besturingstheorie in MATLAB*

Het model blijkt het theoretische optimum goed te benaderen. In dit onderzoek is de optimale rijstrategie opgelost met behulp van het algoritme en gegeven de vorm van het snelheidsprofiel van de optimale rijstrategie. Hiermee is het mogelijk om het optimale uitrolmoment en de optimale kruissnelheid te bepalen. Een andere methode om het theoretisch optimum te bepalen is met behulp van de toepassing van de gegeven wiskundige differentiaalvergelijkingen in MATLAB. Aanbevolen wordt om hier in een vervolgonderzoek verder naar te kijken, waarmee onderzocht kan worden of deze alternatieve methode sneller een oplossing genereert.

## 8 Literatuurlijst

- Adkins, W. A., & Davidson, M. G. (2009). *Ordinary Differential Equations*. New York, NY, Verenigde Staten van Amerika: Springer.
- Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., & Xuan, V. (2011, June 29 2011-July 1 2011). *Optimal train control: Analysis of a new local optimization principle*. Paper presented at the American Control Conference (ACC), 2011.
- Albrecht, T. (2008). Energy-Efficient Train Operation. In I. A. Hansen & J. Pachl (Eds.), *Railway Timetable & Traffic* (pp. 83-105). Hamburg, Duitsland: Eurailpress/DVV Media Group.
- Albrecht, T., Binder, A., & Van Luipen, J. (2008). BEA-online evaluation. Utrecht, Nederland/Dresden, Duitsland: ProRail/TU Dresden.
- Albrecht, T., Gassel, C., Binder, A., & van Luipen, J. (2010). Dealing with operational constraints in energy efficient driving. *IET Seminar Digests, 2010*(13342), 22-28.
- Albrecht, T., Gassel, C., Knijff, J., & van Luipen, J. (2010). *Analysis of energy consumption and traffic flow by means of track occupation data*. Paper presented at the IET Conference on 13-15 April 2010, Railway Traction Systems (RTS 2010).
- Albrecht, T., Goverde, R. M. P., Weeda, V. A., & Van Luipen, J. (2006). Reconstruction of Train Trajectories from Track Occupation Data to Determine the Effects of a Driver Information System. In J. Allen, C. A. Brebbia, A. F. Rumsey, G. Scuitto, S. Sone & C. J. Goodman (Eds.), *Computers in Railways VIII* (pp. 207-216). Southampton, Verenigd Koninkrijk: WIT Press.
- ATOC (2008). Energy and Carbon. Londen, Verenigd Koninkrijk: Association of Train Operating Companies (ATOC).
- Bai, Y., Mao, B., Zhou, F., Ding, Y., & Dong, C. (2009). Energy-Efficient Driving Strategy for Freight Trains Based on Power Consumption Analysis. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 9*(3), 43-50. doi: 10.1016/s1570-6672(08)60062-8
- Brünger, O., & Dahlhaus, E. (2008). Running Time Estimation. In I. A. Hansen & J. Pachl (Eds.), *Railway Timetable & Traffic*. Hamburg, Duitsland: Eurailpress/DVV Rail Media Group.
- Bruning, P. (2011). Trento - Gebruikershandleiding. Utrecht, Nederland: Prestatie Analyse Bureau (PAB), Verkeerleiding (VKL), ProRail.
- Coleman, D., Howlett, P. G., Pudney, P. J., Vu, X., & Yee, R. (2010). *Coasting boards vs optimal control*. Paper presented at the IET Conference on 13-15 April 2010, Railway Traction Systems (RTS 2010).
- Davies, K., Hinton, J., Thorley, P., & Buse, D. (2007). Feasibility of Head-Up Displays in Driving Cabs. Londen, Verenigd Koninkrijk: Rail Safety & Standards Board (RSSB).
- Desprez, C. (2011). *Optimal strategy driving for traction energy saving*. Paper presented at the 9th World Congress on Railway Research (WCRR) on 22-26 Mei 2011, Lille, Frankrijk.
- ECORYS (2011). Monitor VoortVarend Besparen Eindmeting. Rotterdam, Nederland: ECORYS Nederland BV.
- Franke, F. (2012). Energiezuinig Rijden. Utrecht, Nederland: NS Reizigers.
- Freek, R., & Hessels, E. (1999). Beschrijving energiemodellen van reizigersmaterieel. Utrecht, Nederland: NedTrain Consulting BV.
- Goverde, R. M. P. (2011). Lecture 2: Energy-efficient train operation (PowerPoint). *CT5803-09 Railway Traffic Management (2010-2011 Q4)* Retrieved 20 April, 2011, from <https://blackboard.tudelft.nl/webapps/portal/frameset.jsp>
- Goverde, R. M. P., Hansen, I. A., Van Nes, R., & Wiggenraad, P. B. L. (2008). *CT4811 Design and Control of Public Transport Systems*. Delft, Nederland: TU Delft.
- Goverde, R. M. P., Kecman, P., & Sparing, D. (2011). PETER practicum (CT5803-09 Railway Traffic Management). Delft, Nederland: TU Delft.
- Hansen, I. A., Opstal, P. C. H., & Wiggenraad, P. B. L. (2011). *Dictaat CT3711 Geometrisch Ontwerpen van Wegen en Spoorwegen*. Delft, Nederland: TU Delft.
- HNR (2012). Het Nieuwe Rijden (HNR) Retrieved 9 Mei, 2012, from <http://www.hetnieuwerijden.nl/>

- Hoefakker, H., Lodder, G., Muste, R., De Jong, R., Smouter, W., Kuppen, H., . . . Lammers, R. (2010). *Zakboekje Machinisten NSR + +*. Utrecht, Nederland: NS Reizigers.
- Hoogenraad, J. H. (2010). Methode relatief energieverbruik 16000-13600. Utrecht, Nederland: NS Reizigers.
- Hoogenraad, J. H. (2011). EZR monitoring (PowerPoint). Utrecht, Nederland: NS Reizigers.
- Howard, P. (2007). *Solving ODE in MATLAB*. Houston, TX, Verenigde Staten van Amerika: Rice University.
- Howlett, P. G. (1996). Optimal strategies for the control of a train. *Automatica*, 32(4), 519-532. doi: 10.1016/0005-1098(95)00184-0
- Howlett, P. G. (2000). The Optimal Control of a Train. *Annals of Operations Research*, 98(1), 65-87. doi: 10.1023/a:1019235819716
- Howlett, P. G., Milroy, I. P., & Pudney, P. J. (1994). Energy-efficient train control. *Control Engineering Practice*, 2(2), 193-200. doi: 10.1016/0967-0661(94)90198-8
- Howlett, P. G., & Pudney, P. J. (1995). *Energy-Efficient Train Control*. Londen, Verenigd Koninkrijk: Springer-Verlag.
- Howlett, P. G., Pudney, P. J., & Vu, X. (2009). Local energy minimization in optimal train control. *Automatica*, 45(11), 2692-2698. doi: 10.1016/j.automatica.2009.07.028
- Huerlimann, D., & Nash, A. B. (2010). OpenTrack Simulation of Railway Networks Version 1.6. Zürich, Zwitserland: OpenTrack Railway Technology Ltd. and ETH Zurich Institute for Transport Planning and Systems.
- Huisman, T. (2011). Programma Noord Nederland. Utrecht, Nederland: ProRail Vervoer & Dienstregeling (VACO).
- Kent, S. (2009). Driver advisory information for energy management and regulation Stage 1 Report - Appendices. Londen, Verenigd Koninkrijk: DeltaRail.
- Kroon, L. G., Huisman, D., & Maróti, G. (2008). Optimisation Models for Railway Timetabling. In I. A. Hansen & J. Pachl (Eds.), *Railway Timetable & Traffic* (pp. 135-154). Hamburg, Duitsland: Eurailpress/DVV Media Group.
- Kroon, L. G., Maróti, G., Helmrich, M. R., Vromans, M., & Dekker, R. (2008). Stochastic improvement of cyclic railway timetables. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6), 553-570. doi: 10.1016/j.trb.2007.11.002
- Liu, R., & Golovitcher, I. M. (2003). Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(10), 917-932. doi: 10.1016/j.tra.2003.07.001
- Luijt, R. S. (2012a). EZR resultaten rijdend personeel landelijk januari/februari 2012. Utrecht, Nederland: NS Reizigers.
- Luijt, R. S. (2012b). *Specificatie berekenen kwart minuten tijden uit plantijden*. Utrecht, Nederland: NS Reizigers.
- Lukaszewicz, P., & Andersson, E. (2009). *Green Train energy consumption*. Stockholm, Zweden: Royal Institute of Technology (KTH) Railway Group.
- Lüthi, M. (2009). Verifizierung der Stromeinsparung durch ein effizientes Zugmanagement. Beeinflussungen von Zugfahrten. Zürich, Zwitserland: Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich.
- Mathews, J. H., & Fink, K. D. (2004). *Numerical Methods Using Matlab*. Upper Saddle River, N.J., Verenigde Staten van Amerika: Pearson Prentice Hall.
- McClave, J. T., Benson, P. G., & Sincich, T. (2007). *Statistiek*. Amsterdam, Nederland: Pearson Education Benelux BV.
- Meyer, M., & Lerjen, M. (2007). Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Fahrweise, Zugsteuerung und Fahrplangestaltung. Wettingen, Zwitserland: emkamatik GmbH.
- Meyer, M., & Lerjen, M. (2009a). Energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung: Konzept und Systemarchitektur. Wettingen, Zwitserland: emkamatik GmbH.
- Meyer, M., & Lerjen, M. (2009b). Energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung: Simulationen. Wettingen, Zwitserland: emkamatik GmbH.

- Meyer, M., Lerjen, M., Menth, S., Lüthi, M., & Tuchs Schmid, M. (2009). Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugmanagement. Bern, Zwitserland: Bundesamt für Energie BFE.
- Meyer, M., & Menth, S. (2009). Energieeffiziente Eisenbahn-Betriebsführung: Messungen auf Fahrzeugen und Hochrechnungen. Wettingen, Zwitserland: emkamatik GmbH.
- Meyer, M., Menth, S., & Lerjen, M. (2007). Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB. Bern, Zwitserland: Bundesamt für Energie BFE.
- Middelkoop, D. (2011). Een blik in de gereedschappkist (PowerPoint). Utrecht, Nederland: ProRail afdeling Vervoer en Dienstregeling.
- NS (2012a). EZR en UZI Retrieved 28 Februari, 2012, from <http://www.ns.nl/over-ns/ns-en-samenleving/ns-en-samenleving%5B2%5D/energie/zuinig-rijden.html>
- NS (2012b). Wegkennisbank Retrieved 15 oktober, 2012, from <http://www.nslernet.nl/>
- NSR (2005). *Seinenboek*. Utrecht, Nederland: NS Reizigers.
- NSR/Lloyd's (2012). TreinPlein Retrieved 1 Juni, 2012, from [treinplein.net](http://treinplein.net)
- ÖBB (2006). Nachhaltigkeitsbericht 2006. Wenen, Oostenrijk: Österreichische Bundesbahnen (ÖBB-Holding AG).
- Olofsson, U., Leander, P., Gustafsson, S., & Lagos, M. (2007). CATO System Requirements Specification. Sundbyberg, Zweden: Transrail Sweden AB.
- Ostermann, N., Kalivoda, M. T., Oberhauser, A., & Bukovnik, M. (2004). Railergy. Wenen, Oostenrijk: Technische Universität Wien, Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen & psiA-Consult Umweltforschung und Engineering GmbH.
- Papworth, I. (2012). Sustainable Technologies for Rail. Londen, Verenigd Koninkrijk: TTG Transportation Technology Pty Limited.
- Potuijt, J. (2008). Voorbeeld bandbreedtegrafiek. Utrecht, Nederland: ProRail.
- Pratrap, R. (2006). *Getting Started with MATLAB 7*. Oxford, Groot-Britannië: Oxford University Press.
- ProRail (2006). Praktijkproef Het Spoor Meester (Video) Retrieved 24 Mei, 2012, from <http://www.youtube.com/watch?v=rr5LINx03oo>
- ProRail (2010). *Spoorkaart van Nederland*. Utrecht, Nederland: ProRail.
- ProRail (2011a). Beheersplan 2012. Utrecht, Nederland: ProRail.
- ProRail (2011b). Netverklaring 2013. Utrecht, Nederland: ProRail.
- Pudney, P., Albrecht, A., Stolz, C., Ghys, S., & Coleman, D. (2012). *Integrating driving advice with safeworking displays*. Paper presented at the Conference On Railway Engineering, Brisbane, Australië.
- Scheepmaker, G. M. (2010). *Optimalisatie kringenmethode PINO*. BSc, NS Reizigers & Universiteit Twente, Utrecht, Nederland.
- Scheepmaker, G. M. (2011). Basisuurpatroon dienstregelingontwerp 2013. Utrecht, Nederland: ProRail & TU Delft.
- Shampine, L. F., Gladwell, I., & Thompson, S. (2003). *Solving ODEs with MATLAB*. New York, NY, Verenigde Staten van Amerika: Cambridge University Press.
- Shampine, L. F., Kierzenka, J., & Reichelt, M. W. (2000). *Solving Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations in MATLAB with bvp4c*. The tutorial and programs are available at [http://www.mathworks.com/bvp\\_tutorial](http://www.mathworks.com/bvp_tutorial).
- Snel, M. (2011). EMMA voor Energie Meten, Monitoring en Analyse (PowerPoint). Utrecht, Nederland: ProRail.
- Su, S., Li, X., Tang, T., & Gao, Z. (2012). *A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-Efficient Operation Strategy*. Paper presented at the Joint Rail Conference (JRC) 2012, Philadelphia, PA, Verenigde Staten van Amerika.
- Thomas, M., & Davies, K. (2009). *Feasibility of head-up displays in driving cabs*. Paper presented at the Third International Conference on Rail Human Factors Programme, Lille, Frankrijk.



- Tolsma, H. (2007). Een nieuwe trein is dertig procent zuiniger Retrieved 4 juli, 2012, from <http://www.technischweekblad.nl/een-nieuwe-trein-is-dertig-procent-zuiniger.76342.lynkx>
- TRAINER (2008). Inventory of Energy Efficiency Good Practices by the Railways. Utrecht, Nederland: TRAINing programmes to INcrease Energy-efficiency by Railways (TRAINER).
- TTG (2012). *Energymiser*. Sydney, Australië: TTG Transportation Technology Pty Ltd.
- Van den Boom, T., & De Schutter, B. (2012). *Optimization in systems and control*. Delft, Nederland: TU Delft.
- Van Driel, J., & Luremans, P. (2010). *Infra Atlas; Het spoorwagennet in beeld*. Utrecht, Nederland: ProRail.
- Van Engelen, K., Schneijderberg, J., & Verkaaik, R. (2010). Fuel efficiency in uitvoering 2.0. Luchthaven Schiphol, Nederland: KLM Flight Operations.
- Van Gigch, J. M., & Kouijzer, A. J. (1996). Basis Materieelmodel. Utrecht, Nederland: Holland Railconsult.
- Van Himbergen, A., Slats, F., Van der Velde, H., & Van Slooten, E. (2012). Energieverbruik trein, inzicht en maatregelen. Hoofddorp, Nederland: Railforum Nederland.
- Van Til, R., Westerhuis, R., & Stap, J. (2009). Energiezuinig rijden voor machinisten NL (DVD). Hilversum, Nederland: TRAINER/Character Media.
- Vastel, D. (2009). SNCF Energy Savings Program (PowerPoint) Retrieved 1 Juni, 2012, from [http://www.energy-efficiency-days.org/IMG/pdf/24\\_D-Vastel\\_SNCF\\_Energy\\_Saving\\_program\\_of\\_SNCF\\_4th\\_UIC\\_EE\\_24sept09.pdf](http://www.energy-efficiency-days.org/IMG/pdf/24_D-Vastel_SNCF_Energy_Saving_program_of_SNCF_4th_UIC_EE_24sept09.pdf)
- Velthuisen, F., De Vries, A., Van den Hout, S., & Flemming, R. (2012). Feijenoordse Meesters UZI van Freddy Retrieved 24 Mei, 2012, from <http://www.feijenoordsemeesters.nl/UZI%20van%20Freddy.htm>
- Velthuisen, F., & Ruijsendaal, S. (2011). *De-UZI BASIS methode*. Utrecht, Nederland: NS Reizigers.
- Verschuren, P., & Doorewaard, H. (2000). *Het ontwerpen van een onderzoek*. Utrecht, Nederland: Uitgeverij LEMMA BV.
- Wikipedia (2012). List of current systems for electric rail traction Retrieved 30 Mei, 2012, from [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_current\\_systems\\_for\\_electric\\_rail\\_traction](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_current_systems_for_electric_rail_traction)
- Yang, L., Li, K., Gao, Z., & Li, X. (2012). Optimizing trains movement on a railway network. *Omega*, 40(5), 619-633. doi: 10.1016/j.omega.2011.12.001
- Zwier, G. (2008). *Introductie in Matlab, Programmeren, Numerieke Algoritmen en Wiskundig Modelleren*. Enschede, Nederland: Universiteit Twente.

### Foto's

De foto's in dit rapport (p. 1) zijn gemaakt door G.M. Scheepmaker medio februari 2011 op station Bad Bentheim (p. 1 linksonder), medio mei 2012 tijdens het meerijden met machinisten van NS Reizigers (p. 1 overig) en medio december 2012 op station Veenendaal West (bijlage p. 1). Daarnaast is de foto van Gerben Scheepmaker (links) en machinist Freddy Velthuisen (rechts) op p. 5 gemaakt door S. den Hengst medio december 2012 op station Delft.