

Logistiek achter Wiel-Rail-Conditionering



Welke treinstellen moeten uitgerust worden met een WRC systeem om overal in Nederland het spoor te conditioneren?

UNIVERSITEIT TWENTE.



Strukton

ProRail

Master:	Universiteit Twente, Applied Mathematics
Specialisatie:	Industrial Engineering and Operations Research
Leerstoel:	Discrete Mathematics and Mathematical Programming
Dagelijkse begeleiding:	Strukton Systems
Opdrachtgever:	ProRail

S. H. Bisschop – s0088919

s.h.bisschop@student.utwente.nl

Afstudeerdatum: 24 mei 2012

Begeleiders:

Prof.dr. J.L. Hurink (UT)

Dr. J.B. Timmer (UT)

Ing. R.W. Westenberg (Strukton Systems)

Prof.dr.ir. R.P.B.J. Dollevoet (ProRail)

Voorkant: Een momentopname van de treinen die rijden op het Nederlandse spoor van
<http://kubus.mailspool.nl/spoorkaart>

Voorwoord

Voor u ligt het resultaat van bijna een jaar werken. In ieder geval het schriftelijke verslag van het gedane werk. Tijdens mijn stage bij Strukton die begonnen is in april 2011 ben ik voor het eerst betrokken geraakt bij het WRC project. Ik heb mij bezig gehouden met het analyseren van de data die verzameld is door de verschillende meettreinen. Daarnaast heb ik meegedaan bij het installeren van nieuwe WRC systemen op de treinstellen voor de pilot Nijmegen-Zutphen. Met dat mijn interesse gewekt was voor dit mooie project heb ik deze stage dan ook voortgezet in dit afstuderen.

Het afgelopen jaar heb ik bijna elke dag op het kantoor bij Strukton gezeten. Alwaar ik de veranderingen in organisatie, werknemers en de kantine van dichtbij heb mogen meemaken. Ik heb daar een erg leuke tijd gehad, met Roel die boordevol ideeën zit en Hans die elke keer geduldig luistert als ik 's ochtends aan zijn bureau stond met de mededeling: "Hans er gaat iets fout..." Strukton bedankt!

Ook al heb ik het grootste gedeelte van mijn tijd doorgebracht bij Strukton, toch was mijn opdracht grotendeels een ProRail opdracht. Regelmatig ben ik dan ook naar Utrecht getogen om in het mooie gebouw de inktpot te overleggen met ProRail, NSR of DeltaRail. Rolf heeft elke keer in zijn drukke agenda tijd gevonden om mijn vragen te beantwoorden en zijn passie voor het spoor te delen. Daarnaast heb ik mij altijd vermaakt tijdens de overleggen met Freerk en Marcel. ProRail bedankt!

Als laatste betrokkene in het afstudeerproces is er dan nog de UT. Johann heeft regelmatig feedback gegeven op mijn verslag en ondanks een wat uitgelopen planning toch nog tijd gevonden om voor vandaag alles door te lezen en feedback te geven. Na de vele jaren studeren hier aan de UT, waar het bos waar ik ooit begonnen ben nu meer een gebouwencomplex is geworden, voelt dit toch een beetje als thuis. UT bedankt!

Met dit verslag komt er naast een eind aan mijn afstuderen ook een eind aan mijn studententijd. Met enige pijn in mijn hart neem ik afscheid van de mooie jaren die eik hier heb gehad. Naast alle mooie jaren waar ik naast studeren, werken, hobby's en studentenvereniging, zijn er ook wat minder mooie jaren geweest. Gelukkig kun je ook van deze jaren leren en gaan ook deze jaren weer voorbij. Het is een mooie tijd geweest bij Agapè en later de Navigators studentenvereniging Enschede, tijden waarin ik veel over God, mij en mijn medemens mocht leren. Alle leuke mensen die ik hier heb ontmoet en alle vrienden die je daar dan weer aan over houdt maken het leven, ook in lastige tijden, een stuk leuker en interessanter.

Samenvatting

In Nederland neemt de druk op het spoorwegnet toe, met deze toename stijgen ook de kosten voor onderhoud, het betrouwbaar houden van het spoor en de kosten voor geluidsbeperkende maatregelen. Deze laatste kosten geven aanleiding om onderzoek te doen naar nieuwe manieren om deze problemen op te lossen. In dit kader is ProRail, de beheerder van het Nederlandse spoorwegnet, begonnen met een onderzoek om het spoor te conditioneren vanuit al aanwezig rijdend materieel. Deze methode wordt Wiel-Rail-Conditionering (WRC) genoemd. Door vanuit de trein een middel aan te brengen op de spoorstaaf kan de wrijvingsfactor beïnvloedt worden en kan binnen de veiligheidsgrenzen de wrijvingsfactor verlaagd worden. Een lagere wrijvingsfactor betekent minder geluidsproductie. Met name de squeal geluiden, de hoge piepende tonen wanneer een trein door een boog gaat, verdwijnen hiermee.

Het doel van dit onderzoek is te bepalen hoeveel en welke treinstellen uitgerust moeten worden met een WRC systeem om het gehele spoorwegnet te conditioneren. Hierbij wordt gefocused op NSR, de grootste personenvervoerder op het Nederlandse spoor.

Om een antwoord te vinden op deze vraag wordt een korte inleiding gegeven op de theoretische werking van de conditionering. Daarnaast is een overzicht gegeven van de verschillende pilots waarin de conditionering getest wordt. Momenteel gebeurt dit op de Valleilijn, de lijn tussen Amersfoort en Ede-Wageningen en worden proeven gedaan op de lijn Nijmegen-Zutphen. Vanuit deze pilots komt informatie die belangrijk is voor de landelijke uitrol. Met name de duur van de werking van de conditionering die een trein aanbrengt is van groot belang. Dit is nog niet uit de pilots gekomen, maar de indicatie is dat een met WRC uitgerust treinstel voor vijf tot acht andere treinstellen kan conditioneren.

Om een beeld te krijgen van de verspreiding van treinstellen over het Nederlandse spoor is data van NSR geanalyseerd met betrekking tot de eerste helft van de dienstregeling 2011. Vanuit deze data is de spreiding van treinstellen onderzocht en zijn treinstellen ingedeeld in mogelijke regio's.

Voor het bepalen van de treinstellen die uitgerust moeten worden met WRC om landelijke dekking te krijgen zijn vier manieren van aanpak voorgesteld. De vier aanpakken verschillen in complexiteit en zijn gebaseerd op de verschillende pilots of de theoretische werking van conditioneren. Uiteindelijk is uit deze vier aanpakken één aanpak gekozen en deze aanpak is verder uitgewerkt. Het hier aan ten grondslag liggende model heeft als uitgangspunt dat een treinstel dat conditioneert, de conditionering naar een optimaal niveau brengt, door elk treinstel dat daarna passeert degradeert de conditionering, waardoor na een aantal passages de conditionering geheel verdwenen is. De oplossingsmethode is een "local search" methode die specifiek op deze toepassing is aangepast. Hierbij wordt gebruik gemaakt van "simulated annealing" om niet te blijven steken in lokale minima. Daarnaast wordt de rekentijd aanzienlijk verkort door het effectief uitrekenen van de voorwaarden en door het bijhouden van een tabulijst om terugkeren naar eerder gevonden oplossingen te voorkomen. De uiteindelijke rekentijd voor deze methode is teruggebracht tot ongeveer tachtig uur. Deze aanpak is doorgerekend met verschillende parameters waarbij de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor en het aantal treinstellen waarvoor een treinstel kan conditioneren instelbaar is.

Uiteindelijk is voor verschillende combinaties van parameters een toewijzing van de WRC systemen over de verschillende treintype groepen gevonden. Aan het eind worden de randvoorwaarden voor het resultaat geschetst en worden deze resultaten vergeleken met intuïtieve toewijzingen die zijn aangeleverd door ProRail.

Abstract

The Dutch rail network is one of the busiest rail networks in the world. Still the pressure on the network is increasing. With an increasing demand of traffic, also costs for maintenance, reliability and noise reduction increase. This thesis is focussing on the aspect of noise reduction. The Dutch railway manager ProRail has started research to lubricate the railroad by existing rolling stock. This method is called Wheel-Rail-Conditioning (WRC). Trains equipped with WRC lubricate the track and thereby influence the coefficient of friction. By reducing the coefficient of friction to the lowest level within the safety limits, sound production can be reduced, especially the squeal, the high squeaking sound when a train goes through a curve.

The aim of this thesis is to determine how many and which trains in the Netherlands have to be equipped with Wheel-Rail Conditioning (WRC) to achieve a countrywide covering of the track with the lubricant. This thesis is focusing on NSR, the largest passenger carrier on the Dutch railways.

A brief introduction on the theoretical results of lubricating railways is given in order to find a solution. Also a short overview of the different pilots where WRC is tested is given. Currently tests are still in progress, on the Valleilijn, the track between Amersfoort and Ede and on the track between Nijmegen en Zutphen. Out of these pilots crucial information for countrywide implementation needs to be extracted. Especially the duration of a lubricant applied by a train is of great importance.

To get insight in the circulation of trains on the Dutch railway, data of NSR is analysed with respect to the first half of 'dienstregeling 2011'. Out of this data train types are divided in groups with regional bindings.

To determine which trains have to be equipped with WRC, four different approaches are proposed. These approaches differ in complexity and are based on various pilots and theoretical results. One of these approaches is chosen and worked out in depth. The underlying model is based on the fact that trains equipped with WRC fully lubricate a track by passing over it. The lubricant wears by every train passage until no lubricant is left. The solutionmethod is based on local search and built specifically for this application. Hereby it makes use of simulated annealing to avoid being stuck in local minima. In addition computation time is significantly reduced by effectively calculating constraints and by keeping track of a tabulist. These adaptations result in a model that calculates which trains have to be equipped with WRC in about eighty hours. This approach is calculated several times whereby the fraction of passages on unlubricated track and the duration of the lubricant are varied.

For different combinations of parameters an allocation of the WRC units is found for each traintypegroup. An overview is given of the conditions under which the answer holds. The results are also compared to intuitive allocations of WRC units given by ProRail.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	13
1.1	Aanleiding.....	13
1.2	Idee en randvoorwaarden project.....	13
1.3	Probleemstelling opdracht	14
1.4	Opbouw scriptie.....	14
2	Achtergrondinformatie	17
2.1	Planning	17
2.2	Verschillende pilots	17
2.3	Werking conditionering.....	18
2.4	Treinstelplanning	21
3	Treinomloop	25
3.1	Inleiding.....	25
3.2	Beschikbare data.....	25
3.3	Treingroepen bepaling.....	27
4	Verschillende aanpakken	33
4.1	Voorbeeld traject	33
4.2	Aanpak 1 – a -aantal keren conditioneren per dag.....	33
4.3	Aanpak 2 – gemiddeld 1 op de x treinstellen moet conditioneren	36
4.4	Aanpak 3 – Na x treinstellen moet geconditioneerd worden	39
4.5	Aanpak 4 – bij een bepaald niveau van conditionering moet worden geconditioneerd ...	42
4.6	Scenario keuze	45
5	Uitwerking “na x treinstellen moet geconditioneerd worden”	47
5.1	Aannamen.....	47
5.2	Bepaling fractie passages over ongeconditioneerd spoor.....	47
5.3	Local search voor vinden toewijzing.....	48
5.4	Optimalisatie local search.....	51
6	Resultaten	57
6.1	Resultaten opsplitsen in subgroepen.....	57
6.2	Overige inputparameters.....	57
6.3	Resultaten na x treinstellen moet worden geconditioneerd	59
6.4	Vergelijking tussen verschillende modellen.....	62
7	Discussie	65
7.1	Algemeen	65
7.2	Data.....	66

7.3	Model	68
8	Conclusie en aanbevelingen	71
8.1	Vergelijking gewenste en geoptimaliseerde resultaten.....	71
8.2	Interpretatie resultaten	72
8.3	Modelkeuze.....	72
8.4	Aanbevelingen	72
9	Bibliografie	73
10	Bijlage A: Gebruikte symbolen	75
11	Bijlage B: Literatuur proces.....	79
11.1	Zoekvragen en zoekstrategie	79
12	Bijlage C: Geselecteerde trajecten.....	83
13	Bijlage D: Realisatie planning treinsteltype	87
14	Bijlage E: Probleem oplossing per traject	89
14.1	Volgorde trajecten	89
14.2	Iteratief oplossen.....	89
14.3	Toepassing op model 2	90
15	Bijlage F: toekomstige treininzet.....	93
16	Bijlage G: Resultaten	95
17	Bijlage H: Gebruikte programma's	103

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Nederland heeft één van de drukst bereden spoorwegnetwerken van Europa. En nog steeds wordt gestreefd, voornamelijk in de meer stedelijke gebieden, naar meer capaciteit. Waarbij een groei van 3%-7% per jaar beoogd wordt en uiteindelijk een 24/7 spoorboekje. Deze ambitie leidt tot een toenemende druk op de veiligheid, op de betrouwbaarheid en op de omgeving. Op dit laatste aspect ligt de primaire focus van dit project. Langs de drukbereden sporen wonen veel mensen die geluidshinder ondervinden bij het passeren van treinen. De hoeveelheid geluid die door treinen geproduceerd mag worden is dan ook door regel- en wetgeving aan banden gelegd. Om aan de geluidsnormen te kunnen blijven voldoen moeten verschillende geluidsbeperkende maatregelen genomen worden. In dit kader worden conventionele manieren toegepast zoals het plaatsen van geluidswallen en schermen. Alleen al in het jaar 2012 is er 260 miljoen gereserveerd aan investeringen in geluidsbeperkende middelen. Op emplacementen wordt ook gebruik gemaakt van baangebonden installaties, waarbij een spuitunit naast het spoor regelmatig een conditionering op het spoor aanbrengt die de wrijving van de wielen met de spoorstaaf vermindert. Door deze verminderde wrijving wordt ook minder booggeluid en squeal geproduceerd.

Onder andere omdat al deze methoden slechts werken op de plaats waar ze worden aangebracht, zijn deze middelen relatief duur. Het gehele spoorwegnet in Nederland beslaat namelijk ruim 7000 kilometer. Daarnaast moet al het onderhoud aan deze middelen langs het spoor gebeuren waarbij tijdelijk het spoor buitendienst gesteld moet worden. Vanwege deze redenen is ProRail, de beheerder van het nederlandse spoor op zoek naar nieuwe manieren om de geluidsoverlast te beperken. Een manier om dit te doen is om het materieel wat zich toch al op het spoorwegnetwerk bevindt mee te laten werken aan de vermindering van de geluidsproductie van het spoor. Dat kan door het materieel zo te ontwerpen of aan te passen dat het uit zichzelf minder geluid produceert. Wat echter aanwezig blijft is het geluid dat ontstaat door het contact van de wielen met het spoor. Om deze geluiden aan te pakken onderzoekt ProRail de mogelijkheid van conditioneren van het spoor vanuit het rijdend materieel. Hierbij vervangt de trein dus de al bestaande spuitunits.

Dit project gaat over deze manier van het terugbrengen van geluidsproductie en zal verder Wiel Rail Conditionering (WRC) genoemd worden.

Naast het reduceren van het geluid wordt er meer verwacht van WRC;

- Minder slijtage wiel en rail
- Beheersing wrijving tussen wiel en rail wat resulteert in beter voorspelbare rem- en tractiecurven, de wrijving is minder afhankelijk van locatie en weersomstandigheden
- Reductie energieverbruik van de treinen.

1.2 Idee en randvoorwaarden project

Het doel van het WRC project is om de geluidsproductie door het wiel-rail contact te verminderen, zonder dat hierbij de veiligheid in gevaar wordt gebracht. Dit gebeurt door het aanbrengen van een wrijvingsverbeteraar op het spoor die de wrijvingsfactor beïnvloed. De wrijving wordt naar een minimaal niveau gebracht waarbij treinen nog voldoende grip hebben om tractie te kunnen geven en te kunnen remmen. Doordat de wrijving zo laag mogelijk is treed er minder geluidsproductie op [5]. Met name in bogen en op wissels is er veel sprake van geluidsoverlast. Dit komt onder andere door de volgende redenen:

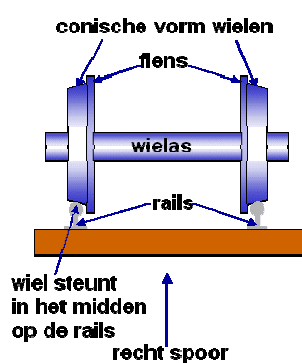
Doordat treinen geen differentieel hebben draaien in een boog het binnenste en het buitenste wiel even snel, terwijl er een verschillende afstand wordt afgelegd. Dit veroorzaakt een slippend wiel.

Door de conische vorm van de wielen gaan de wielen zich haaks op de rijrichting over de spoorstaaf bewegen. Op deze manier wordt een positie in een bocht gezocht waar, door het verschil in diameter, toch bij dezelfde rotatiesnelheid een andere afstand wordt afgelegd. Dit verschijnsel is weergegeven in Figuur 1 en Figuur 2.

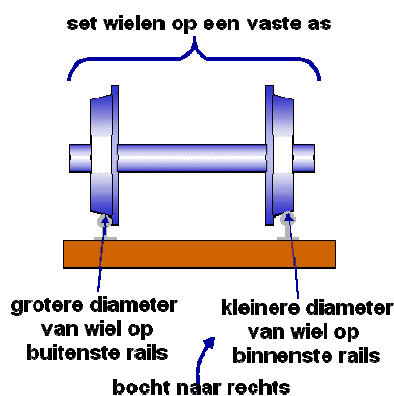
Naast het verschil tussen het binnenste en het buitenste wiel, is er nog een belangrijke bron van het geluid. Doordat de wielen op een draaistel gemonteerd zijn, is de rijrichting in een boog niet helemaal gelijk aan de richting van de spoorstaaf, zoals te zien in Figuur 3. Hierdoor slippen de wielen over het spoor wat een snerpend geluid produceert [11].

In een boog is er als laatste nog de mogelijkheid dat de wielflens langs de zijkant van de spoorstaaf schuurt.

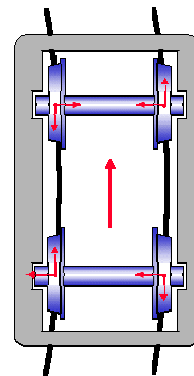
Het doel van het project is om deze geluiden te verminderen en tevens ook het rolgeluid te reduceren. Om de bovenstaande vier geluidsbronnen te beïnvloeden wordt zowel op de wielflens als op de bovenkant van de spoorstaaf (TOR, Top Of Rail) geconditioneerd. Dit alles met behoud van voldoende wrijving voor tractie en remmen, zodat de veiligheid gegarandeerd blijft. Een uitgebreidere beschrijving van de geluidsproductie van treinen door wiel-rail contact is te vinden in [2], [11] en [24].



Figuur 1: Treinbogie op recht spoor [21]



Figuur 2: treinbogie in een boog naar rechts [21]



Figuur 3: Treinbogie in een boog met slip vanwege montage in draaistel [21]

1.3 Probleemstelling opdracht

ProRail wil in heel Nederland een werkende conditionering op het spoor aanbrengen vanuit rijdend materieel. In deze thesis wordt onderzocht hoeveel en welke treinstellen uitgerust moeten worden met een WRC systeem om landelijk een werkende conditionering te verkrijgen. Een belangrijke, nog niet bekende, input voor deze vraag is het aantal treinstellen waarvoor een conditionerende trein kan conditioneren. Het model wat gemaakt wordt moet dus dit gegeven openhouden. Bij het beantwoorden van de vraag hoeveel en welke treinstellen een WRC systeem moeten krijgen moet, waar mogelijk, rekening gehouden worden met de kosten besparingen die gedaan kunnen worden door te sturen op de inzet van met WRC uitgeruste treinstellen. Daarnaast moet rekening gehouden worden met mogelijke verstoringen of uitval van de WRC systemen en de mogelijke gevolgen daarvan.

1.4 Opbouw scriptie

In deze scriptie wordt in hoofdstuk 2 achtergrondinformatie gegeven over de werking van de conditionering, het aanbrengen van de conditionering, de verschillende pilots die gedaan zijn en de planning van treinstellen in Nederland gegeven. Vervolgens wordt vanuit deze achtergrond in

hoofdstuk 3 een analyse gedaan op de verkregen data van de treinomloop. De analyses worden gebruikt om inzicht te krijgen in de omloop van treinstellen. De achtergrondinformatie en de analyses op de data worden gebruikt om in hoofdstuk 4 een aantal aanpakken om tot een oplossing te komen te definiëren. Uit deze verschillende manieren wordt een manier uitgekozen die in detail is uitgewerkt in hoofdstuk 5. Het uitgewerkte model met de bijbehorende oplossingsmethode wordt doorgerekend met verschillende parameters. De resultaten van deze berekeningen zijn te vinden in hoofdstuk 6. In dit hoofdstuk worden ook intuïtieve verdelingen van de WRC systemen over de treinen vergeleken met de verdelingen uit het resultaat.

In hoofdstuk 7 wordt er kritisch naar de resultaten gekeken. In combinatie met de resultaten vloeien hier in hoofdstuk 8 de conclusies en de aanbevelingen uit voort.

2 Achtergrondinformatie

2.1 Planning

Vanuit het idee om het spoor te conditioneren is ProRail gestart met enkel pilots. Vanuit deze pilots moet aangetoond worden dat conditioneren vanuit een rijdende trein werkt en veilig kan gebeuren. De werking van de conditionering moet onder andere vanuit geluidsmetingen worden aangetoond. Als uit de verschillende pilots blijkt dat het conditioneren werkt met betrekking tot geluidsreductie moeten ook de verschillende randvoorwaarden voor deze werking blijken uit de pilots.

Wanneer met de pilots is aangetoond dat conditionering voldoende geluidsreductie oplevert, kan er een business case gemaakt worden. In een business case worden onder andere de kosten en de baten tegen elkaar afgewogen. Voor de kosten is het erg belangrijk om te weten hoeveel treinstellen uitgerust moeten worden met WRC om op het gehele Nederlandse spoorwegnet een werkende conditionering te krijgen. Vanuit de grootste passagiers vervoerder op het Nederlandse spoorwegnet is NSR. In dit onderzoek worden alleen de treinstellen van NSR meegenomen. De regionale vervoerders hebben over het algemeen veel simpelere dienstregelingen en hiervan kan veel makkelijker een inschatting gemaakt worden. Dezelfde methoden die gebruikt worden bij de bepaling van het aantal treinstellen van NSR kunnen waarschijnlijk ook toegepast worden op de regionale vervoerders. De trajecten van regionale vervoerders worden dan ook niet meegenomen in dit onderzoek.

Voor het bepalen van het aantal treinstellen dat moet worden uitgerust met WRC is zowel de uitkomst van de pilots van belang, als de doorloop van de treinstellen over het spoorwegnet. Tijdens dit onderzoek zijn de pilots nog in volle gang, hierdoor is nog niet alle informatie bekend. Wanneer het onderzoek naar het aantal treinstellen dat moet worden uitgerust met WRC om landelijke conditionering te krijgen pas wordt uitgevoerd als de pilots zijn afgelopen neemt het gehele proces veel tijd in beslag. Daarom is ervoor gekozen om het proces van de impact van een landelijke uitrol gedeeltelijk parallel te laten lopen met de pilots. Dit leidt ertoe dat in dit onderzoek een aantal aannames gedaan zijn die nog niet gevalideerd kunnen worden uit de pilots, maar waar wel een indicatie voor is. Dit onderzoek richt zich op het aantal en op welke treinstellen uitgerust moeten worden met WRC om landelijke dekking van de conditionering te krijgen.

2.2 Verschillende pilots

In het WRC project is ProRail bezig met verschillende pilots. Vanuit een aantal van deze pilots is informatie gekomen die van belang is voor het bepalen van het aantal treinstellen dat uitgerust moet worden met WRC om een landelijke dekking van de conditionering te bewerkstelligen. Daarom wordt een kort overzicht gegeven van de pilot op het traject van Amersfoort naar Ede-Wageningen en van de pilot op het traject van Zutphen naar Nijmegen.

2.2.1 Tussen Amersfoort en Ede-Wageningen

Het traject wat tussen Amersfoort en Ede-Wageningen ligt wordt ook wel de Valleilijn genoemd. Op de Valleilijn wordt gereden door Connexxion. Connexxion is een regionale personenvervoerder die naast veel bussen ook enkele treindiensten exploiteert. Op de Valleilijn rijdt Connexxion met 5 treinstellen. Deze treinstellen rijden in een regelmatige dienst tussen Amersfoort en Ede-Wageningen of tussen Amersfoort en Barneveld-Noord. Op dit traject rijdt een treinstel van het type Protos met TOR- en flensconditionering. Sinds dit treinstel conditioneert op dit traject zijn de klachten van buurtbewoners met betrekking tot geluidsoverlast afgenomen. Wanneer het conditionerende treinstel uit de dienst genomen is, neemt de geluidsproductie weer toe en wordt er ook weer geklaagd door buurtbewoners. Een uitgebreide beschrijving van deze pilot is te vinden in [2].

2.2.2 Tussen Zutphen en Nijmegen

Voor het traject Zutphen-Nijmegen zijn 4 SGM 3 treinstellen (zie Figuur 4) uitgerust met een WRC installatie. Door de omloop van de treinen en de beperkte bijsturingmogelijkheden zijn zelden alle vier treinstellen op dit traject te vinden. Gemiddeld gezien rijden iets minder dan twee conditionerende treinstellen per dag op dit traject. Wanneer uitgegaan wordt van het drukste gedeelte van dit traject dan rijden hier per uur twee intercity's richting de Randstad, twee intercity's op de IJssellijn, en twee SGM treinen per richting. Omdat er in totaal vier SGM treinen rijden waarvan er twee conditioneren, doseert er maar één trein per richting. Dit komt dan neer op de lijn Nijmegen-Arnhem dat één op de zes treinen per uur conditioneert of één op de acht treinen conditioneert wanneer het verkeer op de Betuwelijn wordt meegenomen. (Arnhem-Elst) [7]. Een uitgebreide beschrijving van deze pilot is ook te vinden in [2].



Figuur 4: SGM 3 trein

2.3 Werking conditionering

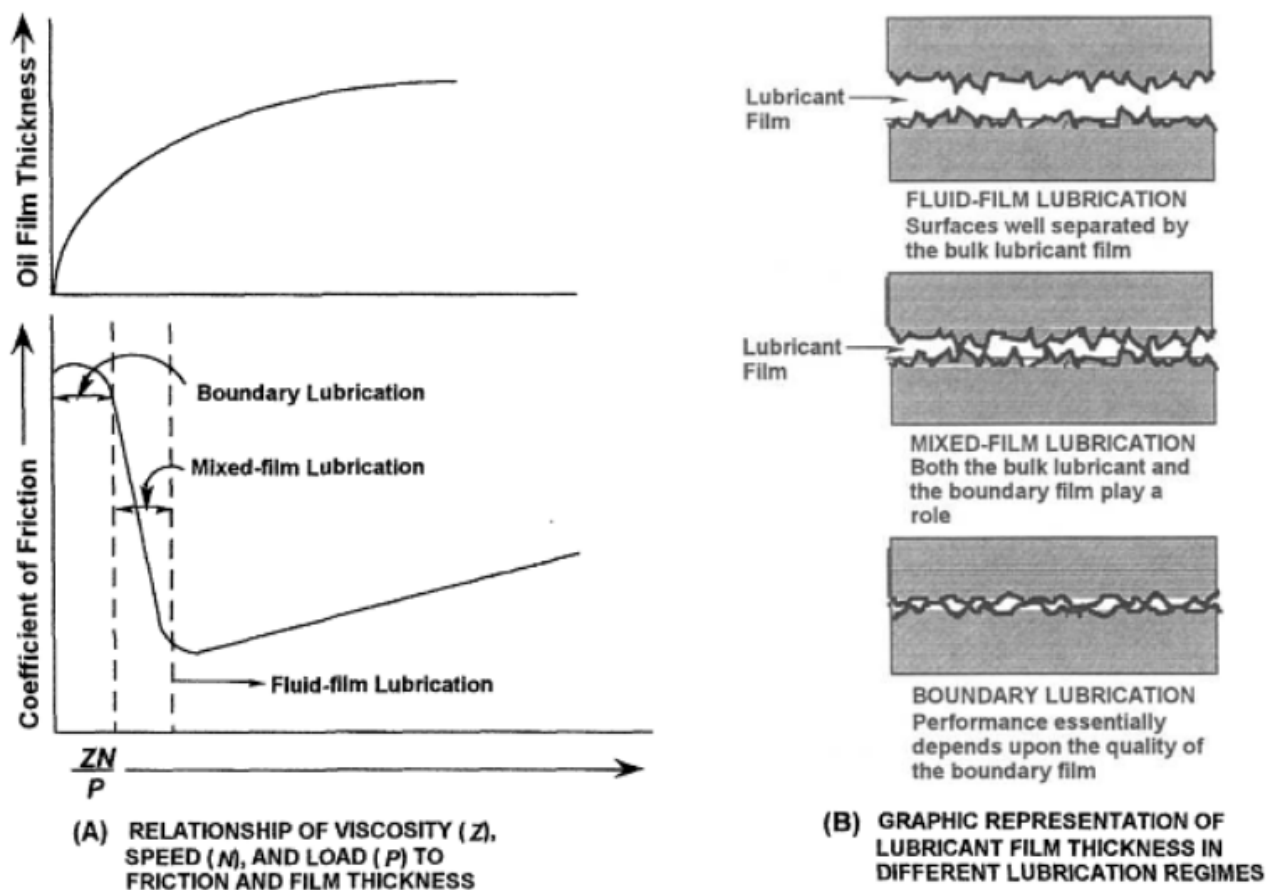
Om te kunnen bepalen welke treinstellen moeten worden uitgerust met WRC is het nodig om de werking van wrijvingsverbeteraars goed te begrijpen. In dit hoofdstuk is een korte beschrijving van de werking van de conditionering opgenomen. Hierbij wordt eerst de theoretische onderbouwing van de werking van wrijvingsverbeteraars behandeld, waarna ook ingegaan wordt op het aanbrengen van deze wrijvingsverbeteraar vanuit de trein.

Wrijvingsverbeteraars worden aangebracht op het spoor met als doel om de wrijvingsfactor tussen het wiel en het spoor naar een gewenste waarde te brengen [6]. Voor het accelereren en het deaccelereren van een trein is een bepaald minimum aan wrijving nodig [1]. Door het juist gebruiken van een wrijvingsverbeteraar kan dit minimum gewaarborgd blijven [4]. De werking van de wrijvingsverbeteraar is het best uit te leggen met behulp van de Stribeck curve [8]. De Stribeck curve is een curve die de wrijving als functie van de snelheid geeft wanneer twee oppervlakten over elkaar bewegen met daartussen een vloeibaar smeermiddel [27]. Dit smeermiddel (Lubricant) vormt een dunne film laag tussen beide oppervlakten. Wanneer de snelheid van twee langs elkaar bewegende oppervlakten, met daartussen een vloeistof, toeneemt, neemt de wrijving door de hydronamische drukopbouw af. Dit verschijnsel is bij water bekend onder de naam aquaplaning. Bij een hogere snelheid heeft de vloeistof tussen de twee oppervlakten niet genoeg tijd om weg te komen en vormt zo een scheidende laag tussen beide oppervlakten. Hierdoor raken de oppervlakten elkaar minder of helemaal niet meer, waardoor de wrijving afneemt.

Wanneer de oppervlakten gesmeerd worden met een vloeibaar smeermiddel, worden er drie fasen onderscheiden,

- Grenssmering (boundary lubrication (BL)),
- gemengde smering (mixed film lubrication (ML)) en
- volle film smering (Fluid-film lubrication) ook wel Elasto-Hydrodynamische smering (elastic hydrodynamic lubrication (EHDL)) genoemd.

In de toestand van grenssmering is de snelheid te laag om druk op te bouwen. Hierdoor blijven beide oppervlakken met elkaar in contact. De smering zorgt wel voor een vermindering onderlinge wrijving ten opzichte van twee oppervlakten die niet gesmeerd zijn. De dikte van de film neemt toe door de drukopbouw van de oppervlakten die langs elkaar bewegen. Bij deze toename ontstaat een toestand waarbij beide oppervlakten nog wel contact maken, maar in mindere mate dan in de grenssmering het geval is. Deze toestand wordt de gemengde smering genoemd. Wanneer de drukopbouw zo groot is geworden dat de oppervlakken compleet gescheiden zijn en beide alleen nog contact hebben met het smeermiddel wordt dit volle film smering genoemd. Doordat beide oppervlakken slechts nog contact hebben met het smeermiddel zal de wrijving tussen de oppervlakten veel minder zijn dan in de andere toestanden het geval is. De schuifspanning van het smeermiddel is veel lager dan de schuifspanning van staal.



Figuur 5: Stribeck curve met bijbehorende film dikte [23], rechts is een schematische detail weergave van de oppervlakten in de verschillende toestanden. Linksonder is de snelheid uitgezet tegen de wrijvingscoëfficiënt, linksboven is bij dezelfde snelheid de benodigde film dikte om de toestand te kunnen bereiken aangegeven.

In Figuur 5 is linksonder in een kromme de verhouding te zien tussen de snelheid en de wrijving. Op de horizontale as staat de snelheid met daarvoor een factor van Z (viscositeit) gedeeld door P (belasting), deze factor is voor een trein niet te beïnvloeden. Duidelijk is te zien dat in de grenssmering de wrijving hoog is, deze snel afneemt tijdens de gemengde smering en vervolgens langzaam toeneemt in de volle film smering. Dit komt omdat de tussenlaag in dit stadium opgerekt moet worden [28]. In de grafiek linksboven in Figuur 5 is bij dezelfde snelheid de benodigde film

dikte gegeven. Wanneer er niet genoeg smeermiddel aanwezig is, kan de smering niet de scheidende laag vormen tussen beide oppervlakten en kan er dus geen volledige film smering optreden [10]. Door de hoeveelheid aanwezige smering te beperken kan de wrijving tussen de oppervlakken beheerst worden.

Een complete beschrijving van het wiel-rail contact is te vinden in de thesis 'Friction in Wheel-Rail Contacts' [18]. Een meer gedetailleerde beschrijving van de rol van de wrijvingsverbeteraar op dit contact is gedaan door in 'Modellering van het effect van een Friction Modifier op booggeluid' [24].

2.3.1 Toepassing op de trein

Uit verschillende artikelen blijkt er een heel aantal factoren te zijn die de werking van de conditionering en/of de vorm van de Stribeck curve beïnvloeden. Zo hangt de werking af van:

- Snelheid
- Materiaal tussen de spoorstaaf en het wiel
Bijvoorbeeld: roest, zand, bladeren, vuil etc. [15]
- Spoorstaaf- en wielruwheid en spoorstaaf- en wielvorm [18]
- Gewicht [23]
- Gebruikte wrijvingsverbeteraar
Tijdens dit project wordt gebruik gemaakt van het middel HEADLUB, een op olie gebaseerde wrijvingsverbeteraar [13]
- Hoeveelheid wrijvingsverbeteraar / locatie van de wrijvingsverbeteraar
- Temperatuur
De temperatuur kan onder invloed van slip sterk veranderen.

Bovenstaande factoren zijn niet allemaal (direct) beïnvloedbaar. Er wordt vanuit gegaan dat de WRC systeem bij het bepalen van de hoeveelheid conditionering, de hoeveelheid conditionering af laat hangen van de volgende parameters:

- Status van de baan (roest, slijtage, etc.)
- Karakteristieken van het traject (boog diameter, wissels, etc.)
- Aanwezig smeermiddel (om overdosering te voorkomen)

De duur van de werking van de conditionering, ook wel de standtijd genoemd, hangt dan nog af van:

- plastische deformatie van het smeermiddel

Dit laatste gebeurt door de wielen van passerende treinen. Wanneer een trein passeert wordt de aanwezige film van zijn plaats gedrukt door de trein. Hierdoor neemt de hoeveelheid werkende conditionering af.

Door de aanname dat een treinstel zijn conditionering van een aantal factoren laat afhangen, kan er vanuit gegaan worden dat de aangebrachte conditionering per traject gelijk is. De norm van het aantal treinstellen dat moet conditioneren verschilt dus niet per traject. De hoeveelheid die geconditioneerd moet worden hangt dan slechts af van het treinverkeer wat gebruik maakt van dit traject. Wanneer er binnen een traject, of tussen trajecten verschillen zijn dan zal er op deze plekken door het WRC systeem anders geconditioneerd worden. Hierdoor hangt het aantal treinstellen per traject dat uitgerust moet worden met een WRC systeem slechts af van de

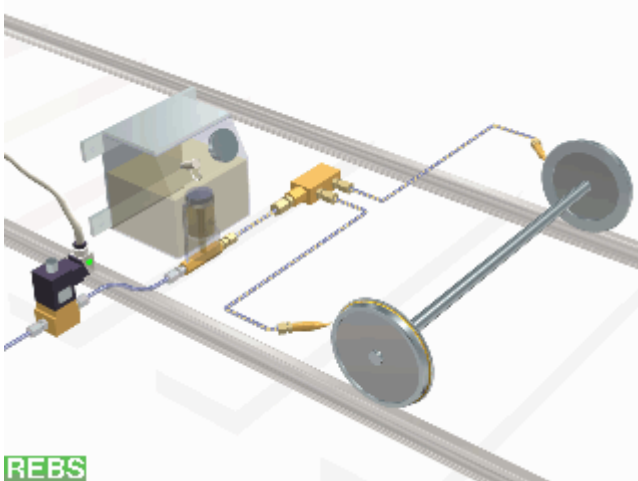
treinstellen die passeren. De hoeveelheid afname van de werking hangt dan af van het soort wiel, het gewicht van het treinstel en het aantal wielen. Van deze parameters wordt aangenomen dat ze per type trein gelijk zijn.

2.3.2 Aanbrengen vanuit de trein

De conditionering wordt aangebracht op de wielen en het spoor door een installatie onder de trein [2]. Deze installatie brengt de conditionering aan door middel van perslucht. Een schematisch overzicht van de conditioneerinstallatie is te vinden in Figuur 6. De perslucht mengt zich met de conditionering en wordt dan onder druk uit een spuitmond aangebracht op de spoorstaaf of op de wielflens, zie Figuur 1. Voor het aanbrengen van de conditionering hebben de met WRC uitgeruste treinstellen een intelligent meet- en stuursysteem aan boord. Dit systeem meet de wrijvingsfactor tussen de spoorstaaf en de wielen. Wanneer deze wrijvingsfactor te laag wordt is er gevaar voor gladheid en stopt de conditionering [2]. Door het stoppen met conditioneren wordt ervoor gezorgd dat binnen de veiligheidsgrenzen wordt geconditioneerd.

De spuitmond van het systeem hangt een aantal centimeter boven de spoorstaaf. Daardoor is de hoeveelheid effectieve conditionering die op de spoorstaaf komt sterk afhankelijk van luchtwervelingen. De luchtwerveling onder de trein is voornamelijk afkomstig van de rijwind en zal bij hogere snelheid dus toenemen. Er wordt verwacht dat daarom sprinters, die over het algemeen met een lagere snelheid rijden, een betere conditionering aanbrengen dan intercity's. Dit voordeel wordt nog eens versterkt door het feit dat sprinters juist op de emplacementen en de bevolkte gebieden een lagere snelheid hebben. Dit zijn tevens de gebieden waar geluidsproductie voor overlast zorgt.

Om veilig te conditioneren moet ervoor gewaakt worden dat er wordt overgeconditioneerd. Overconditionering kan voorkomen worden door de wrijvingscoëfficiënt te meten en bij een te lage coëfficiënt niet te conditioneren. Een sprinter heeft niet alleen een lagere snelheid, maar stopt onderweg ook vaker. Tijdens het afremmen en optrekken kan de wrijvingscoëfficiënt veel beter gemeten worden. Het uitrusten van sprinters geniet dus de voorkeur boven het uitrusten van intercity's.



Figuur 6: REBS doseerinstallatie wielflens [22]

2.4 Treinstelplanning

Uit de vorige paragrafen is bekend hoe de conditionering werkt en zijn er enkele aannamen gedaan met betrekking tot de werking van de conditionering. Om te kunnen bepalen welke treinstellen moeten worden uitgerust met WRC, is het daarnaast nodig om te begrijpen hoe NSR (Nederlandse

Spoorwegen Reizigers) haar treinstellen inplant. Hierbij volgt een kort overzicht van het planningsproces zoals dit plaatsvindt bij NSR met een aantal opties om hierin te sturen.

Bij NSR maakt men een dienstregeling waarin treindiensten gepland staan. Deze diensten worden nog niet gekoppeld aan een materieel soort of een specifiek treinstel. De complete dienstregeling wordt gemaakt zonder dat hier volledig rekening gehouden wordt met het materieel. De materieel planning wordt gemaakt aan de hand van dienstregeling. Hierbij worden diensten gekoppeld aan een materieel soort [25]. Deze materieel soorten worden verder treintypen genoemd. Dit gebeurt voor elke dag om 8 uur 's ochtends, dat is het moment dat, in verband met de spits, de meeste treinstellen in gebruik zijn. Wanneer het lukt om op dit moment de treinen efficiënt te verdelen gaat men er vanuit dat deze verdeling ook voldoet voor de rest van de dag [12]. In de realisatie van deze planning probeert men om ook treinstellen van het geplande treintype te koppelen aan de dienst. Dit lukt echter lang niet altijd door de locatie van het materieel, verstoringen en vertragingen. Wanneer het niet lukt om een gepland treintype te gebruiken gebruikt men waar mogelijk een aanverwant treintype. Bijvoorbeeld een ICM3 (koploper van drie bakken) in plaats van een ICM4 (koploper van 4 bakken). Het blijkt relatief vaak voor te komen dat het geplande treintype niet gehaald kan worden zoals te zien is in Bijlage D: Realisatie planning treinsteltype.

Binnen NSR zijn er ook planningen op treinstelniveau. Deze planningen zijn bijvoorbeeld nodig om treinstellen voor onderhoud naar de onderhoudshal te leiden. Onderhoud moet namelijk gebeuren op een specifiek treinstel. De planning om deze treinstellen op tijd bij het onderhoud te krijgen is ingewikkeld en vereist soms dat treinstellen buiten de dienstregeling leeg naar een ander station moeten rijden. Het laten rijden van extra ritten door lege treinstellen leidt tot extra kosten. Toch blijkt het niet mogelijk om de treinstellen te plannen zonder deze ritten [16]. Het bijsturen op individuele treinstellen is dus slechts zeer beperkt mogelijk.

2.4.1 Mogelijkheden tot planning

Wanneer een aantal treinstellen wordt uitgerust met een WRC systeem kan de conditionering van het spoor sterk beïnvloed worden door de planning van deze treinstellen. Om de treinstellen met WRC te sturen zijn er globaal 2 mogelijkheden. Voor de diensten kan het aantal verschillende materieel soorten dat wordt ingepland worden uitgebreid. Dit door onderscheid te maken tussen twee treinen van hetzelfde soort, waarbij treinstellen die zijn uitgerust met WRC systemen, als een andere soort worden gezien dan treinstellen die niet zijn uitgerust met WRC. Hierbij wordt bijvoorbeeld een ICM3 met een WRC systeem als een ander soort gezien dan een ICM3 zonder WRC systeem. Aangezien de toewijzing van materieel aan diensten nu al een ingewikkeld planningsprobleem is waarbij de planning veelal niet gerealiseerd wordt, is dit niet een wenselijke optie. Zie hiervoor ook Bijlage D: Realisatie planning treinsteltype. Het vergroten van het aantal materieel soorten zal deze planning complexer maken, waardoor de kosten toenemen en de realisatie van deze planning waarschijnlijk nog meer afwijkt van de gemaakte planning.

Een andere mogelijkheid is om bij het inzetten van een treinstel in een dienst rekening te houden met het wel of niet uitgerust zijn met een WRC systeem. Deze optie lijkt aantrekkelijker door de slechts lokale impact van deze verandering. Maar omdat de mogelijkheden om lokaal bij te sturen slechts beperkt zijn, levert deze methode misschien te weinig mogelijkheden op om de conditionerende treinstellen anders in te zetten.

Vanwege bovenstaande redenen wordt er in dit onderzoek verder vanuit gegaan dat er slecht kan worden gestuurd op de inzet van treinstellen en dat daarmee de inzet van treinstellen binnen een type willekeurig is.

2.4.2 Uitrusten treinen met WRC

In principe is het mogelijk om bijna elke treinstel uit te rusten met een WRC systeem. Zoals al aangegeven in paragraaf 2.3.2 hebben sprinters de voorkeur boven intercity's als het gaat om het aanbrengen van conditionering op het spoor. Naast deze voorkeuren zijn er nog meer overwegingen bij het uitrusten van treinstellen met WRC systemen. Wanneer er een toewijzing gevonden wordt waarbij van veel verschillende treintypen een klein gedeelte uitgerust wordt met WRC systemen moet voor elk type een constructie gemaakt worden hoe het WRC systeem in de trein gemonteerd kan worden. Dit zijn vaste kosten per treintype. Bij kleine aantallen per type zijn de kosten dus hoger dan wanneer er evenveel treinstellen van eenzelfde type worden uitgerust met een WRC systeem. Daarnaast is het voor de spreiding van de conditionering ook beter om binnen een treintype een groot aantal treinstellen uit te rusten, dan van veel verschillende treintypen een klein gedeelte uit te rusten met een WRC systeem. Dit blijkt uit het volgende voorbeeld:

Wanneer op een traject 10 treinstellen rijden van 2 verschillende typen met de volgorde als volgt: ABBBBABBBB. Dan kan er een gemiddelde van 1 op de 5 treinstellen met WRC gehaald worden op onder andere de volgende twee manieren:

- *Manier 1: Alle treinstellen van type A, geen treinstellen van type B*
- *Manier 2: Geen treinstellen van type A, 1 op de 4 treinstellen van type B*

Bij beide manieren is er gemiddeld 1 op de 5 treinstellen uitgerust met WRC. Bij manier 1 is er geen spreiding, terwijl bij manier 2 er wel degelijk een spreiding is. Wanneer gekozen kan worden tussen deze twee oplossingen heeft manier 1 de voorkeur.

Naast de grotere spreiding in de conditionering bij het niet volledig uitrusten van veel verschillende subgroepen, levert dit ook nog andere kosten op. Voor elk treintype moet een ontwerp gemaakt worden en voor elk treintype moet het onderhoud protocol aangepast worden om de WRC systemen te onderhouden. Bij de bepaling van welke treinstellen uitgerust moeten worden met WRC systemen is het wenselijk om een model te hebben waarin er mogelijkheid is om te sturen op het aantal verschillende treintypen dat wordt uitgerust met WRC systemen.

3 Treinomloop

3.1 Inleiding

Vanuit de kennis over de planning van de treinen van NSR kan nu specifiek gekeken worden naar de treinomloop van NSR. Er is geconcludeerd dat er slechts beperkte mogelijkheid is tot sturing op de inzet van treinstellen met WRC systemen. Bij de verdere modellen wordt er dan ook vanuit gegaan dat er geen sturing op de inzet plaatsvindt. Om een antwoord te vinden op de vraag welke treinstellen met een WRC systeem moeten worden uitgerust, wordt eerst gekeken naar hoe treinstellen zich verspreiden over het spoorwegnetwerk.

Wanneer bekend is hoe treinstellen zich bewegen over het spoor, kan ook vastgesteld worden wat het uitrusten van een treinstel met een WRC systeem voor invloed heeft. Om een goed beeld te krijgen van de omloop van de treinstellen van NSR is data geanalyseerd met betrekking tot de realisatie van de dienstregeling van NSR in de periode van 12 december 2010 tot en met 7 mei 2011. Hieruit blijkt dat sommige treinstellen regionaal gebonden zijn, terwijl anderen met gelijke kans overal in het land te vinden zijn. Het is belangrijk onderscheid te maken tussen deze groepen. Wanneer een treinstel uitgerust is met een WRC systeem is het voor de verspreiding van de conditionering noodzakelijk om te weten waar dit treinstel mogelijk rijdt. Om onderscheid te maken tussen deze treinstellen wordt voor elk treintype onderzocht of er regionale binding plaatsvindt. Wanneer bekend is dat bij een treintype sprake is van regionale binding, dan wordt dit treintype opgesplitst in de verschillende regio's door middel van subgroepen en wordt van elke subgroep bepaald hoeveel treinstellen zich in deze groep bevinden. Met de zo geformeerde groepen kan vervolgens verder gewerkt worden aan een model voor het aantal met een WRC systeem uit te rusten treinstellen.

3.2 Beschikbare data

Als eerste volgt een kort overzicht van de data die is aangeleverd door het kenniscentrum van NSR. Het is niet nodig om voor elk punt op het spoor de treinendoorloop te weten om de status van de conditionering te kunnen vaststellen. Wanneer een trein aan een stuk spoor begint zonder spoorwegknooppunten of eindstations zal de trein dit hele traject berijden. Daarom is Nederland opgedeeld in 85 trajecten waarbij binnen een traject geen knooppunten of eindstations zitten. Binnen elk traject is een willekeurig doorlooppunt gekozen waarvan de doorloop gegevens zijn opgevraagd.

Alle data is uit de periode van 12 december 2010 tot en met 7 mei 2011. Het gaat hierbij om gerealiseerde data. Een gedeelte van deze opdeling in trajecten is te vinden in Figuur 7. Hierin is bijvoorbeeld te zien dat op het traject Zwolle - Deventer het doorlooppunt Olst is gekozen. Een volledig overzicht is te vinden in Bijlage C: Geselecteerde trajecten. Binnen de trajecten is er geen onderscheid gemaakt in de richting waarin, of het spoor waarop het treinstel rijdt.



Doorlooppunt	Traject tussen	
Borne	Almelo	Hengelo
Dalfsen	Emmen	Zwolle
Enschede D	Enschede	Hengelo
Heino	Nijverdal	Zwolle
Kampen	Kampen	Zwolle
Klarenbeek	Apeldoorn	Zutphen
Olst	Deventer	Zwolle
Rijssen	Almelo	Deventer
Twello	Apeldoorn	Deventer
Wezep	Amersfoort	Zwolle
Zutphen tka	Deventer	Zutphen

Figuur 7: Gedeelte van geselecteerde trajecten, rode stippen zijn geselecteerde doorlooppunten

De relevante data die bekend is per doorloop door een punt bevat de volgende gegevens:

- Tabel dienstregeling
 - o Doorlooppunt Doorlooppunt, dit is een punt ergens op een traject
 - o Uitvoertijd Tijd van passage door het doorlooppunt
 - o Datum Datum
 - o Dienst Dienstnummer zoals gebruikt in de dienstregeling
 - o Treintype Geplande materieel soort van treinstel

Verder is er nog extra informatie die aan elke rit gekoppeld kan worden:

- Mat_Route
 - o Datum Datum
 - o Dienst Dienstnummer zoals gebruikt in de dienstregeling
 - o Beginpunt Locatie waar het treinstel gekoppeld is aan deze dienst
 - o Eindpunt Locatie waar dit treinstel weer van de dienst is gehaald
 - o Treinstelnummer Nummer van het treinstel
- Materieel park
 - o Treinstelnummer Nummer van het treinstel
 - o Treintype Materieel soort van treinstel

Binnen de data is nog wel een zekere mate van ruis. Zo rijdt er bijvoorbeeld zo nu en dan een elektrisch treinstel op een niet geëlektrificeerd spoor. Dit voorbeeld is eenvoudig als foutief te herkennen en komt slechts één keer voor. Hoe groot de werkelijke ruis op de data is is niet te bepalen en navraag bij NSR heeft hier geen duidelijkheid over gegeven. Bij het gebruik van de data moet wel rekening gehouden worden met het feit dat de data afwijkingen bevat. In de verdere analyses wordt er vanuit gegaan dat binnen een dag een treinstel dat gekoppeld is aan een dienst, deze dienst de gehele dag behoudt. Daarmee wordt begin- en eindpunt niet gebruikt. De data in de

dienstregeling is gerealiseerde data. Bij elke uitvoertijd is van de passage aangegeven welk treintype gepland is, tevens is bekend welk treintype er werkelijk gereden heeft. In de analyses is er, tenzij anders aangegeven, gebruik gemaakt van het geplande treintype.

3.3 Treingroepen bepaling

Vanuit de beschikbare data kan nu een opdeling van de treintypen gemaakt worden in subgroepen die een regionale binding hebben. Deze indeling in subgroepen is nodig omdat er op deze manier, zonder te sturen op de inzet van de treinstellen uitgerust met een WRCsysteem, een specifiekere verdeling van WRC systemen over de verschillende treinstellen kan komen. Wanneer voor een traject de helft van een type moet worden uitgerust en voor een ander traject slechts één op de drie, dan kan dit alleen als de treinstellen van dit type op hetzelfde traject blijven rijden. Zonder sturing is het anders niet mogelijk om deze twee kansen verschillend te maken. Aangezien de mogelijkheden tot het sturen op de inzet van treinstellen met een WRC systeem beperkt is, kan dit verschil in verhouding van uitgeruste treinstellen alleen bereikt worden wanneer deze treinstellen regionale binding hebben. Om de verhouding tussen wel en niet uitgeruste treinstellen in een subgroep te kunnen bepalen is daarnaast ook het aantal treinstellen wat in een subgroep rijdt nodig.

Door treinstellen van een type in subgroepen van verschillende regio's in te delen, zal een treinstel in de ene subgroep niet in de andere subgroep terecht komen. Op deze manier kunnen een aantal treinstellen van een treintype binnen een subgroep worden uitgerust en kan op deze manier een kans gegeven worden dat een willekeurig gekozen treinstel op een traject van een type uitgerust is met een WRC systeem.

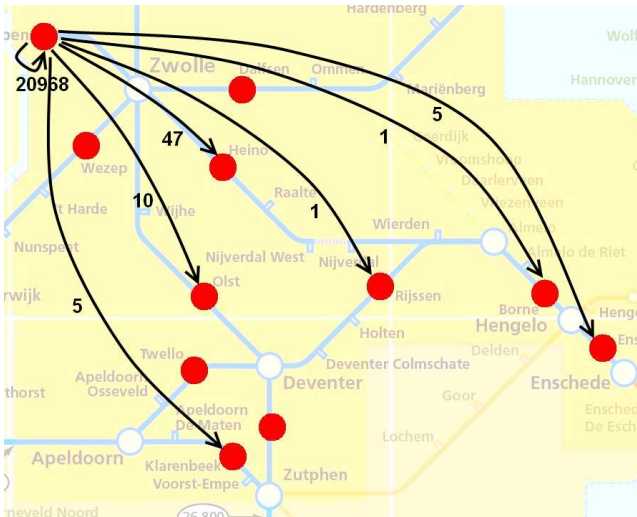
Een voorbeeld voor het indelen van treinstellen in subgroepen is de volgende:

De DM'90 treinen (buffels) die rijden tussen bijvoorbeeld Zwolle en Kampen verlaten zelden dit traject, hetzelfde geldt voor de DM'90 treinstellen tussen Enschede en Nijverdal. Deze treinstellen zijn wel van hetzelfde type maar kunnen door hun regionale binding niet als 1 treingroep worden beschouwd. Bij dit treintype is dat extra duidelijk door de opdruk van het treinstel, de treinstellen tussen Kampen en Zwolle hebben namelijk de opdruk: Zwolle-Kampen.

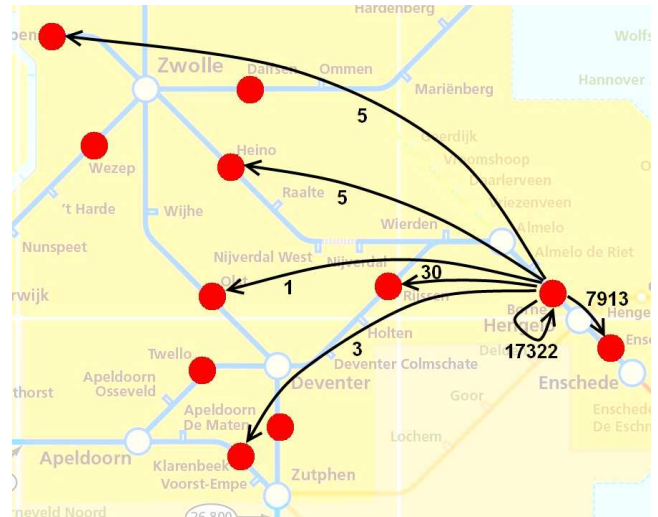
3.3.1 Uitwisseling tussen trajecten

Om naast de al genoemde groepsindeling per treintype ook in subgroepen per regio op te splitsen is er per treintype een volledige gerichte graaf gemaakt. Een graaf is een verzameling punten met tussen deze punten verbindingen. In dit geval is elk punt met elk ander punt en met zichzelf verbonden en heeft elke verbinding een richting en een capaciteit. De punten in de gecreëerde graaf zijn alle geselecteerde doorlooppunten. Initieel worden alle capaciteiten van de verbindingen op nul gezet. Vervolgens wordt de dienstregeling, gekoppeld aan de treinstellen, doorlopen. Bij elk record wordt de capaciteit van de verbinding tussen het doorlooppunt van het record en het vorige doorlooppunt waar dit treinstel is geweest met één verhoogd. Hiermee wordt een graaf gecreëerd waarbij de capaciteit aangeeft hoeveel treinstellen van het ene traject naar het andere traject zijn gereden in de gegeven periode.

Voorbeelden van gedeelten van deze graaf zijn te vinden in Figuur 8 en Figuur 9. In deze figuren is te zien dat treinstellen die in Kampen gereden hebben grotendeels de volgende rit weer in Kampen rijden en dat treinstellen die in Borne rijden grotendeels weer in Borne of in Enschede Drienerlo rijden.



Figuur 8: Overgangsgraaf DM'90 vanuit Kampen



Figuur 9: Overgangsgraaf DM'90 vanuit Borne

drglpt	Esd	Zpta	Ost	Mp	Kpn	Akm	Bn	Kbk	Bl	Hno	Swk	Rsn
Esd	21166	0	1	0	8	4	7922	6	0	8	0	3
Zpta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ost	4	0	84	2	6	3	0	1	0	14	0	35
Mp	1	0	0	56	3	2	0	0	14	6	5	0
Kpn	5	0	10	0	20968	1	1	5	0	47	0	1
Akm	4	0	3	3	1	1972	1	0	0	6	10	1
Bn	7913	0	1	1	5	1	17322	3	0	5	0	30
Kbk	6	1	0	0	6	1	0	34297	0	2	0	1
Bl	0	0	0	14	0	0	0	0	22	0	0	0
Hno	16	0	19	1	41	12	0	0	0	35929	0	1
Swk	0	0	0	10	0	5	0	0	0	0	20	0
Rsn	4	0	31	0	0	0	35	1	0	2	0	58

Tabel 1: Transitie matrix DM'90

Met behulp van deze graaf wordt een treintype ingedeeld in verschillende subgroepen die onderling weinig tot geen uitwisseling in treinstellen hebben.

Om de splitsing in subgroepen te kunnen maken wordt deze graaf gezien als een transitiegraaf. Van deze graaf kan dan ook een transitie matrix worden opgesteld zoals te zien is in Tabel 1. In deze tabel is bijvoorbeeld af te lezen dat 7922 treinstellen nadat ze Enschede Drienerlo (Esd) hebben gepasseerd in Borne (Bn) passeren. Een volledig overzicht van de gebruikte afkortingen van de doorlooppunten is te vinden in Bijlage C: Geselecteerde trajecten.

Deze graaf is opgesteld om de treintypen in te delen in subgroepen. Hiervoor wordt eerst de graaf ingedeeld in subgroepen die overeenkomen met de treintypesubgroepen. Hiertoe moet voor elk doorlooppunt in de graaf bepaald worden in welke andere doorlooppunten de treinstellen vanuit dit doorlooppunt terecht kunnen komen. Voor het bepalen van de doorstroom tussen verschillende punten wordt voor elke combinatie van punten een isolatiefactor berekend. Om dit te doen wordt er eerst een max flow graph opgesteld. Hiervoor wordt van elk doorlooppunt de maximale doorstroom

naar elk ander doorlooppunt bepaald. Dit is gedaan met behulp van het Ford- Fulkerson algoritme [26]. Hiervoor zijn de verbindingen tussen doorlooppunten met zichzelf weggehaald. Deze maximale doorstroom geeft een maat voor het aantal treinstellen dat, in het meest extreme geval, maximaal van een traject naar een ander traject heeft kunnen komen in de gegeven periode. Een voorbeeld van de maximale doorstroom matrix is te vinden in Tabel 2.

	Esd	Zpta	Ost	Mp	Kpn	Akm	Bn	Kbk	Bl	Hno	Swk	Rsn
Esd	0	1	65	17	68	26	7952	16	14	68	15	72
Zpta	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ost	65	1	0	17	65	26	65	16	14	65	15	65
Mp	17	1	17	0	17	17	17	16	14	17	15	17
Kpn	68	1	65	17	0	26	68	16	14	70	15	68
Akm	26	1	26	17	26	0	26	16	14	26	15	26
Bn	7953	1	65	17	68	26	0	16	14	68	15	72
Kbk	17	1	17	17	17	17	17	0	14	17	15	17
Bl	14	1	14	14	14	14	14	14	0	14	14	14
Hno	68	1	65	17	70	26	68	16	14	0	15	68
Swk	15	1	15	15	15	15	15	15	14	15	0	15
Rsn	72	1	65	17	68	26	72	16	14	68	15	0

Tabel 2: Voorbeeld max flow graph (DM'90)

Niet alle trajecten waarop een treintype heeft gereden zijn relevant. Op sommige trajecten komen bepaalde treintypen slechts incidenteel voor. Bij bepaling van de doorlooppunten waar dit treintype komt worden voor de subgroepen bepaling deze incidentele doorlooppunten niet meegenomen. Een voorbeeld is te vinden in Tabel 2:

Wanneer gekeken wordt naar de DM'90 is te zien dat dit treintype slechts 1 keer in Zutphen Twentekanaal aansluiting (Zpta) rijdt. Dit is een incident mogelijk veroorzaakt door een verstoring of om een lege rit op te vangen

Omdat de dienstregeling in het weekend kan afwijken van een doordeweekse dag worden doorlooppunten meegenomen wanneer er minstens twee van de zeven dagen wordt gereden. De relevante doorlooppunten voor een treintype zijn dus die doorlooppunten die minimaal 28% van de dagen gebruikt worden.

3.3.2 Scheiding van trajecten in subgroepen per treintype

Van de relevante trajecten kan nu bepaald worden of deze trajecten van elkaar gescheiden zijn doordat treinstellen in het ene traject geen uitwisseling hebben met treinstellen van het andere traject. Dit kan doormiddel van het uitrekenen van een isolatiefactor van een doorlooppunt ten opzichte van een ander doorlooppunt. Wanneer trajecten een lage isolatiefactor hebben ten opzichte van elkaar worden deze trajecten ontkoppeld genoemd. Voor alle relevante doorlooppunten D' uit alle trajecten D wordt naar elk ander relevant doorlooppunt een isolatiefactor berekend. Deze isolatiefactor tussen twee trajecten ξ en ψ is berekend door de maximale doorstroom tussen deze trajecten $f_{\xi,\psi}$ te nemen en deze te delen door de totale flow in punt ξ . De totale formule voor de isolatiefactor is dan:

$$iso_{\xi,\psi} = \frac{f_{\xi,\psi}}{\sum_{s \in D^*} f_{\xi,\psi}}$$

Met behulp van deze isolatiefactor wordt bepaald of twee doorlooppunten verbonden of ontkoppeld zijn. Wanneer de isolatiefactor kleiner is dan in te stellen isolatiedrempel γ zijn twee trajecten ontkoppeld:

$$0 < iso_{\xi,\psi} < \gamma$$

Wanneer de isolatiefactor groter is dan deze drempelwaarde γ zijn de trajecten gekoppeld:

$$\gamma \leq iso_{\xi,\psi} \leq 1$$

Alle trajecten die verbonden zijn vormen samen een subgroep, ook wanneer een traject niet rechtstreeks verbonden is met een ander traject, maar wel via een ander traject. Zo is het netwerk per treintype opgedeeld in subgroepen. Voorbeelden van deze opdeling voor de treintypen DM'90 en ICR BDS bij een isolatiefactor van 0.04 zijn te vinden in respectievelijk Tabel 3 en Tabel 4.

subgroep	aantal trajecten/totaal aantal trajecten	Trajecten
1	2/12	Bn, Esd
2	1/12	Hno
3	1/12	Kbk
4	1/12	Kpn

Tabel 3: Voorbeeld subgroepen DM'90 bij een isolatiedrempelwaarde van 0.04

subgroep	aantal trajecten/totaal aantal trajecten	Trajecten
1	30/40	Ac, Bdpb, Bk, Brd, Cl, Ddzd, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Est, Etn, Gv, Gz, Hln, Hmbh, Hrt, Hze, Laa, Mas, Nvp, Ost, Ot, Rai, Rsw, Vg, Vst, Wc, Zbm, Zpta

Tabel 4: Voorbeeld subgroepen ICR BDS bij een isolatiedrempelwaarde van 0.04

3.3.3 Aantal treinstellen per subgroep

Om in elke subgroep afzonderlijk de verhouding tussen met WRC uitgeruste treinstellen ten opzichte van alle treinstellen te kunnen bepalen is het nog van belang om te bepalen hoeveel treinstellen zich in elke subgroep bevinden. Net als bij de bepaling van de relevante doorlooppunten wordt ook hier een gedeelte van de gegevens niet meegenomen. Om bij de bepaling van het aantal treinstellen in een subgroep de uitschieters niet mee te nemen wordt slechts een gedeelte van de data gebruikt. Hiervoor worden de dagen gesorteerd op het totaal aantal gebruikte treinstellen van het type, vervolgens wordt hiervan de eerste zoveel procent van de dagen bekeken. Van deze geselecteerde data wordt dan het minimaal aantal verschillende treinstellen dat op een dag in een subgroep rijdt bepaald, evenals het maximaal aantal treinstellen per dag, het modaal aantal treinstellen per dag en het gemiddelde aantal treinstellen per dag. Dit wordt gedaan door aan de data in de dienstregeling de treinstelnummers te koppelen en vervolgens het aantal verschillende treinstellen per dag te tellen.

Omdat deze methoden niet precies het aantal treinstellen wat beschikbaar is verdeeld over de subgroepen, moeten er na deze methode nog treinstellen verdeeld worden om het totaal aantal

treinstellen te laten kloppen met het totaal aantal beschikbare treinstellen. Na enkele analyses is gekozen om te kijken naar het modaal aantal treinstellen wat in de top 72% van de dagen rijdt. Waarna de overgebleven treinstellen worden toebedeeld aan de grootste subgroep (de groep met al de meeste treinstellen). In Tabel 5 is voor de verschillende subgroepen van de DM'90 het minimaal aantal, het maximaal aantal, het modaal en het gemiddelde aantal treinstellen in deze subgroep aangegeven. Daarnaast staat in de kolom mod#t+dist het modaal aantal treinstellen waarbij de nog niet verdeelde treinstellen in de grootste subgroep zijn ingedeeld.

	min#t	max#t	mod#t	mod#t +dist	avg#t	#days	doorlooppunten
(niet relevante doorlooppunten)	1	10	4	4	3,91	58	7
Bn, Esd	6	12	8	23	8,88	106	2
Hno	2	7	4	4	4,03	106	1
Kbk	3	6	4	4	4,12	106	1
Kpn	1	4	2	2	2,02	106	1

Tabel 5: Voorbeeld aantal treinstellen per subgroep DM'90, p=0,72, het totaal aantal DM'90 treinstellen is 33

4 Verschillende aanpakken

In het vorige hoofdstuk zijn analyses gedaan op de treinomloop van de treinstellen van NSR. Hierbij zijn onder andere de verschillende treintypen opgesplitst in subgroepen. Om een antwoord te vinden op de vraag welke treinstellen moeten worden uitgerust met WRC om landelijke dekking te verkrijgen, moet van elk van deze subgroepen bepaald worden hoeveel treinstellen uitgerust moeten worden met WRC. Omdat het project zich nog in een pilotfase bevindt zijn veel gegevens die nodig zijn voor het bepalen van een goede dekking van WRC over het landelijk netwerk nog niet beschikbaar. Er wordt nog volop geëxperimenteerd met de frequentie en hoeveelheid van conditionering, daarnaast wordt er nog onderzoek gedaan naar de afname van de werking van de geluidsreductie van de conditionering, de hoeveelheid benodigde conditionering voor werking en de hoeveelheid conditionering die een treinstel kan aanbrengen.

Er zijn verschillende aanpakken mogelijk om een toewijzing van WRC systemen op de treinstellen van NSR te vinden. Welke aanpak het meeste inzicht geeft in de conditionering of welke aanpak het beste antwoord vindt hangt af van de verschillende, nog onbekende parameters. Omdat de testen om deze parameters in te vullen nog in volle gang zijn kan er dus nog geen eenduidig antwoord gevonden worden op de vraag welke aanpak het beste gevolgd kan worden. In dit hoofdstuk worden vier verschillende aanpakken om een toewijzing van WRC systemen aan de treinstellen te geven toegelicht. Van elke aanpak worden de uitgangspunten op een rij gezet, daarnaast wordt een verkenning van de uitwerking van deze aanpak gegeven met enkele resultaten. Voor al deze aanpakken is nog extra informatie nodig met betrekking tot de conditionering om een toewijzing van de WRC systemen over de treinstellen te kunnen geven. Welke informatie nog nodig is wordt ook per aanpak aangegeven. Aan het eind van dit hoofdstuk wordt uiteindelijk een aanpak gekozen welke verder wordt uitgewerkt in hoofdstuk 5. De verschillende aanpakken zijn geordend in (waarschijnlijke) complexiteit. Voordat de verschillende aanpakken beschreven worden, wordt het traject dat in de voorbeelden wordt aangehaald toegelicht.

4.1 Voorbeeld traject

De aanpakken zijn uitgewerkt met een aantal voorbeelden. Bij deze voorbeelden is telkens gekozen voor het traject Enschede-Hengelo. Dit heeft verschillende redenen. Zo komen hier drie verschillende diensten:

- Sprinter Enschede-Nijverdal
- Sprinter Enschede-Apeldoorn
- Intercity Enschede-Randstad

Daarnaast rijden er verschillende treintypen op dit traject. Achtereenvolgens de DM'90 die geen uitwisseling heeft met de rest van Nederland, de SGM die veel uitwisseling heeft, en de voorkeur heeft bij het uitrusten met WRC omdat het een sprinter is (zie hoofdstuk 2.3.2) en de ICM die als intercity door het gehele land komt.

Daarnaast is dit traject vlakbij de Universiteit Twente, waardoor resultaten makkelijker op waarde geschat kunnen worden. In Tabel 6 is een overzicht te vinden van de treinstellen die het doorlooppunt Enschede Drienerlo (Esd) op het traject Enschede-Hengelo passeren. Op een dag passeren in totaal 324 treinstellen op dit traject.

4.2 Aanpak 1 – *a*-aantal keren conditioneren per dag

De eerste aanpak om het aantal treinstellen te bepalen gaat uit van het feit dat het spoor enkele keren per dag geconditioneerd moet worden. Hierbij maakt het niet uit wanneer dit op de dag gebeurt. Het aantal keer dat er geconditioneerd wordt is laag. Dit model geeft een goede

beschrijving van wat er gebeurt als een conditionerend treinstel een conditionerende laag aanbrengt met een lange standtijd. Dit model wordt gemotiveerd door de experimenten die zijn gedaan gedurende een tijdelijke pilot van WRC op het traject bij Hilversum (2011, week 46-47). Tijdens dit experiment is de SGM 2960 ingezet om een boog bij Hilversum te conditioneren. Dit conditioneren gebeurde slechts 4 keer per dag, terwijl dit een druk bereden traject is (17000 ton/dag), dit in vergelijking met de pilot op de valleilijn (8000 ton/dag) waar één conditionerend treinstel op de vijf rijdende treinstellen is. Toch wordt in de boog bij Hilversum subjectief een geluidsreductie waargenomen. Echter is deze reductie niet terug te vinden in de data die verzameld wordt door het conditionerende treinstel zelf. Toch geeft dit aanleiding om te denken dat een klein aantal keer per dag conditioneren zou kunnen volstaan om geluidsreductie te bewerkstelligen.

Treinstellen	Toelichting (interpretatie)
4* ICM 3	Intercity -> Deventer
1* SGM 3	Sprinter -> Apeldoorn
2* DM'90	Sprinter -> Enschede
2* DM'90	Sprinter -> Nijverdal
1* SGM 3, 1* SGM 2	Sprinter -> Enschede
3* ICM 3	Intercity -> Enschede
2* ICM 3	Intercity -> Deventer
1* SGM 2	Sprinter -> Apeldoorn
2* DM'90	Sprinter -> Enschede
1* ICM 3	Intercity -> Hengelo
2* DM'90	Sprinter -> Nijverdal
1* SGM 3	Sprinter -> Enschede
1* ICM 3	Intercity -> Enschede
Totaal:	24 treinstellen: 11*ICM 3, 1*SGM 2, 4*SGM 3, 8*DM'90

Tabel 6: Overzicht passages met treinstellen maandag 7 feb. 2011, 8:00-9:00 doorlooppunt Enschede Drienerlo

4.2.1 Aanpak

Het doel van de aanpak van enkele keren per dag conditioneren is om zo weinig mogelijk treinstellen uit te rusten met een WRC installatie. In deze aanpak is gekozen om het uitrusten van treinstellen met WRC systemen op treinstel niveau te doen. Of een specifiek treinstel τ is uitgerust met een WRC systeem is aangegeven met de variabele w_τ . De doelfunctie is dan:

$$\min \sum_{\tau \in \Gamma} w_\tau$$

Dit onder de voorwaarde dat op alle trajecten D , op alle passages in een dag $passage(d, dag)$, minimaal a keer een treinstel passeert dat is uitgerust met een WRC systeem. Hierbij geeft $trein(r)$ het treinstel dat passeert in passage r :

$$\sum_{r \in passage(d, dag)} w_{trein(r)} \geq a \quad \forall dag \quad \forall d \in D$$

Dit probleem is een lineair integer optimalisatie probleem (ILP). De beslissingsvariabele w_r is nul of één en zowel de doelfunctie als de voorwaarde is lineair.

In dit model wordt gezocht naar een toewijzing van de WRC systemen op treinstel niveau. Dit model is met een ILP-solver voor kleine instanties snel op te lossen. Voor alle trajecten over de gehele beschikbare periode is dit probleem niet meer exact oplosbaar in een redelijke tijd.

Het ILP is doorgerekend op een 1.83GHz Intel processor. Hiervoor is gebruik gemaakt van een solver: Gurobi 4.5.2. Voor alle trajecten op alle beschikbare data en voor minstens 4 keer per dag conditioneren is het probleem tot een gap van 7% opgelost met als antwoord 172 treinstellen.

De oplossing uit deze ILP zegt iets over de ondergrens van het aantal treinstellen wat uitgerust had moeten worden in deze periode om minimaal a keer per dag te conditioneren. Doordat er achteraf bepaald is welke treinstellen uitgerust hadden moeten worden om deze dekking te krijgen, is hier in zekere mate sprake van een optimale planning. In de praktijk zullen treinstellen gestuurd moeten worden om met dezelfde treinstellen ook in de toekomst dezelfde mate van conditionering te behouden. Daarnaast zal de spreiding in de realisatie van de conditionering misschien klein zijn, maar de duur van een afwijking van het gewenste aantal conditioneringen wel groot. Treinstellen worden in de realisatie namelijk over het algemeen aan het begin van de dag aan een dienst gekoppeld en rijden daarmee de hele dag op hetzelfde traject. Al nemen we aan dat treinstellen zich uniform over het netwerk verdelen, toch is de standaardafwijking waarschijnlijk relatief hoog door het beperkte aantal trekkingen per dag of per week. Wanneer er in de praktijk slechts enkele keren per dag geconditioneerd hoeft te worden, is een kleine afwijking van de minimale conditionering per dag in de realisatie van belang. Wanneer dit model uitgewerkt wordt moet hier rekening mee gehouden worden.

4.2.2 Benodigde parameters voor model

Om bij deze aanpak aan te kunnen geven welke treinstellen uitgerust moeten worden met WRC, moeten er een aantal parameters gegeven worden. De eerste parameter is a , hoeveel keer per dag moet er geconditioneerd worden. De tweede parameter moet iets zeggen over de kosten van het in de praktijk niet bereiken van dit aantal a . Wanneer er in de realisatie absoluut niet minder geconditioneerd mag worden dan deze a , moeten praktisch alle treinstellen worden uitgerust met een WRC systeem. Als het is toegestaan om tegen bepaalde kosten af te wijken van dit aantal a , zodat incidentele verstoringen toegestaan zijn, kunnen er mogelijk veel minder treinstellen worden uitgerust.

4.2.3 Discussie

Als dit model met zijn aannamen de werkelijkheid goed beschrijft, is het waarschijnlijk niet nodig om veel treinstellen uit te rusten met een conditioneringssysteem. Bovendien is bijsturing eenvoudig omdat er door het bijsturen van een enkel treinstel al een sterk verbeterd resultaat behaald wordt, uitgaande van een kleine a . Het model is nog uitbreidbaar met verschillende wegingsfactoren voor de verschillende treinstellen, waarmee onderscheid gemaakt kan worden tussen bijvoorbeeld sprinter en intercity's.

Het model is binnen redelijke tijd oplosbaar per traject, maar dat is in eerste instantie niet het geval voor alle trajecten tegelijkertijd. Bij het verder uitwerken van dit model zal hier een oplossing voor gevonden moeten worden. Mogelijk kan dit door het probleem iteratief per traject op te lossen. Zie hiervoor ook Bijlage E: Probleem oplossing per traject.

4.2.4 Voorlopige resultaten

Omdat het model voor alle trajecten tegelijkertijd niet binnen redelijke tijd oplosbaar is, is voor de resultaten van het model gekozen om het traject Enschede-Hengelo te gebruiken zoals beschreven

in hoofdstuk 4.1. Resultaten hiervan zijn te vinden in Tabel 7. In de analyses is elke keer gebruik gemaakt van een ander aantal a en vervolgens is het model doorgerekend op alle in de data beschikbare dagen. In Tabel 7 worden ter informatie ook de treinstelnummers vermeld. Hierbij valt op, wat overigens ook te verwachten is, dat er relatief veel treinstellen uit de 3400 serie worden uitgerust. Dit zijn treinstellen van het type DM'90 en daarmee de treinstellen die voornamelijk op dit traject rijden. Treinstellen die van deze serie worden uitgerust komen relatief vaak weer terug op dit traject, dit terwijl een ICM uit de 4000 of 4200 serie door het gehele land komt en daarmee weinig invloed heeft op de conditionering op dit traject. Daarmee zijn de DM'90 treinstellen waarschijnlijk het grootste gedeelte van de dagen op dit traject aanwezig.

Wat opvalt, is dat het totaal aantal met WRC uit te rusten treinstellen bij een verdubbeld aantal a nauwelijks toeneemt. Hieruit blijkt dat wanneer een bepaalde toewijzing ervoor zorgt dat er elke dag geconditioneerd wordt, er waarschijnlijk meer dan eens per dag geconditioneerd wordt.

	Traject Enschede-Hengelo	
a	Aantal treinstellen met WRC (treinstelnummers)	Typen
1	7 (2111, 4060, 4074, 4075, 4076, 4094, 4231)	1*SGM 2, 5*ICM 3, 1*ICM 4
2	7 (2124, 3419, 3421, 4052, 4058, 4094, 4231)	1*SGM 2, 2*DM'90, 3*ICM 3, 1*ICM 4
4	7 (2111, 3419, 3421, 3423, 4090, 4094, 4231)	1*SGM 2, 3*DM'90, 2*ICM 3, 1*ICM 4
8	8 (2111, 3419, 3421, 3423, 4073, 4076, 4077, 4231)	1*SGM 2, 3*DM'90, 3*ICM 3, 1*ICM 4
16	8 (2111, 3408, 3422, 3423, 3425, 3445, 4077, 4231)	1*SGM 2, 5*DM'90, 1*ICM 3, 1*ICM 4
32	12 (2111, 3408, 3411, 3420, 3422, 3426, 4077, 4082, 4088, 4094, 4213, 4231)	1*SGM 2, 5*DM'90, 4*ICM 3, 2*ICM 4
64	19	-
128	34 (op 2 dagen wordt de norm dan niet gehaald)	-

Tabel 7: Resultaten model 1, traject Enschede-Hengelo

4.3 Aanpak 2 – gemiddeld 1 op de x treinstellen moet conditioneren

De tweede aanpak gaat er vanuit dat gemiddeld genomen 1 op x treinstellen moet conditioneren. Dit model geeft een goede beschrijving van de werkelijkheid wanneer een treinstel een conditionering aanbrengt voor x treinstellen, ongeacht de hoeveelheid al aanwezige conditionering. Waarbij ook de afname van de conditionering bij de passage van een treinstel onafhankelijk is van de al aanwezige conditionering en het treintype. Dit model wordt gemotiveerd door de experimenten op de Valleilijn. Hier conditioneert één op de vijf treinstellen op de lijn. Wanneer dit conditionerende treinstel rijdt wordt er door omwonenden geen geluidsoverlast geconstateerd, wanneer het treinstel echter een tijd niet op het baanvak rijdt wordt er vaak geluidsoverlast gemeld door omwonenden.

4.3.1 Model

Dit model vertoont sterke gelijkenis met Aanpak 1 – a -aantal keren conditioneren per dag. In deze tweede aanpak ligt de frequentie van de conditionering veel hoger en hangt het aantal keer conditioneren af van de bezetting van het traject. Vanwege de grotere complexiteit van dit model is gekozen voor een methode waarmee geen specifieke treinstellen worden uitgerust met WRC, in plaats daarvan wordt een fractie van een treinstelgroep uitgerust met WRC systemen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de subgroepen zoals zijn bepaald in paragraaf 3.3.

In dit model is opnieuw het doel om het aantal met WRC uitgeruste treinstellen zoveel mogelijk te beperken. In dit model worden per treintypegroep u_t treinstellen van het totaal aantal van n_t treinstellen in een treintypegroep uitgerust met WRC systemen. In de doelfunctie is onderscheid te maken tussen de verschillende treintypen. Per treintypegroep is een factor o_t die de onderlinge voorkeur van treintypen aangeeft. Hiermee is het mogelijk om sprinters de voorkeur te geven boven intercity's wanneer het gaat om het uitrusten met WRC. Daarnaast heeft dit model de mogelijkheid om kosten te verbinden aan het uitrusten van een treintype door middel van c_2 . Hiermee kan het aantal verschillende treintypen waarin treinstellen worden uitgerust met WRC beperkt worden (zie hiervoor ook paragraaf 2.4.2). Om incidenten in de gegevens niet te zwaar te laten meewegen in het resultaat, is het mogelijk om tegen te bepalen kosten af te wijken van de gemiddelde norm. Elke overschrijding van de norm telt met een factor c_1 mee in de doelfunctie. Om het totaal aantal met WRC uitgeruste treinstellen te minimaliseren wordt de volgende doelfunctie opgesteld:

$$\min \sum_{t \in T} o_t * u_t + c_1 \sum_{d \in D} v_d + c_2 \sum_{t \in T} \theta_t$$

In deze doelfunctie worden de kosten c_2 voor het uitrusten van een type vermenigvuldigd met de som $\sum_{t \in T} \theta_t$, hierin geeft de θ_t aan of er treinstellen van een treintypegroep t zijn uitgerust met WRC systemen. Dit wordt weergegeven in de volgende vergelijking, waarbij M een groot getal is en t' een subgroep van T dat alle subgroepen van eenzelfde treintype bevat:

$$\theta_t * M \geq \sum_{t' \in t'} u_{t'} \quad \forall t' \subset T$$

De kosten c_1 in de doelfunctie zijn de kosten voor het negeren van een daggemiddelde. Bij het daggemiddelde moet het totaal aantal treinstellen dat is uitgerust met een WRC systeem dat passeert op een traject per dag, één x -te van het totaal aantal passages op dit traject op die dag zijn. Hiervoor is het aantal treinstellen van een type dat op een dag op een traject rijdt nodig, $a(t, d, dag)$. In de vergelijking is in de rechterkant nog een vermenigvuldigingsfactor $1 - v_d$ opgenomen. Wanneer v_d gelijk is aan één wordt de voorwaarde genegeerd en wordt dit meegenomen in de kosten van c_1 in de doelfunctie.

$$\sum_{t \in T} \frac{u_t}{n_t} a(t, d, dag) \geq (1 - v_d) \frac{1}{x} \sum_{t \in T} a(t, d, dag) \quad \forall dag, d \in D$$

4.3.2 Benodigde parameters voor model

Om met dit model aan te kunnen geven welke treinstellen uitgerust moeten worden met WRC om landelijk de gemiddelde dekking te halen, moeten er een aantal parameters gegeven worden. De eerste parameter is x in één op de x treinstellen moet conditioneren. Daarnaast moeten c_1 , c_2 en θ_t gegeven worden. Als laatste moet bepaald worden per welke tijdsinterval dit gemiddelde gehaald moet worden. Bij een klein interval is de spreiding in de conditionering kleiner dan bij een langer

interval, het uitrekenen van het model zal bij een kleiner interval waarschijnlijk ook langer duren door het toenemen van het aantal voorwaarden.

4.3.3 Discussie

Als dit model met zijn aannamen de werkelijkheid goed beschrijft kunnen de resultaten getest worden op spreiding door de resultaten uit dit model toe te passen op de treinstellen. Waar het model een aantal treinstellen per subgroep geeft kan dit ook getest worden door dit aantal treinstellen uit de subgroep uit te rusten met een WRC systeem en dan de verschillende voorwaarden opnieuw te controleren. Op deze manier kunnen uitspraken gedaan worden over de spreiding van de oplossing en de betrouwbaarheid van de oplossing zonder bijsturing in de treinstellen die zijn uitgerust met WRC. Dit kan dan worden uitgezet tegen de situatie waarin wel gestuurd wordt op de treinstellen die zijn uitgerust met WRC. Op deze manier kunnen de resultaten geanalyseerd worden en kunnen uitspraken gedaan worden over de staat van de conditionering bij verschillende niveaus van bijsturing.

Op een gelijke manier kan ook het resultaat getest worden op verstoringen. Bij een verstoring worden subgroepen tijdelijk opgesplitst. Tijdens deze opsplitsing verandert dus plotseling de verhoudingen van met WRC uitgeruste treinstellen binnen een groep. De oplossingen uit dit model kunnen getest worden op de gevoeligheid voor veranderingen in deze aantallen.

Net als Aanpak 1 – a -aantal keren conditioneren per dag is deze methode binnen afzienbare tijd oplosbaar per traject. Bij verschillende combinaties van de parameters voor alle trajecten tegelijkertijd geeft het echter lange rekentijden. Bij het verder uitwerken van deze aanpak zal hier een oplossing voor gevonden moeten worden. Mogelijk kan dit door het probleem iteratief per traject op te lossen. Zie hiervoor ook Bijlage E: Probleem oplossing per traject.

4.3.4 Voorlopige resultaten

Het model is doorgerekend met verschillende parameters. Dit model is zowel op de voorbeelddata als op alle data toegepast. De resultaten die behaald zijn voor verschillende waarden van o_t zijn te vinden in Tabel 8. Omdat het hier slechts gaat om een traject op een dag heeft het veranderen van c_1 geen zin. Omdat in eerste instantie alleen sprinters worden uitgerust heeft het verhogen van o_{icm3} geen zin. c_2 beperkt de diversiteit in de verschillende treintypen die worden uitgerust, omdat op de voorbeelddata slechts een treintype is uitgerust heeft het veranderen van deze parameter ook geen invloed.

Instantie	c_1	c_2	o_{icm3}	Totaal aantal treinstellen	DM'90	SGM 2	SGM 3	ICM 3
1	10000	0	1	14	14	0	0	0
2	10000	0	0,3	38	0	0	0	38

Tabel 8: Resultaten model 2 op voorbeelddata

Naast dat het model is opgelost voor de data van het voorbeeldtraject uit paragraaf 4.1, is het model ook opgelost voor alle data. Hierbij is gebruik gemaakt van $c_1 = 1$, $c_2 = 0$ en $o_t = 1$ voor alle t uit T . De subgroepen die in deze resultaten zijn gebruikt zijn berekend met een drempelwaarde voor isolatiebepaling $\gamma = 0.10$. In dit geval wordt er 25 keer niet het daggemiddelde gehaald en worden er in totaal 234 treinstellen uitgerust met WRC. Het model is doorgerekend met behulp van een GUROBI solver aangestuurd vanuit een C# programma op een 1.83GHz Intel processor. Het programma heeft dan in totaal ongeveer 2500 seconden nodig om het antwoord te vinden. Deze methode is vaker doorgerekend. Hierbij zijn voor verschillende waarden van de parameters

resultaten berekend door het probleem per traject op te lossen in plaats van in het geheel. De resultaten hiervan zijn terug te vinden in Bijlage E: Probleem oplossing per traject.

4.4 Aanpak 3 – Na x treinstellen moet geconditioneerd worden

Vanuit de informatie die bekend is over de conditionering in Amerika [20], wordt er vanuit gegaan dat het eenmaal aanbrengen van de conditionering genoeg is voor ongeveer anderhalve kilometer trein. In Nederland zijn treinstellen ongeveer driehonderd meter lang en zou dus één op de vijf treinstellen volstaan [19]. Omdat de conditionering theoretisch een zeer smal bereik heeft wanneer het gaat om het goed functioneren, kan de conditionering slecht worden gebufferd zonder teveel te conditioneren. Om constant een werkende conditionering te bereiken moet er dus regelmatig geconditioneerd worden. Daarom is het belangrijk dat de conditionerende treinstellen min of meer uniform over een dag verspreid zijn.

Om een model te maken wat rekening houdt met deze spreiding wordt het spoor eerst ingedeeld in verschillende toestanden. Deze toestanden geven aan hoeveel treinstellen zijn gepasseerd sinds de laatste keer dat er geconditioneerd is. Op deze toestanden worden restricties gezet zodanig dat het aantal treinstellen dat over niet geconditioneerd spoor rijdt beperkt kan worden. Aan de hand van deze bepaling wordt een minimale toewijzing van WRC systemen over de verschillende treingroepen bepaald zodanig dat de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor beperkt is.

4.4.1 Globale aanpak

In dit model wordt aangenomen dat na het passeren van x treinstellen de conditionering verdwenen is en het spoor zich dus in ongeconditioneerde toestand bevindt. Hierbij is geen verschil gemaakt tussen het eerste treinstel dat over ongeconditioneerd spoor rijdt en een daaropvolgend treinstel. Indien hier wel een verschil in zit moet het aantal toestanden van het spoor worden uitgebreid. Om het aantal treinstellen met WRC systemen te bepalen wordt eerst de status van het spoor beschreven bij een passage. Daarna wordt met behulp van deze omschrijving van een gegeven toewijzing de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor gegeven. Deze berekening is vervolgens gebruikt om de toewijzing te veranderen terwijl de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor beperkt blijft. De toestanden van het spoor kunnen weergegeven worden in een vector:

$$b = \begin{pmatrix} \text{net geconditioneerd} \\ 1 \text{ treinstellen gepasseerd na conditionerend treinstel} \\ \vdots \\ x-1 \text{ treinstellen gepasseerd na conditionerend treinstel} \\ x \text{ treinstellen gepasseerd/ongeconditioneerd} \end{pmatrix}$$

In de vector b wordt voor elke toestand de kans gegeven dat het spoor zich in deze toestand bevindt. Met behulp van deze vector kan er ook een overgangsmatrix gemaakt worden van $b_r \rightarrow b_{r+1}$, met r de passage over een traject. Deze overgangsmatrix voor een gegeven kans p^* dat een treinstel dat passeert is uitgerust met een WRC systeem is als volgt:

$$P(p^*) = \begin{pmatrix} p^* & 1-p^* & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 1-p^* & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 0 & 1-p^* \\ p^* & 0 & 0 & 0 & 1-p^* \end{pmatrix}$$

Bij een passage r met treintype t en kans p_t dat een treinstel van type t is uitgerust met een WRC systeem ziet deze er dan als volgt uit:

$$b_{r+1} = b_r P(p_{treintype(r)}) = b_r \begin{pmatrix} p_t & 1-p_t & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 1-p_t & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 0 & 1-p_t \\ p_t & 0 & 0 & 0 & 1-p_t \end{pmatrix}$$

Wanneer een treinstel over een traject rijdt verandert de status van het spoor. De status van het spoor gaat bij een met WRC uitgeruste treinstel terug naar nul. Wanneer een treinstel niet is uitgerust met WRC en het spoor bevindt zich in status x , dan gebeurt er niets, in alle andere gevallen gaat het spoor naar een lagere status.

Wanneer b_0 gegeven en p_t voor elke subgroep bekend is, kan van een traject d een uitdrukking gevonden worden voor de kans dat het traject zich in een toestand bevindt.

$$b_{r,d} = b_0 \prod_{r' \in R_d} P(p_{treintype(r')})$$

Omdat voor het goed werken van de conditionering de toestand van het spoor na elke passage van belang is, worden de kansen dat het spoor zich in een bepaalde toestand bevindt per traject d opgeteld en gemiddeld. De toestandsvector $\bar{b}_d$ geeft hiermee aan welke fractie van de passages over het spoor, het spoor zich in een toestand bevindt.

$$\begin{aligned} \bar{b}_d &= \frac{1}{|R_d|} \sum_{r \in R_d} b_{r,d} \\ &= \frac{1}{|R_d|} (b_0 + b_{1,d} + \dots + b_{|R_d|,d}) \\ &= \frac{1}{|R_d|} \left(b_0 \sum_{r \in R_d} \prod_{r'=1}^r P_{r'} \right) \end{aligned}$$

Met deze uitdrukking voor de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor is het mogelijk om een optimalisatie probleem op te stellen. Dit optimalisatie probleem heeft als doel om het minimum aantal treinstellen te vinden dat uitgerust moet worden met WRC. De doelfunctie is dan ook het minimum van het totaal aantal treinstellen dat is uitgerust met een WRC systeem:

$$\min \sum_{t \in T} u_t$$

Bij het bepalen van het aantal met WRC systemen uit te rusten treinstellen per treintypesubgroep moet dit aantal treinstellen natuurlijk groter zijn dan nul en niet het maximaal aantal treinstellen in een subgroep overschrijden. Deze minimalisatie is van onderaf begrensd door het maximaal aantal passages over ongeconditioneerd spoor. Daarvoor wordt per traject de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor berekend en dit mag niet de fractie f overschrijden:

$$\left(b_0 \sum_{r \in R_d} \prod_{r'=1}^{r'=r} P(p_{treintype(r')}) \right)_x \leq f, \forall d \in D \quad (1)$$

Met $p = \{p_0, p_1, \dots, p_{|T|}\}$, $p_t = \frac{u_t}{n_t}$, $\forall t \in T$. Hiermee is deze voorwaarde afhankelijk van de beslissingsvariabele u_t . Deze afhankelijkheid bestaat onder andere uit een veelvoudige vermenigvuldiging van de beslissingsvariabele u_t . Met deze afhankelijkheid is dit een grote niet lineaire voorwaarde. Bij gegeven p duurt het eenmaal uitrekenen van deze voorwaarde voor een representatieve grootte van R_d per traject al snel tientallen seconden. Door deze complexe voorwaarde is dit probleem niet binnen afzienbare tijd op een directe manier op te lossen. Het uitrekenen van alle mogelijkheden is door het formaat van de oplossingsruimte (meer dan $2 \cdot 10^{43}$ mogelijke toewijzingen) ook niet mogelijk.

4.4.2 Benodigde parameters voor het model

Om een toewijzing van het aantal treinstellen dat uitgerust moet worden met WRC voor een landelijke dekking te verkrijgen, zijn er een aantal parameters. Als eerste de x , het aantal treinstellen waarvoor één treinstel dat is uitgerust met WRC kan conditioneren. Om een antwoord te vinden op deze vraag moet onderzocht worden hoeveel conditionering een treinstel binnen de veiligheidsgrenzen in één keer kan aanbrengen. Wanneer deze hoeveelheid wordt gedeeld door de hoeveelheid conditionering die een passerend treinstel verbruikt is er bekend voor hoeveel treinstellen één treinstel kan conditioneren. Naast de parameter x moet ook de fractie f van de treinstelpassages die over ongeconditioneerd spoor rijdt, bepaald worden.

4.4.3 Discussie

Wanneer de aannamen voor deze aanpak de werkelijkheid goed omschrijven, geeft deze aanpak een toewijzing van het aantal treinstellen dat per subgroep uitgerust moet worden met WRC. In deze aanpak kan de fractie f gebruikt worden voor een gevoeligheidsanalyse. Door deze factor te veranderen moeten er meer of juist minder treinstellen worden uitgerust met WRC. Op deze manier kan een afweging tussen kwaliteit en kosten gemaakt worden. Het oplossen van het model is binnen afzienbare tijd niet op een directe manier mogelijk door de niet lineaire voorwaarde. Zo kost het eenmaal berekenen van de voorwaarde op alle doorlooppunten voor de vijf maanden data die beschikbaar is, bij $x = 5$ ongeveer 200 seconden. Bij het uitwerken van dit model zal een heuristiek gevonden moeten worden die een oplossing op dit optimalisatie probleem vindt. Bij dit model is het net als in Aanpak 2 – gemiddeld 1 op de x treinstellen moet conditioneren, mogelijk om verstoringen in het spoorwagennet door te rekenen. Verstoringen zorgen voor een plotselinge verandering van de omloop van treinstellen. Deze verstoringen kunnen gesimuleerd worden door een subgroep op te splitsen en de met WRC systemen uitgeruste treinstellen ongelijk over deze subgroepen te verdelen. Wanneer dit gebeurt en hiermee het model opnieuw doorgerekend wordt, kan de invloed van een verstoring vertaald worden in een toename van de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor.

4.4.4 Voorlopige resultaten

Het in deze paragraaf geschetste model met oplossingsmethode is doorgerekend met de data uit het voorbeeld dat beschreven is in paragraaf 4.1. Het gaat hier om data van maandag 7 februari 2011 van 8:00 tot 9:00 op het traject Enschede-Hengelo. Bij het verkrijgen van een resultaat is gekozen voor $x = 5$ en maximaal $f = 10\%$ van de passages over ongeconditioneerd spoor. Voor de begintoestand van het spoor is gekozen om met geconditioneerd spoor te beginnen:

$$b_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Voor de indeling in subgroepen is gekozen voor een isolatiefactor van 0.04. In de resultaten zijn alle voor dit punt relevante subgroepen weergegeven met het aantal uit te rusten treinstellen om aan de voorwaarde te voldoen en het totaal aantal treinstellen in de subgroep. De resultaten zijn te vinden in Tabel 9.

Treintype	Aantal passages in periode	Aantal beschikbare treinstellen	Aantal met WRC uitgeruste treinstellen vanuit het model
DM'90	8	23	23
ICM 3	11	87	15
SGM 2	2	29	0
SGM 3	3	58	0
Totaal	24	217	38

Tabel 9: Resultaten model 3 op voorbeelddata

4.5 Aanpak 4 – bij een bepaald niveau van conditionering moet worden geconditioneerd

In paragraaf 2.3 is beschreven dat vanuit theoretisch oogpunt de conditionering van veel factoren afhankelijk is. Zo hangt de hoeveelheid conditionering die aangebracht wordt van het type trein af, hangt de afname van de werking van de conditionering onder andere af van het aantal assen, de vorm van de wielen en het gewicht. Daarnaast is het mogelijk dat wanneer er niet meer volledige conditionering aanwezig is, er nog steeds door gedeeltelijke conditionering geluidsreductie plaatsvindt, al zij het in mindere mate. Om met al deze verschillen rekening te houden is het laatste en meest complexe model gemaakt. Voor deze aanpak wordt eerst een model gemaakt waarmee de hoeveelheid aanwezige conditionering kan worden beschreven. Aan de hand van deze beschrijving wordt een model opgesteld wat aan de hand van de werking van de conditionering, kosten verbindt aan een toewijzing van de WRC systemen over de treinstellen. Met dat er kosten aan een toewijzing verbonden zijn kan er geminimaliseerd worden op het aantal treinstellen, gegeven bepaalde kosten. Of kunnen de kosten geminimaliseerd worden gegeven het aantal treinstellen.

4.5.1 Globale aanpak

Naar aanleiding van de bevindingen in hoofdstuk 2.3 wordt aangenomen dat de werking van de conditionering alleen afhangt van de aanwezige conditionering, de nieuw aangebrachte conditionering en de treintypen die er overheen rijden. Omdat binnen de gedefinieerde treintypesubgroepen altijd eenzelfde treintype gebruikt wordt, wordt er vanuit gegaan dat de conditionering niet afhangt van het treintype maar van de subgroep. Hierbij laten we spoorkarakteristieken die per traject kunnen verschillen buiten beschouwing. De afname van de werking van de conditionering is een functie van de passerende subgroep en de aanwezige conditionering in de vorige passage $l(r-1)$: $f_w(\text{trein_type}(r), l(r-1))$.

Hiermee is de hoeveelheid werkende conditionering uitgedrukt in één dimensie. Deze functie zou voor zwaardere treintypen de conditionering meer kunnen laten degraderen dan voor andere treintypen. Daarnaast kan de afname van de werking van de conditionering afhangen van de aanwezige hoeveelheid conditionering.

Er is aangenomen dat voor een goede werking van WRC de aanwezige hoeveelheid conditionering niet een maximum van β_l mag overschrijden. Daarnaast is de conditionering niet meer volledig onder een hoeveelheid van α_l . Daarom moet gelden $\alpha_l \leq l(r) \leq \beta_l$.

De toename van de werkende conditionering hangt slechts af van de huidige conditionering en van het treinstel die het aanbrengt. De toename van de conditionering kan voor een treinstelpassage van een treinstel dat is uitgerust met een WRC systeem is dan te beschrijven met:

$$f_s(\text{trein_type}(r), l(r-1))$$

Deze functie zou bijvoorbeeld de conditionering meer kunnen laten toenemen als er minder aanwezig is. Daarnaast kan hierin verwerkt worden dat een sprinter meer werkzame conditionering aanbrengt dan een intercity.

In de oplossingsmethode is gekozen om te werken met simulaties, zoals later wordt uitgelegd. Hierdoor kan er niet meer gewerkt worden met de kans dat een treinstel uit een subgroep is uitgerust met een WRC systeem. Mogelijk gaat het optimaliseren op treinstel niveau te diep. Om deze mogelijkheden beide open te houden is gekozen om een nieuwe functie te introduceren die aangeeft of een treinstel is uitgerust met een WRC systeem:

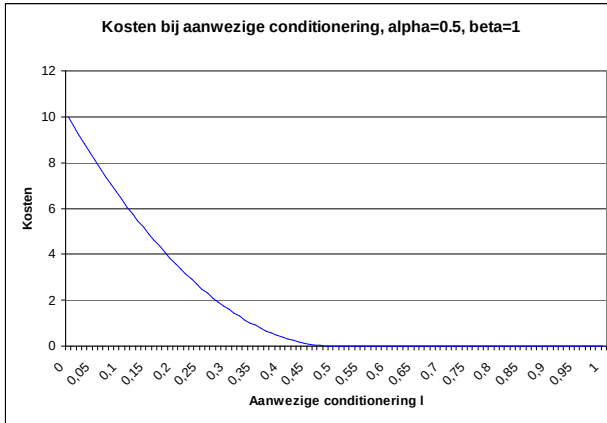
$$\kappa(\text{trein_type}(r), u_{\text{trein_type}(r)}) = \begin{cases} 0 & \text{Treinstel in passage } r \text{ is niet uitgerust met WRC} \\ 1 & \text{Treinstel in passage } r \text{ is wel uitgerust met WRC} \end{cases}$$

Bij de aannamen met betrekking tot het aanbrengen van de conditionering in paragraaf 2.3.2 is al aangenomen dat het aanbrengende treinstel rekening houdt met de al aanwezige conditionering door binnen de veiligheidsgrenzen te conditioneren. Hierdoor kan in de bepaling van de hoeveelheid werkzame conditionering na een passage aangenomen worden dat de conditionering niet de maximale conditionering β_l overschrijdt. Hiermee kan de conditionering na passage r beschreven worden als een afname door het passerende treinstel, een toename van de conditionering als dit treinstel is uitgerust met een WRC systeem en dit alles begrenst op de maximale hoeveelheid conditionering:

$$l(r, u) = \min(l(r-1) + \kappa(\text{trein_type}(r), u_{\text{trein_type}(r)}) * f_s(\text{trein_type}(r), l(r-1)) - f_w(\text{trein_type}(r), l(r-1)), \beta_l)$$

Baserend op de functie voor de werkzame conditionering kan een kosten functie gegeven worden die per passage aangeeft wat de kosten zijn. De kosten zouden een vertaling van de werkelijke geluidsoverlast kunnen zijn. Een voorbeeld van de kostenfunctie op de hoeveelheid aanwezige conditionering is te vinden in Figuur 10, met als bijbehorende formule:

$$K(l) = \begin{cases} 0 & \text{als } l \geq \alpha_l \\ 10 \left(\frac{\alpha_l - l}{\alpha_l} \right)^2 & \text{als } l < \alpha_l \end{cases}$$



Figuur 10: Voorbeeld kostenfunctie bij conditionering

Van elke passage over een spoor kan nu de aanwezige conditionering bepaald worden. Aan deze conditionering kunnen kosten verbonden worden. Met deze gegevens worden twee mogelijke optimalisatie problemen geformuleerd.

Doelfunctie 1

Als eerste de optimalisatie waarbij, bij een gegeven maximum aan kosten voor passages over niet volledig geconditioneerd spoor, een minimale toewijzing van WRC systemen voor de treinstellen vinden. Hierbij is de doelfunctie het aantal uitgeruste treinstellen te minimaliseren:

$$\min \sum_{r \in T} u_r$$

Waarbij de kosten per traject gebonden zijn door maximale kosten B_l :

$$\sum_{r \in R_d} K(l(r, u)) \leq B_l, \forall d \in D$$

Waarbij B_l de maximaal toegestane kosten per traject zijn.

Doelfunctie 2

De tweede optimalisatie die gedaan kan worden is gegeven het maximaal aantal treinstellen dat uitgerust mag worden met WRC, bepaal de toewijzing van deze WRC systemen zodanig dat dit minimale kosten met zich meebrengt. De doelfunctie is de totale kosten van alle trajecten:

$$\min \sum_{d \in D} \sum_{r \in R_d} K(l(r, u))$$

Hierbij is het totaal aantal uitgeruste treinstellen begrensd door B_u :

$$\sum_{t \in T} u_t \leq B_u$$

Deze optimalisatieproblemen kunnen zowel toegepast worden op specifieke treinstellen als op de treintypesubgroepen. In beide modellen moet voor alle passages op alle trajecten de waarde van $l(r, u)$ berekend worden. Wanneer de optimalisatie wordt toegepast op treinstelniveau zou op deze modellen met heuristische antwoorden gevonden kunnen worden. Wanneer gebruik gemaakt wordt van de subgroepen zoals gedefinieerd in paragraaf 3.3 is $l(r, u)$ stochastisch en zou voor de berekening van $l(r, u)$ bijvoorbeeld simulaties gebruikt kunnen worden.

4.5.2 Benodigde parameters voor model

Om uit deze methode een minimaal aantal uit te rusten treinstellen of minimale kosten bij een maximaal aantal treinstellen te verkrijgen moeten nog een aantal gaten worden ingevuld. Per treintype moet de toename en de afname functie van de hoeveelheid conditionering gegeven worden: f_w en f_s . Vervolgens moet aangegeven worden binnen welke α_i en β_i de conditionering volledig werkt. Als laatste moet er een kostenfunctie $K(l)$ gevonden worden die kosten koppelt aan de hoeveelheid conditionering wanneer er niet volledig is geconditioneerd.

4.5.3 Discussie

Dit model geeft de mogelijkheid om alle kennis die over het conditioneren bekend is erin te verwerken. Hiermee kan het model beter dan de andere modellen de werkelijkheid beschrijven. Deze informatie is alleen niet allemaal bekend en moet daarmee waarschijnlijk in veel gevallen afgeschat worden wat weer ten koste gaat van de betrouwbaarheid. Door al deze informatie is het model ook erg complex. Dit gaat ten koste van de nauwkeurigheid waarmee een optimale oplossing gevonden kan worden. Mogelijk kan wel Doelfunctie 2 gebruikt worden om een toewijzing, verkregen uit een van de andere modellen, te verbeteren. Hierbij is het totaal aantal treinstellen dat is uitgerust met WRC bepaald door een andere aanpak. Wanneer een toewijzing bekend is uit een andere aanpak kan binnen deze toewijzing door middel van Doelfunctie 2 geschoven worden in de toewijzing om op deze manier een betere toewijzing te vinden. Door de complexiteit van dit model en het ontbreken van een groot gedeelte van de benodigde parameters, zijn er voor dit model geen voorlopige resultaten.

4.6 Scenario keuze

Om het aantal treinstellen dat moet worden uitgerust met WRC te kunnen bepalen is een van de eerder geschetste aanpakken gekozen. Elke aanpak heeft nog bepaalde parameters nodig om een oplossing op het probleem te vinden. Met elke aanpak is het mogelijk om een antwoord te vinden onder de gegeven voorwaarden. In een overleg met ProRail zijn de verschillende methoden doorgenomen en is er een keuze gemaakt. De keus is gevallen op “Aanpak 3 – Na x treinstellen moet geconditioneerd worden”. De afwegingen om tot deze keus te komen worden hier volgend geschetst.

4.6.1 Keuzeproces

“Aanpak 1 – a -aantal keren conditioneren per dag” lijkt een niet erg realistisch model, de proef bij Hilversum geeft wel aanleiding tot het slechts enkele keren doseren per dag, maar de resultaten hier zijn slechts marginaal en alleen subjectief waargenomen. Daarnaast is dit model simpel en houdt het weinig rekening met de spreiding van de treinstellen over de dag.

“Aanpak 2 – gemiddeld 1 op de x treinstellen moet conditioneren” is een model wat redelijk simpel op te lossen is. Dit model is gestoeld op de ervaringen van de valleilijn. Op de valleilijn rijdt door het beperkte aantal treinstellen en de regelmatige inzet het conditionerende treinstel heel regelmatig. Hierdoor is het aantal treinstellen dat gemiddeld is uitgerust ongeveer gelijk aan elk zoveelste treinstel dat conditioneerd. De spreiding van de inzet van de met WRC uitgeruste treinstellen is namelijk minimaal. Hierdoor is dit model te simpel en niet realistisch genoeg, wel kan deze aanpak als opstap dienen naar een ander model. Dit doordat de resultaten van dit model misschien te eenvoudig zijn, toch is het mogelijk dat resultaten van dit model niet veel verschillend van de optimale resultaten van de complexere modellen.

“Aanpak 3 – Na x treinstellen moet geconditioneerd worden” is een model dat door de volgorde die in de berekeningen moet worden meegenomen een stuk ingewikkelder is dan de voorgaande modellen. Deze volgorde zorgt er echter wel voor dat er minder spreiding zit in het aantal

treinstellen dat moet worden uitgerust met WRC. Hierdoor sluit dit model beter aan bij het theoretische model met betrekking tot de werking van WRC.

“Aanpak 4 – bij een bepaald niveau van conditionering moet worden geconditioneerd” is een scenario waarbij alle mogelijke informatie die bekend is in het model gestopt kan worden. Dit model is echter door zijn complexiteit een bijzonder rekenintensief model. Hierdoor moet er of afgedaan worden aan de betrouwbaarheid van de resultaten, of er moet bijzonder lang gerekend worden. Daarnaast kan dit model wel alle mogelijke informatie verwerken, maar is veel van deze informatie (nog) niet (exact) beschikbaar.

Al bovenstaande opmerkingen in acht nemende is er gekozen om “Aanpak 3 – Na x treinstellen moet geconditioneerd worden” verder uit te werken. Dit gebeurt in hoofdstuk 5. De resultaten die hieruit volgen zijn vervolgens beschreven in hoofdstuk 6.

5 Uitwerking “na x treinstellen moet geconditioneerd worden”

Om het aantal treinstellen dat moet worden uitgerust met WRC te kunnen bepalen, zijn in het voorgaande hoofdstuk verschillende manieren van aanpakken geschetst voor de modelvorming. Uit deze scenario's is uiteindelijk een keus gemaakt voor “Aanpak 3 – Na x treinstellen moet geconditioneerd worden”. Deze methode zal in dit hoofdstuk als uitgangspunt gebruikt worden. In dit model conditioneert een met WRC uitgerust treinstel voor x treinstellen, waarna de conditionering verdwenen is. Vanuit de data die bekend is vanuit de dienstregeling wordt er gebruik gemaakt van kansen om, bij een gegeven toewijzing van de WRC systemen over de treinstellen, per traject de verwachte fractie van het aantal treinstellen dat over ongeconditioneerd spoor rijdt te kunnen geven. Met behulp van restricties op deze fractie wordt er door middel van local search een toewijzing gezocht waarbij zo weinig mogelijk treinstellen uitgerust worden met WRC.

5.1 Aannamen

Bij het opstellen van dit model is uitgegaan van een aantal aannames met betrekking tot de werking en de randvoorwaarden. Deze aannames zijn nodig om het model te kunnen maken en ook de resultaten hiervan weer terug te kunnen vertalen naar de werkelijkheid. Een aantal van deze aannames zijn al eerder beschreven en gemotiveerd, maar worden hier nogmaals herhaald.

Een triviale maar simpele aanname voor dit model is het feit dat overal binnen een traject eenzelfde aantal treinstellen nodig is om te conditioneren. Het is namelijk niet mogelijk om halverwege een traject meer of minder treinstellen met WRC in te zetten. Een trein die aan een traject begint zal dit traject namelijk altijd afmaken. Wanneer er niet overal op het traject evenveel geconditioneerd moet worden, wordt er vanuit gegaan dat de treinstellen die uitgerust zijn met WRC voldoende intelligentie aan boord hebben om deze verschillen binnen een traject op te vangen.

Er wordt geen rekening gehouden met de plaatsing van de conditioneerinstallatie onder de trein. Wanneer deze zich aan een van beide uiteinden van een treinstel bevindt, dan is het aantal passages sinds de vorige conditionering een treinstel meer of minder, dit is dan afhankelijk van de oriëntatie van de trein op het spoor. Het niet rekening houden met deze afhankelijkheid staat gelijk aan het installeren van een WRC systeem in het midden van het treinstel.

Voor de werking van de conditionering wordt er in dit model vanuit gegaan dat wanneer een treinstel met WRC over een traject rijdt, dit traject zich daarna in geconditioneerde toestand bevindt. Door elk treinstel dat vervolgens over dit traject rijdt degradeert de conditionering, deze degradatie is voor elk treintype gelijk en is daarmee onafhankelijk van lengte, gewicht, aantal wielen etc. Na x treinstellen is de conditionering verdwenen en wordt er over ongeconditioneerd spoor gereden.

5.2 Bepaling fractie passages over ongeconditioneerd spoor

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de status van het spoor weergegeven kan worden bij een gegeven toewijzing van het aantal treinstellen uitgerust met een WRC systeem per subgroep. Uit deze status is de fractie van de tijd dat over ongeconditioneerd spoor gereden wordt te bepalen. Hiervoor zal notatie ingevoerd worden die gebruikt wordt om de status van het spoor aan te geven en wordt de verandering van de status van het spoor beschreven. Tenslotte wordt aangegeven hoe restricties op de status van het spoor gegeven kunnen worden.

5.2.1 Toestand spoor

Zoals in de beschrijving van het globale model in paragraaf 4.4.2 is aangegeven kan de toestand van het spoor worden aangeduid in een vector b

$$b = \begin{pmatrix} \text{net geconditioneerd} \\ 1 \text{ treinstellen gepasseerd na conditionerend treinstel} \\ \vdots \\ x-1 \text{ treinstellen gepasseerd na conditionerend treinstel} \\ x \text{ treinstellen gepasseerd/ongeconditioneerd} \end{pmatrix}$$

In deze vector b wordt voor elke toestand de kans gegeven dat het spoor zich in deze toestand bevindt. Opgemerkt moet worden dat het conditionerende treinstel meetelt in de x uit “na x treinstellen moet geconditioneerd worden”. De set H is de set met alle mogelijk toestanden waarin het spoor zich kan bevinden. Omdat de vector b de kans weergeeft dat het spoor zich in een bepaalde toestand bevindt moet gelden dat $\sum_{h \in H} (b)_h = 1$.

Om de veranderingen van de toestand van het spoor te kunnen bepalen, is een begintoestand b_0 gedefinieerd worden. Voor deze definitie zijn verschillende mogelijkheden:

1. Mogelijkheid 1 is om aan te nemen dat het spoor zich in geconditioneerde toestand bevindt, $(b_0)_h = 0, h \in H \setminus \{0\}; (b_0)_0 = 1$.
2. Mogelijkheid 2 is om de kans dat het spoor zich in een begintoestand bevindt voor alle toestanden gelijk te maken. Met andere woorden, $(b_0)_h = \frac{1}{x+1}, h \in H$.
3. Mogelijkheid 3 is om het spoor in niet geconditioneerde toestand te laten beginnen $(b_0)_h = 0, h \in H \setminus \{x\}; (b_0)_x = 1$.
4. Mogelijkheid 4 is om de begintoestand van het spoor gelijk te laten zijn aan de laatste toestand van het spoor. $(b_0)_h = (b_{|R|})_h, h \in H$

Uit deze mogelijkheden moet een keuze gemaakt worden. Mogelijkheid 4 geeft bij het oplossen problemen omdat hiervoor veel vergelijkingen moeten worden opgelost. Mogelijkheid 1 tot en met 3 zijn mogelijkheden die reëel lijken en geen moeilijke berekeningen vergen. Bij voldoende passages is de begintoestand niet een belangrijke factor, daarom wordt hier niet veel aandacht aan besteed. Bij de analyses is gekozen voor mogelijkheid 1: het spoor is geconditioneerd.

5.3 Local search voor vinden toewijzing

Er is gekozen voor een model met als doelfunctie het minimaliseren van het totaal aantal met WRC systemen uitgeruste treinstellen. Dit terwijl het aantal passages over ongeconditioneerd spoor beperkt is, zoals beschreven in paragraaf 4.4. Het oplossen van dit optimalisatie probleem is erg complex en met bestaande directe methoden alleen voor kleine instanties op te lossen. Hierdoor is gekozen om voor het oplossen van dit probleem gebruik te maken van heuristieken. Er is gekozen om gebruik te maken van een ‘local search’ aanpak. In deze paragraaf wordt eerst de algemene methode van local search toegelicht, vervolgens toegepast op het specifieke probleem en uiteindelijk worden er enkele resultaten gegeven

5.3.1 Local search

‘Local search’ is een algemene klasse van heuristieken voor het oplossen van discrete optimalisatie problemen. Deze problemen worden gedefinieerd met behulp van:

- S Eindige set van toegestane oplossingen
- $c(s) \rightarrow R$ Doelfunctie op S

- $N(s) \subset S$ Omgeving van een oplossing, bestaande uit de burens van $s \in S$. Buren zijn oplossingen die op de een of andere manier sterk gelijken op de gevonden oplossing s .

Het probleem is het zoeken naar een oplossing $s^* \in S$ met $c(s^*) = \min_{s \in S} c(s)$

De basis methode voor een 'local search' aanpak is als volgt:

Kies een initiële oplossing

HERHAAL

Kies een oplossing $s' \in N(s)$ en neem deze aan als nieuwe oplossing

TOTDAT stop criterium

In elke stap wordt dus uit een verzameling oplossingen die niet veel verschillen van de huidige oplossing, een nieuwe oplossing gekozen.

Om 'local search' te gebruiken voor het vinden van een toewijzing van de WRC systemen over de treinstellen moeten de verschillende onderdelen die voor een 'local search' aanpak nodig zijn nog ingevuld worden. In volgorde worden de volgende elementen gedefinieerd: de keus voor een initiële oplossing, de definitie van een omgeving van een oplossing, de doelfunctie en de manier hoe uit de omgeving van een oplossing een nieuwe oplossing gekozen wordt. Uiteindelijk moet ook bepaald worden wanneer het algoritme is afgelopen.

5.3.2 Oplossingsruimte

Een oplossing bestaat voor elke subgroep uit het aantal treinstellen in deze subgroep dat is uitgerust met WRC. Een oplossing ziet er dan als volgt uit:

$$s = \begin{Bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{|T|} \end{Bmatrix}$$

de voorwaarde

Een oplossing mag niet resulteren in een toewijzing die de maximale fractie passages op ongeconditioneerd spoor overschrijdt, daarom moet een toewijzing voldoen aan (1) uit 4.4. Elk element uit de oplossingsruimte moet aan deze voorwaarde voldoen.

5.3.3 Initiële oplossing

De initiële oplossing moet een oplossing uit S zijn. Om er zeker van te zijn dat de initiële oplossing voldoet aan voorwaarde (1), is er gekozen om in de initiële oplossing alle beschikbare treinstellen uit te rusten met WRC. Als deze oplossing geen onderdeel is van S , dan bestaat er geen enkele toewijzing die deel is van S . Er zijn intelligentere beginoplossingen te bedenken, maar hier wordt op teruggekomen in paragraaf 5.4.2. In formule vorm ziet de beginoplossing er als volgt uit:

$$s_0 = \begin{Bmatrix} n_0 \\ n_1 \\ \vdots \\ n_{|T|} \end{Bmatrix}$$

5.3.4 De omgeving

De buren s' van een oplossing s worden gedefinieerd met behulp van de volgende constructie, waarbij t een index is uit T , en v een geheel getal:

$$s'_{t^+,v}(s) = \begin{cases} u'_i = u_i + v & \text{als } i = t^+ \\ u'_i = u_i & \text{overig} \end{cases}$$
$$s'_{t^-,v}(s) = \begin{cases} u'_i = u_i - v & \text{als } i = t^- \\ u'_i = u_i & \text{overig} \end{cases}$$

Hiermee is een buur gedefinieerd door een index t , een geheel getal v en een $+$ of een $-$. Echter bevat deze constructie van de omgeving ook enkele buren die niet aan de definitie van een toewijzing voldoen. Dit gebeurt in drie gevallen:

- Een oplossing heeft meer dan het aantal beschikbare treinstellen in een subgroep, dat wil zeggen er is niet aan de voorwaarde dat $u_t \leq n_t$ voldaan. Alle buren die niet aan deze voorwaarde voldoen worden niet meegenomen.
- Een oplossing heeft negatief aantal treinstellen in een subgroep, dat wil zeggen er is niet aan de voorwaarde $u'_t \geq 0$ voldaan. Er is voor gekozen om in dit $u'_t = 0$ te zetten. Wanneer $u_t = 0$ en $u'_t < 0$ dan wordt deze buur niet meegenomen, omdat in dit geval de buur s' na afkappen namelijk gelijk is aan s .
- Een oplossing resulteert in meer treinstellen die over ongeconditioneerd spoor rijden dan de toegestane fractie, dat wil zeggen er is niet voldaan aan voorwaarde (1). Alle buren die niet aan deze voorwaarde voldoen worden niet meegenomen.

Alle kandidaatburen die wel meegenomen worden, vormen de omgeving $N_v(s) \subset S$ voor s in S . Merk op dat deze omgeving afhankelijk is van de in te stellen stapgrootte v .

5.3.5 De doelfunctie

Als doelfunctie is de doelfunctie van het model genomen. Het minimaliseren van het totaal aantal met WRC systemen uitgeruste treinstellen.

5.3.6 Kiezen van een nieuwe oplossing

Voor het kiezen van een oplossing vanuit de omgeving wordt gebruik gemaakt van een speciale local search methode, de zogenaamde 'simulated annealing' (SA) methode [17]. Deze methode kiest in iteratie i uit de omgeving $N_v(s_i)$ een willekeurige buur s . Wanneer deze buur s een verbetering in de doelfunctie oplevert ($c(s) < c(s_i)$), dan wordt deze buur als de nieuwe oplossing gekozen. Wanneer de gekozen buur geen verbetering in de doelfunctie oplevert, $c(s) > c(s_i)$ zijn er twee mogelijkheden waartussen gekozen wordt volgens een bepaalde kans.

- Met kans $\rho(i)$ wordt s aangenomen als de nieuwe oplossing;
- Met kans $1 - \rho(i)$ wordt deze oplossing uit $N_v(s_i)$ verwijderd en wordt er weer een nieuwe buur gekozen.

De kans $\rho(i)$ waarmee slechtere oplossingen worden aangenomen wordt telkens na L_ρ iteraties verkleind met een vaste factor α_ρ . Dit proces wordt afkoelen genoemd. Dit levert voor de kans dat een buur met een slechtere doelfunctie wordt aangenomen in iteratie $i * L_\rho$ gelijk is aan

$\rho(iL_p) = \alpha_p^i * \rho_0$. In 'simulated annealing' is de kans dat een slechtere oplossing aangenomen wordt ook nog afhankelijk van het verschil in de doelfunctiewaarde. Er is voor gekozen om het grootste gedeelte van het algoritme te berekenen met een vaste waarde v . Met deze keus is een slechtere oplossing altijd in dezelfde mate v slechter. Hierdoor heeft deze afhankelijkheid in het grootste gedeelte van het algoritme geen invloed en is dit dus ook niet meegenomen.

Doordat op deze manier slechtere oplossingen kunnen worden aangenomen blijft het algoritme niet steken in lokale minima, maar is het algoritme in staat om lokale minima te verlaten en verder te zoeken naar betere oplossingen.

5.3.7 Stoppen algoritme

Na verloop van tijd wordt het algoritme gestopt. Er is gekozen om het algoritme te stoppen wanneer geen buur aangenomen wordt in een aantal achtereenvolgende iteraties. Daarnaast wordt het algoritme in de simulaties ook regelmatig handmatig gestopt omdat er lange tijd geen verbeteringen gevonden zijn ten opzichte van de best gevonden oplossing of dat een vastgelegde tijd of aantal iteraties is overschreden.

5.4 Optimalisatie local search

In het voorgaande hoofdstuk is de basis opzet van een 'local search' methode voor het vinden van de met WRC uit te rusten treinstellen beschreven. Dit model kan nog veel verbeterd worden door naar deze specifieke toepassing te kijken. In het komende hoofdstuk worden een aantal manieren beschreven waarmee onder andere het aantal calculaties van de voorwaarde beperkt kunnen worden. Bij deze aanpassingen moet steeds opgelet worden dat deze aanpassingen niet ten koste gaan van de kwaliteit van de oplossing gaat.

5.4.1 Verminder uitrekenen rekenintensieve voorwaarden

Op de snelheid van het algoritme valt veel winst te halen door niet elke keer de voorwaarde (1) te controleren, het controleren van de voorwaarde is namelijk een rekenintensief proces. Voor het berekenen van deze voorwaarde wordt namelijk de gehele dienstregeling voor alle trajecten doorgelopen. Met name het ophalen en doorlopen van deze dienstregeling is rekenintensief. Daarnaast resulteert elke passage van een treinstel over een traject in een vector-matrix vermenigvuldiging. Dit doorrekenen kan efficiënter. Omdat een buur $s_{i^{\pm},v}$ in iteratie i van een oplossing s_i slechts in één subgroep verschilt van dezelfde buur in de omgeving van s_{i-1} , hoeft slechts voor die trajecten waar de subgroep die veranderd is in oplossing s_i ten opzichte van s_{i-1} invloed op heeft, opnieuw de voorwaarde berekend te worden. Dit principe wordt gemakkelijk duidelijk in een voorbeeld:

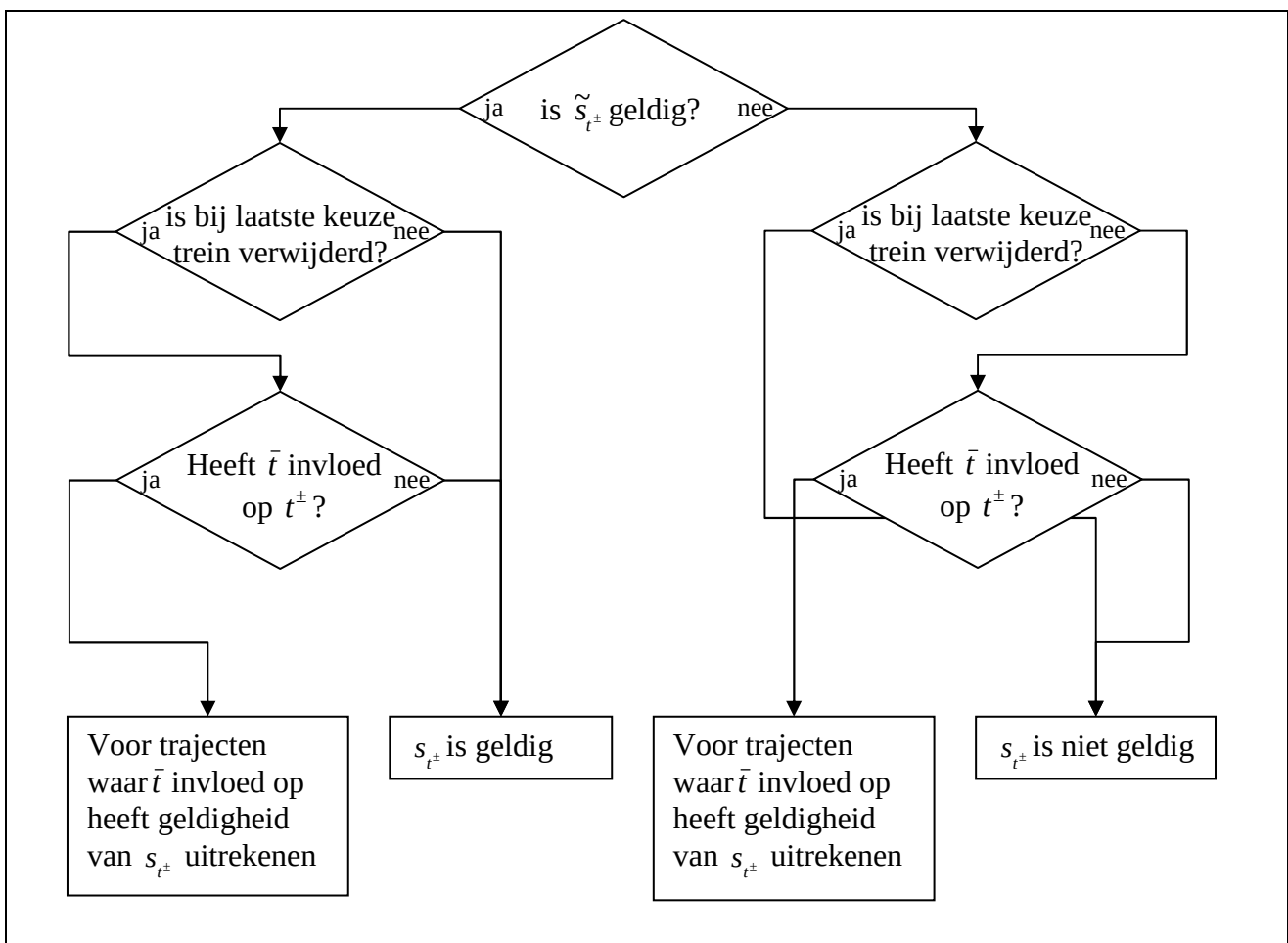
Het heeft geen zin om een traject bij Kampen, waar alleen dieseltreinen rijden, opnieuw te berekenen wanneer slechts het aantal elektrische dubbeldekkers is veranderd sinds de vorige keer dat Kampen is berekend. Een oplossing die geldig is voor Kampen zal geldig blijven met betrekking tot Kampen zolang er geen subgroepen veranderen die op het traject Kampen rijden.

Wanneer begonnen wordt met een verzameling burens waarvan bekend is of deze burens toegestaan zijn en op welke trajecten deze burens toegestaan zijn, kan de volgende verzameling burens gecontroleerd worden op geldigheid zonder dat voor alle burens en alle trajecten

de voorwaarde (1) opnieuw berekend wordt. Als eerste hoeft de voorwaarde niet gecontroleerd te worden wanneer een oplossing al toegestaan is op een traject en er meer treinstellen worden uitgerust met WRC. Meer treinstellen uitrusten met WRC levert namelijk altijd een betere conditionering op. Daarnaast is het niet nodig om een traject opnieuw uit te rekenen als dit traject

voor een buur niet toegestaan was en er alleen minder treinstellen zijn uitgerust met WRC. De voorwaarde (1) voor een subgroep op een traject hoeft dus alleen opnieuw berekend te worden als de laatste verandering invloed heeft op dit traject en dit traject geldig was maar er op dit traject minder treinstellen met WRC zijn gaan rijden, of wanneer een traject niet geldig was, maar er nu meer treinstellen met WRC op dit traject zijn gaan rijden.

Het bepalen van wat eventueel opnieuw uitgerekend moet worden is uitgewerkt in een beslisdiagram. Hiervoor worden een aantal notaties geïntroduceerd. De burens uit de omgeving van de vorige iteratie $N(s_{i-1})$ worden $\tilde{s}_{t^\pm}$ ingenoemd, de treingroep $t^\pm$ die veranderd is in de laatste overgang van de vorige oplossing s_{i-1} naar s_i , wordt $\bar{t}$ genoemd. Tevens is het nodig om te weten welke treingroepen met andere treingroepen op eenzelfde traject rijden, omdat in dit geval deze treingroepen invloed hebben op elkaar. Het beslisdiagram is te vinden in Figuur 11. Wanneer, zoals in hoofdstuk 5.4.2 beschreven wordt, de stapgrootte veranderd moet voor alle burens en voor alle trajecten de voorwaarde (1) opnieuw gecontroleerd worden.



Figuur 11: Beslisdiagram voor het opnieuw uitrekenen van de geldigheid van een subgroep op een traject

Resultaten

Het uitrekenen van de geldigheid van alle burens op alle trajecten op de vijf maanden aan beschikbare data, kost op een 2,7GHz Intel Processor ongeveer 200 seconden. Met de hierboven beschreven methode wordt de gemiddelde rekentijd per iteratie (al hangt dit ook af van andere parameters, zoals de kans dat slechtere oplossingen worden aangenomen) ongeveer 65 seconden.

5.4.2 Veranderen stapgrootte gedurende berekeningen

Wanneer begonnen wordt met een initiële oplossing waarbij alle treinstellen zijn uitgerust met WRC duurt het heel lang voordat er een oplossing bereikt is die zich op de rand van

de voorwaarde bevindt. Dat wil zeggen, dat wanneer er een treinstel minder wordt uitgerust met WRC, er niet meer voldaan wordt aan de voorwaarde (1). Om dit proces te versnellen kan het aantal treinstellen dat meer of minder wordt uitgerust binnen een stap, vergroot worden. Omdat met een grotere stapgrootte niet alle oplossingen bereikt kunnen worden, wordt in de loop van het proces de stapgrootte in stappen verkleind. Om geen afbreuk te doen aan de kwaliteit van de oplossing, moeten uiteindelijk alle mogelijke oplossingen bereikt kunnen worden. Hierdoor moet het proces eindigen met een stapgrootte van één.

De omgeving $N_v(s)$ zoals gedefinieerd in hoofdstuk 5.3.4 is afhankelijk van de parameter v . Deze parameter bepaalt het aantal treinstellen dat in een stap toegevoegd of verwijderd wordt. Om genoemde redenen is er gekozen om v met een grote waarde te laten beginnen en deze waarde telkens te laten afnemen tot een minimum van 1. Hiervoor is een beginwaarde v_0 , een getal L_v dat het aantal iteraties waarin de waarde van v constant blijft aangeeft en een verkleiningsfactor α_v gekozen. De waarde van v wordt nu in iteratie $i * L_v$ veranderd naar $v(iL_v) = \text{round}(\max(\alpha_v * v((i-1)L_v), 1))$. Omdat uiteindelijk de stapgrootte moet convergeren naar één moet voor willekeurige v_0 gelden dat $\alpha < 0.75$. Door de afronding in $v(iL_v)$ is er bij een $\alpha \geq 0.75$ het risico dat v blijft steken op twee. Wanneer $v > 1$ en er wordt in de huidige omgeving geen oplossing gevonden, dan wordt de stapgrootte direct verkleind.

5.4.3 Niet teruggaan naar eerder bezochte oplossingen

Wanneer tijdens het zoeken naar de beste oplossing een oplossing wordt aangenomen en in de volgende stap weer terug wordt gegaan naar de vorige oplossing, is er weinig diversificatie in de verschillende oplossingen. Bij voorkeur wordt er ook niet teruggekeerd naar een al bezochte oplossing in de eerstvolgende stappen, wanneer de toewijzing van de treinstellen nog nauwelijks is gewijzigd. Door ervoor te zorgen dat men niet terug kan komen in oplossingen die lijken op eerdere oplossingen, komt er een hogere diversiteit in de oplossingen. Hierdoor wordt sneller een groter gedeelte van de oplossingsruimte doorzocht. Door deze diversificatie wordt verwacht dat er sneller een goede oplossing gevonden wordt waardoor het aantal iteraties beperkt kan blijven. Door de laatste keuzen voor burens op te slaan, kunnen deze burens uitgesloten worden in het nieuwe keuzeprocess. Om het terugkomen naar eerder gekozen oplossingen, of naar oplossingen die veel op eerder gekozen oplossingen lijken, wordt een lijst van ‘verboden’ oplossingen bijgehouden, de zogenaamde tabulijst. Het aspect van het verbieden van oplossingen die lijken op oplossingen die kort geleden nog bezocht zijn komt van een speciale ‘local search’ methode, namelijk tabu search [17].

In elke iteratie wordt een element aan deze lijst toegevoegd. Wanneer een element een bepaald aantal iteraties in de tabulijst heeft gestaan wordt deze weer uit de lijst verwijderd, dit om te voorkomen dat er goede oplossingen niet bereikt kunnen worden of dat er geen oplossingen in de omgeving meer zijn toegestaan. Zoals in 5.3.4 is gedefinieerd bestaat de omgeving van een oplossing s uit twee verschillende soorten kandidaatburens, $s'_{t^+,v}(s)$ en $s'_{t^-,v}(s)$.

Wanneer gekozen wordt voor een s_{t^+} dan wordt in de lijst van niet toelaatbare oplossingen t^- toegevoegd en vice versa. Door het toevoegen van de tegenovergestelde richting kan er niet teruggekeerd worden naar een oplossing die weer hetzelfde aantal treinstellen van een bepaald type bevat. Door het aantal iteraties waarin deze oplossing niet gekozen mag worden te beperken

voorkomt dit dat er een lege omgeving ontstaat of dat optimale oplossingen verboden worden. Het kan voorkomen dat een bepaalde $t^\pm$ al voorkomt in de tabulijst, in dit geval wordt deze $t^\pm$ opnieuw toegevoegd. De totale lengte van unieke onderdelen in de tabulijst neemt hierdoor af.

5.4.4 Totale local search algoritme

In het begin van dit hoofdstuk is het algemene algoritme voor local search gegeven. Van dit algoritme is vervolgens de invulling voor het specifieke probleem nader uitgewerkt en zijn vervolgens een aantal verbeteringen voorgesteld. In het vervolg wordt een overzicht gegeven van hoe het algoritme er nu in zijn totaalheid uitziet:

$s_0 \leftarrow \{n_0, n_1, \dots, n_{ T }\}$	Kies een initiële oplossing
$v \leftarrow v_0, teller_v \leftarrow 0$	Initialisatie variabelen:
$\rho \leftarrow \rho_0, teller_\rho \leftarrow 0$	$teller_v, teller_\rho$: Aantal iteraties sinds vorige verandering van v of ρ .
$nnf \leftarrow 0$	nnf : aantal aansluitende iteraties zonder verbetering
$i \leftarrow 0$	
$tabu \leftarrow \{\}$	
HERHAAL	
Bepaal $N_v(s_i)$	Geef de omgeving (zie 5.3.4 en 5.4.1)
HERHAAL	
Kies oplossing $s \in N_v(s_i)$	Kies willekeurige oplossing uit de omgeving
ALS $s \in tabu$, $s \leftarrow \{\}$	Wanneer oplossing tabu is niet meenemen
ANDERS ALS $c(s) > c(s_i)$	Met zekere kans een slechtere oplossing aannemen
met kans $1 - \rho$, $s \leftarrow \{\}$	
END	
TOTDAT $s \neq \{\}$ OF $N_v(s_i) = \{\}$	
$\uparrow teller_v, \uparrow teller_\rho$	Stapgrootte verminderen
ALS $s = \{\}$ OF $teller_v = L_v$	
$v \leftarrow Round(\max(v * \alpha_v, 1)), teller_v \leftarrow 0$	
ALS $teller_\rho = L_\rho$	Afkoelen
$\rho \leftarrow \rho * \alpha_\rho, teller_\rho \leftarrow 0$	
Verwijder oudste element van $tabu$	Tabulijst bijwerken en nieuwe oplossing aannemen
ALS $s \neq 0$	
$tabu = tabu \cap \bar{s}$	
$\uparrow i$	

$s_i \leftarrow s$

$nnf \leftarrow 0$

ANDERS

$\uparrow nnf$

TOTDAT $nnf = \text{maxTriesNotFound}$

Doorgaan totdat een aantal iteraties geen oplossing is gevonden

5.4.5 Discussie wijzigingen

In de afgelopen hoofdstukken is de local-search methode met Simulated Annealing gebruikt, daarnaast is er gebruik gemaakt van een tabu-lijst en een veranderende stapgrootte. Deze wijzigingen hebben allemaal als doel om het aantal iteraties te verminderen. In deze paragraaf wordt ingegaan op de effecten van deze veranderingen. Daarnaast wordt er ingegaan op de verschillende parameters van de methoden.

Simulated annealing

Vanuit de theorie bestaan er bewijzen dat onder bepaalde voorwaarden de kans dat een globaal minimum bereikt wordt in de limiet gelijk is aan één. Een van de voorwaarden is om logaritmische af te koelen met een voldoende kleine afname [9]. Dit resulteert echter in veel iteraties. In de praktijk blijkt een exponentiële afname ook goed te werken, mits de kans voldoende langzaam kleiner wordt. Als factor waarmee de kans vermenigvuldigd wordt is gekozen voor een factor in de buurt van de 0,90. Hiermee wordt de kans dat een slechtere oplossing wordt aangenomen elke L_p iteraties verminderd met 10%.

Voor het aantal iteraties dat gedaan wordt met dezelfde kans is het logisch om een veelvoud van de grootte van de omgeving te nemen, om zo een redelijke kans te geven dat elke richting een keer ‘onderzocht’ is. Een nadeel van een langzame afkoeling is dat hierdoor het aantal berekeningen toeneemt. Hiertussen is geprobeerd een afweging te maken.

De beginkans om slechtere oplossingen aan te nemen wordt over het algemeen groot genomen (bv. 0,90), maar uit de praktijk zijn ook veel lagere beginwaarden gebruikt met hetzelfde resultaat (bv. 0,40) [14]. Omdat begonnen wordt met een oplossing die waarschijnlijkheid ver boven het minimum ligt en het evalueren van de voorwaarden kostbaar is, is er voor gekozen om over het algemeen met een lage kans te beginnen.

Tabu lijst

Het bijhouden van een tabulijst is een aspect waarop tabu search, een speciale versie van local search, op gestoeld is. Van tabu search zijn veel praktische resultaten bekend waaruit blijkt dat dit een methode is waarmee goede resultaten behaald kunnen worden. Theoretisch zijn er weinig onderzoeken naar de werking van tabu search gedaan en is er weinig bekend over de voorwaarden waaronder tabu search naar een (globaal) optimum convergeert [17]. Om ervoor te zorgen dat de methode altijd in een (lokaal) optimum eindigt moeten er in de uiteindelijke oplossing geen burens in de omgeving van de oplossing zijn met een lagere waarde. Dit is het geval als het stopcriterium goed gekozen wordt. Het algoritme stopt wanneer er voor een aantal achtereenvolgende iteraties geen oplossing gevonden wordt. Wanneer dit aantal minstens de lengte heeft van de tabulijst is de tabulijst leeg op het moment dat het algoritme stopt en is er dus sprake van een (lokaal) optimum.

Als er een tabulijst bijgehouden wordt is het niet nodig om voor alle burens in de omgeving de voorwaarde uit te rekenen. Bij een korte tabulijst kan het niet uitrekenen van de voorwaarde voor de burens niet uit. Dit doordat het ophalen en doorlopen van de dienstregeling de meest tijdrovende

bezigheid is en het binnen het doorlopen van de dienstregeling uitrekenen van de voorwaarde relatief weinig tijd kost. Dit laatste kan parallel gebeuren voor alle burens. Wanneer de tabulijst echter lang wordt is de kans groot dat een traject voor een buur meerdere malen opnieuw berekend wordt zonder dat deze buur ooit gekozen kan worden. Bij een lange tabulijst kan hier mogelijk nog tijdswinst geboekt worden.

Veranderen stapgrootte

Van simulated annealing zijn voorbeelden in de literatuur te vinden waar deze begint met een willekeurige oplossing en ook met een oplossing die vanuit een slim algoritme al dicht in de buurt van een minimum ligt. De performance van beide manieren verschilt per toepassing en er zijn geen algemeen geldende regels over wanneer het algoritme goed werkt. Het veranderen van de stapgrootte kan ook gezien worden als het starten van een nieuw algoritme met als beginoplossing de eindoplossing van het vorige algoritme. In dit geval zijn de uitvoeringen van een algoritme met een stapgrootte groter dan één, slechts half afgemaakte local search algoritmen die een betere beginoplossing geven voor het volgende algoritme. Het veranderen van de stapgrootte heeft dus geen invloed op de kwaliteit van de eindoplossing.

Doordat de omgeving bij een grotere stapgrootte verder verwijderd is van de actuele oplossing kan snel een verbetering gevonden worden in de doelfunctie. Daarnaast worden door de definitie van de omgeving in 5.3.4, waar wanneer het aantal treinstellen in een oplossing onder nul komt, deze treingroep wordt afgekapt en dus kleine treingroepen als eerste uitgeschakeld. Omdat deze treinstellen vaak weinig invloed hebben op de totale toestand van de conditionering wordt verwacht dat een optimale oplossing weinig kleine treingroepen bevat.

Voor de analyses in het volgende hoofdstuk is ervoor gekozen om te beginnen met een grote stapgrootte (bijv. 25) en een vrij snelle afname (bijvoorbeeld 25% bij elke 40 iteraties). Wanneer er in een iteratie geen oplossing gevonden wordt doordat er geen oplossingen in de huidige omgeving door het algoritme aangenomen is als nieuwe oplossing, wordt de stapgrootte direct verkleind.

Het verkleinen van de stapgrootte heeft ook gevolgen voor het uitrekenen van de geldigheid van de omgeving. Omdat de structuur van de omgeving verandert, moet van alle treintypen op alle trajecten de voorwaarde (1) opnieuw gecontroleerd worden.

6 Resultaten

In het afgelopen hoofdstuk is er een methode uitgewerkt waarmee onder gegeven voorwaarden een minimale toedeling van WRC systemen over treinstellen gevonden kan worden. In dit hoofdstuk wordt verder ingegaan op de resultaten die met behulp van deze methode gehaald kunnen worden. Als eerste worden de resultaten van het opsplitsen van de treinstellen in subgroepen met regionale binding besproken, deze subgroepen dienen als input voor de methodie die bepaald welke treinstellen uitgerust moeten worden met een WRC systeem. Verder worden voor een deel van de inputparameters de gekozen waarde gegeven en wordt de betreffende keuze onderbouwd. Voor de overige inputparameters worden een aantal waardes gegeven waarvoor het model wordt doorerekend, waarna de uitkomsten met elkaar vergeleken worden. Een overzicht van alle geschreven en gebruikte tools is te vinden in de Bijlage H: Gebruikte programma's.

6.1 Resultaten opsplitsen in subgroepen

Voor het doorrekenen van de aanpak van "na x treinstellen moet worden geconditioneerd" moet een opsplitsing van de treinstellen in subgroepen gegeven zijn. Het opsplitsen van de treinstellen in verschillende subgroepen per treintype is beschreven in paragraaf 3.3 en hangt van verschillende parameters af. Als input voor het model is gebruik gemaakt van een opsplitsing van de treintypen in subgroepen op trajecten die door dit treintype op minstens 28% van het totaal aantal dagen gebruik wordt. Deze parameter is zo gekozen dat diensten die alleen in het weekend rijden nog net wel worden meegenomen met de bepaling, maar diensten die op minder dagen rijden niet, dit om verstoringen in de dienstregeling in deze periode niet mee te laten tellen in de bepaling van de subgroepen.

De isolatiefactor is experimenteel bepaald. Hierbij zijn verschillende isolatiefactoren uitgeprobeerd en de resultaten van deze experimenten zijn vergeleken met onder andere de inzet van de DM'90 treinstellen die een specifieke opdruk hebben en waarvan dus verwacht wordt dat ze na verstoring of onderhoud snel terugkeren naar het traject waarvan de opdruk is gemaakt. Daarnaast is gelet op de huidige inzet van de SGM 3 op de pilot Zutphen-Nijmegen. Het blijkt in de pilot dat, ook al wordt er gestuurd op inzet op dit specifieke traject, deze treinstellen op alle trajecten komen waar SGM rijdt. Dit zou dus ook uit de subgroepen bepaling moeten komen. Uiteindelijk is gekozen voor een isolatiefactor van 0.04.

Voor de bepaling van het aantal treinstellen per subgroep is voor de optie gekozen waarbij: het modaal aantal treinstellen wat in de 72% van de dagen waarop het grootste aantal treinstellen van een type rijdt, waarna de overgebleven treinstellen worden toebedeeld aan de grootste subgroep (de groep met de meeste treinstellen).

Ter illustratie is een gedeelte van het resultaat van de uitgevoerde analyses weergegeven in Tabel 10. Hier is per subgroep het aantal treinstellen en het treintype gegeven. Tevens is per subgroep een overzicht gegeven van alle doorlooppunten waarop deze subgroep rijdt. Een volledig overzicht is te vinden in Bijlage G: Resultaten, in Tabel 18.

6.2 Overige inputparameters

Naast het opsplitsen van de treintypen in subgroepen zijn er nog meer inputparameters die vastgelegd moeten worden. Als eerste de parameter f , de fractie van het aantal passages dat over ongeconditioneerd spoor mag plaatsvinden per traject. Deze parameter zal in de verschillende analyses gevarieerd worden. Daarnaast is er de parameter x , het aantal treinstellen waarvoor een treinstel kan conditioneren. Hiervoor zijn uit de pilots verschillende aanwijzingen gekomen. Vanuit de pilot die gedaan is op de Valleilijn (Ede-Wageningen – Amersfoort) zijn er aanwijzingen dat één op de vijf treinstellen moet conditioneren. Vanuit de pilot Zutphen-Nijmegen blijkt op gedeelten

van dit traject één op de zes en op andere gedeelten slechts één op de acht treinstellen te moeten conditioneren. De analyses zullen met al deze verschillende parameters worden uitgevoerd.

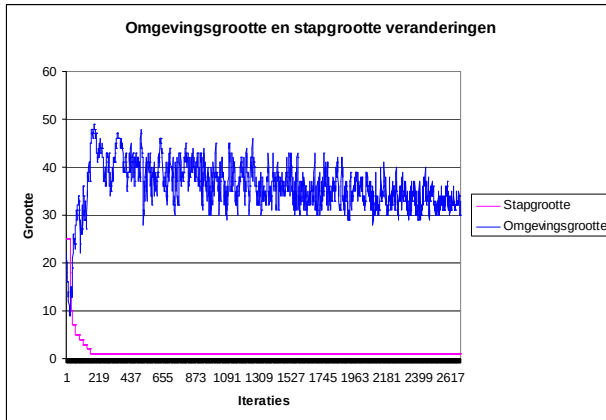
Voor de lengte van de tabulijst is gekozen voor zeventien. Deze lengte is bepaald door de helft van de gemiddelde grootte van de omgeving te nemen. Bij een stapgrootte van $v = 1$ is de gemiddelde grootte van de omgeving gelijk aan vijfendertig en de minimum omgevingsgrootte is ongeveer zevenentwintig. Een grafische weergave van de omgevingsgrootte voor een specifieke run is te vinden in Figuur 12. Door de keus van zeventien als lengte van de tabulijst blijven er altijd nog voldoende richtingen over die niet tabu zijn.

Subgroep	Naam van treinstel	Aantal treinstellen in subgroep	Doorlooppunten
11#1	DM90 2	23	Bn, Esd
11#2	DM90 2	4	Hno
11#3	DM90 2	4	Kbk
11#4	DM90 2	2	Kpn
12#1	E-LOC 1700	40	Ac, Asa, Asdm, Bdpb, Bk, Bn, Bnk, Bnva, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Est, Etn, Gv, Gz, Hln, Hmbh, Hrt, Hvsn, Hze, Klp, Laa, Mas, Nvp, Ost, Ot, Rai, Rsn, Rsw, Twl, Vg, Vst, Wc, Wf, Zbm, Zpta
13#1	E-LOC 1800	9	Almp, Asdl, Asdm, Dmn, Dmnz, Lls, Rai
13#2	E-LOC 1800	3	Bdpb, Brd, Ddzd, Gv, Hlms, Laa, Rsw, Vh, Vst
13#3	E-LOC 1800	3	Bkg, Hmta, Pmr
39#1	VIRM 4	98	Ac, Amrn, Ana, Asa, Asdl, Asdm, Bdg, Bdpb, Bk, Bkg, Bl, Bll, Bnk, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Est, Etn, Gdg, Gv, Gz, Hlms, Hln, Hlo, Hmbh, Hmta, Hor, Hrt, Hvsn, Hze, Kbw, Klp, Laa, Mas, Mp, Nvp, Obd, Ost, Ot, Ovn, Pmr, Rai, Rb, Rsw, Rtn, Sbk, Sdn, Uto, Vg, Vh, Vst, Vtn, Wc, Wf, Wz, Zbm, Zpta, Ztmo, Zvb
8#1	DDM1 ABV	8	Almp, Asdl, Asdm, Dmn, Dmnz, Lls, Rai
8#2	DDM1 ABV	6	Bdpb, Brd, Ddzd, Gv, Hlms, Laa, Rsw, Vh, Vst
8#3	DDM1 ABV	6	Bkg, Hmta, Pmr

Tabel 10: Resultaten opsplitsing subgroepen en verdeling treinstellen

Als start stapgrootte is gekozen voor $v = 25$ met iedere $L_v = 25$ iteraties een verkleining door middel van een vermenigvuldigingsfactor van $\alpha_v = 0,74$. Er is gekozen voor deze waarden omdat op deze manier vanuit de initiële oplossing snel een afname in de doelfunctie behaald wordt, maar er over het algemeen nog geen lege omgeving is ontstaan voordat de stapgrootte verkleind wordt. Wanneer deze omgeving wel leeg zou zijn, zou dit duiden op een te langzame verkleining van de stapgrootte.

Voor het afkoelingsproces is gekozen voor een startkans om slechtere oplossingen aan te nemen van $\rho = 0,5$. Deze kans wordt na $L_\rho = 25$ iteraties verkleind met een factor $\alpha_\rho = 0,90$. Het algoritme stopt automatisch wanneer er voor zeventien achtereenvolgende iteraties geen oplossing gekozen is uit de omgeving. Dit aantal is hetzelfde als de lengte van de tabulijst en is zo gekozen omdat dan op het moment van stoppen de tabulijst leeg is en zal het algoritme dus eindigen in een (lokaal) minimum.



Figuur 12: De omgevingsgrootte en stapgrootte in alle iteraties bij $x=5$, geen tabulijst

Over het algemeen wordt het algoritme handmatig afgebroken voordat dit criteria gehaald is. Na het afbreken wordt het algoritme herstart waarbij de best gevonden oplossing als beginoplossing gebruikt wordt en geen slechtere oplossingen meer aangenomen worden (te bereiken door ρ_0 gelijk aan nul te stellen). Op deze manier wordt vanuit de best gevonden oplossing een (lokaal) minimum gevonden. Deze methode levert soms nog een verbetering op in de doelwaarde.

Verder zijn er nog wijzigingen aangebracht in de treintypen zelf. Na een overleg met NSR is besloten dat sommige treintypen samen 1 treinstel vormen. Het gaat hier om de DDM 1 ABV, DDM1 BV en de DDM1 BVK die samen 1 treinstel vormen, tevens vormen de ICR BAB, de ICR BBB en de ICR BDS samen een treinstel. Treinstellen die niet mogen worden uitgerust zijn de E-LOC 1700, E-LOC 1800, ICR BAB, ICR BBB, DDM1 ABV en DDM1 BV. Om dit mogelijk te maken bij gebruik van de gekozen methode, is voor elke subgroep een minimaal en een maximaal aantal treinstellen dat uitgerust mag worden met WRC aangemaakt. Het algoritme houdt rekening met deze waarden bij het bepalen van de omgeving. Daarnaast zijn alle passages van DDM1 ABV, DDM1 BV, ICR BAB en ICR BBB uit de data gehaald.

Als laatste zijn er ook een aantal scenario's doorgerekend waarbij de fractie van de passages over ongeconditioneerd spoor wordt berekend. Hierbij zijn de treinstellen die uitgerust worden met WRC van te voren bepaald en wordt er ook geen optimalisatie gedaan op deze treintypen. Deze berekeningen hebben als doel om intuïtieve of gewenste verdelingen van WRC systemen over de treinstellen te vergelijken met berekende resultaten.

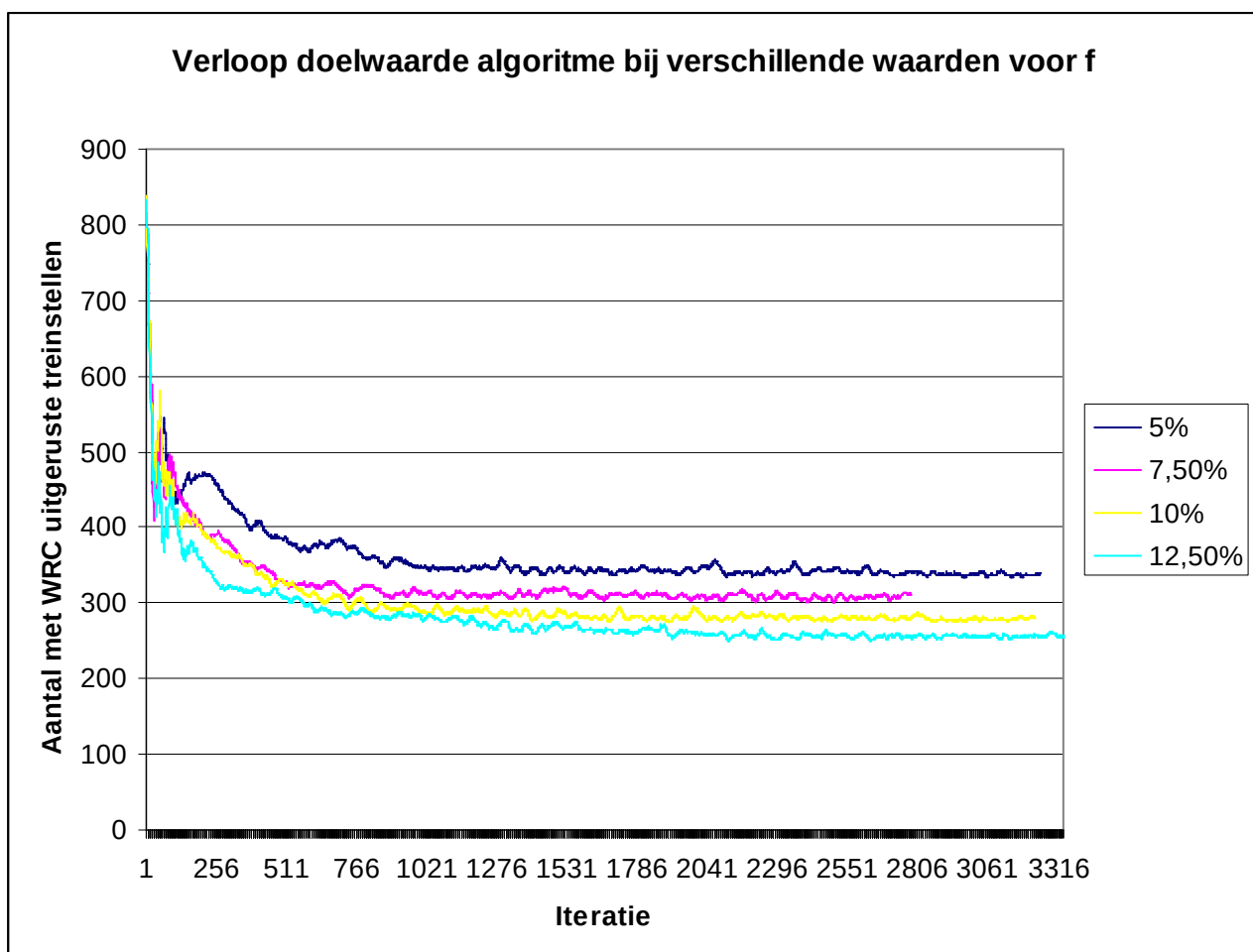
6.3 Resultaten na x treinstellen moet worden geconditioneerd

Met de in de vorige paragraaf vastgelegde input parameters kan nu het algoritme worden toegepast op verschillende waarden voor de laatste parameters: x en f . Hiervoor wordt voor door NSR verboden treintypen het maximaal aantal met WRC uit te rusten treinstellen op 0 gezet. Daarnaast worden de passages van treintypen die onderdeel uitmaken van een groter treinstel uit de data verwijderd. Hierbij blijft alleen de passage van het treintype in dit treinstel dat wel uitgerust mag worden met WRC, in de data staan. Hierdoor tellen treinstellen van deze typen niet mee bij het aantal treinstellen dat is gepasseerd sinds het laatst gepasseerde conditionerende treinstel. De

resultaten van deze analyses voor f uit $\{5\%, 7.5\%, 10\%, 12.5\%\}$ en x uit $\{5, 6, 8\}$ zijn te vinden in Tabel 11. Hier is de doelwaarde, het totaal aantal met WRC systemen uitgeruste treinstellen, weergegeven bij de verschillende waarden voor x en f . Een totaal overzicht van alle resultaten bij deze waarden is te vinden in Bijlage G: Resultaten in Tabel 19. In het overzicht in Tabel 19 is bij elk resultaat ook het aantal treinstellen per subgroep vermeld. Van het verloop van het algoritme bij de waarde $x = 6$ is een grafiek gemaakt waarin per iteratie de waarde van de gevonden oplossing weergegeven is. Dit is te vinden in Figuur 13. In dit figuur is duidelijk te zien dat de doelwaarde in het begin snel afneemt en vanaf iteratie 250, waar de stapgrootte één is geworden, langzaam afneemt, waarbij zowel slechtere als betere oplossingen aangenomen worden.

	$x = 5$	$x = 6$	$x = 8$
$f = 5\%$	380	333	267
$f = 7,5\%$	342	299	238
$f = 10\%$	315	272	215
$f = 12,5\%$	290	249	196

Tabel 11: Aantal met WRC systemen uit te rusten treinstellen bij verschillende waarden voor x en f (met samengevoegde treinen zonder verboden treinstellen)



Figuur 13: Verloop doelwaarde ($x=6$ en verschillende waarden voor f)

Naast deze algemene runs, is er ook nog onderzoek gedaan naar een specifieke vraagstelling. In paragraaf 2.3 is aangegeven dat er bij voorkeur door sprinters geconditioneerd moet worden.

Vanuit dit uitgangspunt heeft ProRail de wens om alleen sprinters uit te rusten en een beperkt aantal intercitys. Daarnaast is het eenvoudiger om in intercitys van het type VIRM conditionering in te bouwen dan in ander typen intercitys. Vanuit deze wens zijn er analyses gedaan op de gevolgen van deze toewijzing. Hiervoor zijn van de net genoemde treintypen alle treinstellen uitgerust met een WRC systeem. Vervolgens is met deze toewijzing van WRC systemen de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor berekend. De resultaten van deze toewijzing worden vervolgens vergeleken met de resultaten die uit het algoritme komen.

Treintypen die worden uitgerust	Een trein conditioneert voor x treinstellen	Aantal trajecten met aantal passages over ongeconditioneerd spoor meer dan 10%	Totaal aantal treinstellen	Aantal treinstellen met WRC als trajecten buiten beschouwing gelaten worden
DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGM2, SGM3, SLT4, SLT6, DDAR	5	41	441	372
SGM2, SGM3	5	77	87	-
SGM3	5	79	58	-
DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGM2, SGM3, SLT4, SLT6, DDAR, VIRM4, VIRM6	6	12	619	480
DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGM2, SGM3, SLT4, SLT6, DDAR, VIRM4, VIRM6	8	9	619	374
SGM2, SGM3, VIRM 4, VIRM 6	5	46	265	247
SGM2, SGM3, VIRM 4, VIRM 6	6	43	265	235
SGM2, SGM3, VIRM 4, VIRM 6	8	39	265	230
SGM2, SGM3, SLT 4, SLT 6, VIRM 4, VIRM 6	5	34	370	342

Tabel 12: Niet voldoende geconditioneerde trajecten bij verschillende toedelingen van WRC (voor verschillende waarden voor x , $f=10\%$)

Wanneer alle 441 sprinters worden uitgerust met WRC (alle treinstellen van het type DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGM3, SGM3, SLT4, SLT6, DDAR) blijkt dat, bij $x = 5$, van de 84 trajecten bij 41 trajecten meer dan 10% van de passages plaatsvindt over ongeconditioneerd spoor. Om inzicht te verschaffen in de dekkingsgraad bij andere toedelingen van de WRC systemen is er voor verschillende waarden een overzicht gemaakt in Tabel 12. Het complete overzicht is te vinden in Bijlage G: Resultaten. In deze resultaten is voor verschillende waardes van x het aantal trajecten gegeven waarbij er minder dan 10% van de passages over ongeconditioneerd spoor plaatsvindt. Tevens is het totaal van het aantal treinstellen gegeven. Dat de dekkingsgraad op een aantal trajecten niet gehaald wordt is te verwachten. Er zijn namelijk trajecten waar helemaal geen

sprinters rijden. Het aantal treinstellen dat wordt uitgerust in de verschillende oplossingen is relatief hoog. Wanneer alle trajecten waarop bij het uitrusten van alle sprintertreinstellen met WRC onvoldoende conditionering plaatsvindt buiten beschouwing gelaten worden, kan op de overige trajecten een minimale toerusting van sprintertreinstellen met WRC gevonden worden. Het aantal treinstellen dat onder de gegeven voorwaarden nodig is om op de overgebleven trajecten voldoende conditionering te behalen, is weergegeven in de laatste kolom van Tabel 21. Om dit aantal te berekenen zijn de parameters van het algoritme met betrekking tot de lengte van de tabulijst aangepast aan de omvang van de omgevingsgrootte.

6.4 Vergelijking tussen verschillende modellen

Voor het bepalen van het aantal treinstellen dat uitgerust moet worden met WRC om landelijke dekking van de conditionering te verkrijgen zijn in hoofdstuk 4 verschillende manieren van aanpakken voorgesteld. Uiteindelijk is uit deze manieren een aanpak gekozen die is uitgewerkt. De uitkomst van dit model kan vergeleken worden met de verschillende andere modellen. Op deze manier kan mogelijk nieuw inzicht verkregen worden in de structuur en kwaliteit van de oplossingen. Met deze vergelijking kan een afweging gemaakt worden of een toename in complexiteit ook een voldoende verbetering in het resultaat geeft. Voor deze analyses wordt de oplossing gebruikt waarbij $x = 5$, $f = 10\%$ en alle andere parameters zoals gebruikt in paragraaf 6.2. Hiervoor zijn de parameters voor “Aanpak 2 – gemiddeld 1 op de x treinstellen moet conditioneren” zo gekozen dat ze overeenkomen met de gekozen parameters voor de uitgewerkte derde aanpak. De keuze voor de parameters is genomen $x = 5$, $o_t = 1$ voor alle treintypegroepen t , $c_1 = 1000$ en $c_2 = 0$. Bij het toepassen van de gekozen oplossing uit aanpak 3 op aanpak 2 blijkt er 206 keer een traject op een dag niet een op de x treinstellen te conditioneren. Dit is op een totaal van 12285 verschillende dag-traject combinaties een percentage van 1,6%. Naast dat het resultaat van aanpak 3 toegepast is op aanpak 2, is ook een resultaat van aanpak 2 toegepast op aanpak 3. Hierbij wordt de oplossing van aanpak 2 gebruikt en wordt vervolgens per traject het percentage treinstellen dat over ongeconditioneerd spoor rijdt berekend. Een overzicht van deze percentages is te vinden in de blauwe lijn in Figuur 14. Hiervoor zijn de trajecten op oplopend percentage gesorteerd. Opvallend is dat er een aantal trajecten zijn met een hoog percentage over ongeconditioneerd spoor. Het traject met naar verhouding de meeste passages over ongeconditioneerd spoor is het traject Gouda-Leiden met als doorlooppunt Waddinxveen. Op dit traject rijden praktisch alleen SGM 2 treinstellen. Wanneer hier gemiddeld gezien één op de vijf treinstellen moet conditioneren zou dus één op de vijf SGM 2 treinstellen uitrusten met WRC volstaan. Voor aanpak 3 is dan de kans voor dit type gelijk aan $p_t = 0,20$. Het percentage passages over ongeconditioneerd spoor op een traject waar alleen dit treintype rijdt is dan in aanpak 3 echter gelijk aan 33%. Dit blijkt uit het vermenigvuldigen van de overgangsmatrices met $p_t = 0,20$, wanneer deze matrix vermenigvuldigd wordt totdat er een evenwicht is ontstaan, blijkt de fractie van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor 33% te zijn. De overgangsmatrix en de bijbehorende eigenvector $\bar{b}$ zijn namelijk als volgt:

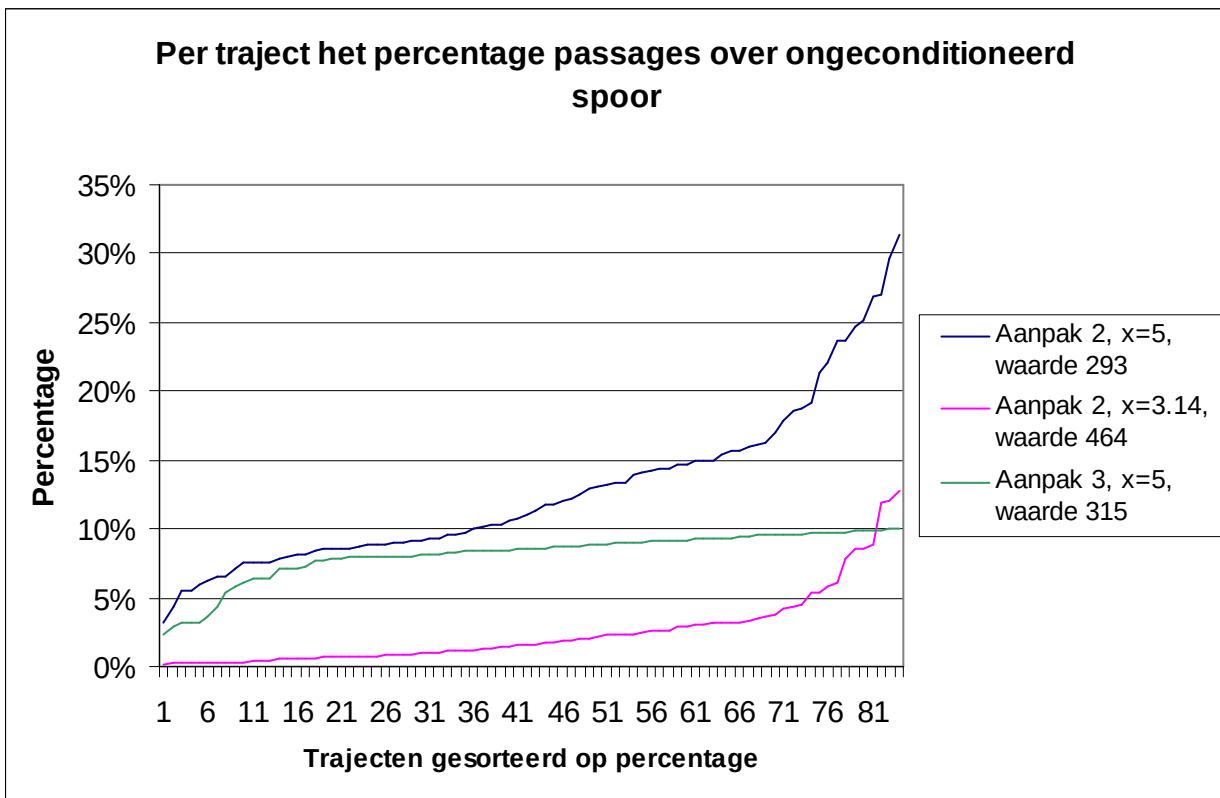
$$P = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 \end{pmatrix},$$

$$\bar{b}P = \bar{b} \rightarrow \bar{b} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.16 \\ 0.13 \\ 0.10 \\ 0.08 \\ 0.33 \end{pmatrix}$$

Om een uitkomst van aanpak 2 te kunnen vergelijken met een uitkomst van aanpak 3 zou het laatste element van $\bar{b}$ bij $f = 10\%$ maximaal 10% moeten zijn. In dat geval is een resultaat van aanpak 2 met betrekking tot de parameters vergelijkbaar met een resultaat van aanpak 3. Daarvoor zijn alle toestanden van de vector $\bar{b}$ berekend met behulp van $\Lambda_i = \left(1 - \frac{1}{\tilde{x}}\right)^i * \frac{1}{\tilde{x}}$, waarbij Λ_i de fractie van passages in toestand i is met i uit $\{0, 1, \dots, x-2, x-1\}$. Met dat deze fracties bekend zijn kan ook de laatste fractie berekend worden. Deze fractie is dan tevens gebonden aan de 10%:

$$\Lambda_x = 1 - \sum_{i=0}^{x-1} \Lambda_i \leq 0.10. \text{ Waarbij } x \text{ de } x \text{ is die gebruikt wordt in model 3. Met behulp van deze}$$

vergelijkingen wordt een zo groot mogelijke $\tilde{x}$ gekozen. Dit zodanig dat de fractie van het aantal treinen dat over ongeconditioneerd spoor rijdt beperkt blijft tot $f = 10\%$. Wanneer gekozen wordt voor een geheel tallige oplossing voor $\tilde{x}$ blijkt het antwoord te zijn $\tilde{x} = 3$. Wanneer ook niet geheel tallige oplossingen zijn toegestaan is de maximale waarde $\tilde{x} \approx 3,138$. Met deze waarde is model 2 ook doorgerekend. De resultaten met betrekking tot de doelwaarde en de fracties over ongeconditioneerd spoor zijn voor beide berekeningen te vinden in Figuur 14. Als referentie zijn ook de percentages van de oplossing gevonden door model 3 toegevoegd. In deze grafiek is duidelijk te zien dat bij een vergelijkbaar aantal met WRC uitgeruste treinstellen de verdeling van de treinstellen bij model 3 veel vlakker is dan bij model 2. Er is met het resultaat van model 3 een veel meer evenredige verdeling van de conditionering over de verschillende trajecten.



Figuur 14: Percentages passages over ongeconditioneerd spoor, oplossing model 2 toegepast om model 3. Met $c_1=1000$, $c_2=0$ en $\theta=1$. Tevens oplossing van model 3 met $x=5$ en $f=10\%$ als referentie gegeven.

7 Discussie

In dit verslag zijn een aantal stappen genomen om uiteindelijk een antwoord te kunnen geven op de vraag hoeveel en welke treinstellen van NSR moeten worden uitgerust met een WRC installatie om landelijk een geconditioneerd spoor te realiseren. Hiervoor is eerst een studie gedaan naar de werking van de conditionering en de treinstelplanning zoals deze gehanteerd wordt door NSR. Vanuit deze kennis en de verschillende pilots die zijn gedaan met de conditionering zijn er een aantal mogelijke modellen opgesteld om de hoofdvraag te beantwoorden. Uit deze modellen is in overleg met ProRail een model gekozen en dit model is verder uitgewerkt. In hoofdstuk 6 zijn vervolgens de resultaten van dit model gegeven. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de aannamen, het model en de resultaten. Dit om uiteindelijk de kaders te geven waarbinnen de resultaten geïnterpreteerd kunnen worden en om verbeter punten of gebieden voor verder onderzoek aan te geven.

De discussie verdeelt zich over een drietal onderwerpen. Eerst worden een paar algemene aspecten behandeld, dan de benodigde data en tenslotte de gekozen aanpak. Voor elk van deze onderwerpen wordt commentaar gegeven op de behaalde resultaten en worden mogelijkheden voor verder onderzoek aangeduid.

7.1 Algemeen

Houdbaarheid in de toekomst

De resultaten die nu verkregen zijn, zijn gebaseerd op een periode van 147 dagen uit de dienstregeling van 2011. Om de houdbaarheid van deze resultaten te testen zou dezelfde oplossing op de data van een nieuwere dienstregeling toegepast moeten worden. Ook zou vanuit deze nieuwe data een nieuwe toewijzing gevonden kunnen worden die vergeleken kan worden met de toewijzingen gevonden uit de dienstregeling van 2011.

Naast de mogelijkheden om de behaalde resultaten te vergelijken met nieuwe al gerealiseerde data, kan om de houdbaarheid van de resultaten te testen ook gekeken worden naar de plannings voor de toekomst. De huidige inzet is, in Bijlage F: toekomstige treininzet, vergeleken met de opzet van de treintype planning tot en met 2020. Uit deze vergelijking blijkt dat bepaalde treintypen verdwijnen en dat deze worden vervangen door andere treintypen. Ook komt er een nieuw type intercity. Om de huidige resultaten ook in de toekomst te laten gelden, zal er geen MAT 64, een treintype wat verdwijnt, uitgerust moeten worden met WRC. In plaats daarvan zouden de vervangende typen SLT en SGM uitgerust moeten worden met WRC in een verhouding die nu het geval is bij de MAT 64.

Verstoringen

Op het moment dat verstoringen optreden in het Nederlandse spoorweginet zijn enkele trajecten onderbroken en kunnen treinen hier niet meer over passeren. Hierdoor worden treintype subgroepen opeens opgesplitst in twee groepen die geen uitwisseling meer hebben met elkaar. Dit zou in het huidige model te simuleren zijn door een subgroep op te splitsen in twee verschillende subgroepen. Binnen deze subgroep kan de verhouding tussen wel en niet met WRC uitgeruste treinen sterk veranderen. Om de invloed van deze verstoringen goed in kaart te brengen zou op deze verdelingen een gevoeligheidsanalyse gedaan kunnen worden: Wat zijn de mogelijke verdelingen bij een plotselinge onderbreking, wat is de kans op deze verdelingen en hoe beïnvloedt deze verdeling de fractie van het aantal treinstellen dat over ongeconditioneerd spoor rijdt. Bij het overgaan op een winterdienstregeling vindt deze zelfde opsplitsing tegelijkertijd plaats op veel verschillende locaties. Daarnaast worden er minder ritten uitgevoerd. Een oplossing gevonden met reguliere data zou getest kunnen worden op een aantal dagen waarbij over geschakeld is op een winterdienstregeling. Op deze manier kan de robuustheid van de oplossing getest worden.

Uitval WRC systemen

Het model gaat ervan uit dat treinstellen die uitgerust zijn met WRC ook conditioneren. In de praktijk zal een WRC systeem uitval vertonen. Dit kan eenvoudig in het model ingepast worden door de kans dat een treinstel is uitgerust te vermenigvuldigen met een betrouwbaarheidsfactor (percentage van WRC systemen dat werkt), alvorens het te gebruiken voor de opbouw van overgangsmatrix P . Eventueel kan een benadering van dit antwoord ook gevonden worden door deze vermenigvuldiging achteraf te doen. Dit door het antwoord wat uit het oorspronkelijke algoritme komt te delen door de betrouwbaarheidsfactor en dan het antwoord af te ronden. Een andere manier om dit effect te benaderen is om het totaal aantal beschikbare treinstellen van een type n_i te delen door de betrouwbaarheidsfactor en dit getal te gebruiken bij de berekening van p_i . Door de geheeltalligheid van n_i levert dit in het huidige model een afrondingsfout op. Hierbij moet het model voor de bepaling van het maximaal aantal uit te rusten treinstellen wel uit blijven gaan van de oorspronkelijke n_i .

Resultaten op kleinere schaal

Het doel van het project is om geluidsproductie te verminderen zodanig dat er op de huidige conventionele geluidsreductie methoden bespaard kan worden. Een van deze methoden is het gebruik van een spuitunit die langs het spoor staat. Deze methode komt vooral voor bij emplacementen, dit zijn stukken spoor met wissels en dus ook bochten. Dit zijn gebieden waar treinen veel geluid produceren dat met conditioneren verholpen kan worden. Tevens zijn dit de stukken spoor die zich bevinden in stedelijke gebieden. Het is dus van belang dat juist op deze gebieden de treinstellen minder geluid produceren. In dit onderzoek is niet gekeken naar de treinbewegingen op emplacementen. Om een goed beeld te krijgen van de conditionering op een emplacement zou gekeken moeten worden naar hoe de treinstellen op een emplacement bewegen, waar welke treinstellen halteren en waar welke treinstellen worden aan- of afgerangeerd. Met deze analyse kan een gevonden toewijzing vergeleken worden met het huidige model waaruit conclusies getrokken kunnen worden voor de conditionering op de verschillende emplacementen.

7.2 Data

Gepland versus gerealiseerd

De data die gebruikt is, is gedeeltelijk gerealiseerde data. In de data zijn alleen passages opgenomen die daadwerkelijk plaatsgevonden hebben. Wel wordt er binnen dit onderzoek gebruik gemaakt van geplande treintypen. Op deze manier is de data een mix tussen geplande en gerealiseerde data. Om een beter beeld te krijgen van de verspreiding van de conditionering zou een toewijzing gemaakt kunnen worden met helemaal geplande data, en zou dit vervolgens getest kunnen worden met helemaal gerealiseerde data.

Richtingafhankelijkheid

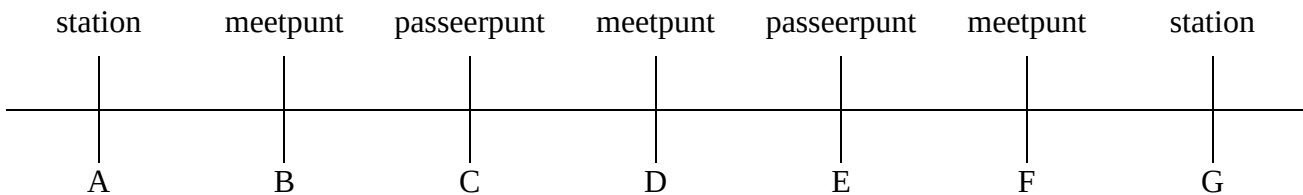
Voor alle trajecten is ergens tussen het beginpunt en het eindpunt van het traject een doorlooppunt gekozen. Vervolgens wordt er met de data van dit doorlooppunt gewerkt. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de richting waarin een trein passeert en het spoor waarop deze trein passeert. Dit geeft, wanneer rekening gehouden wordt met de volgorde waarin treinstellen een punt passeren, een vertekend beeld.

Voordat de verschillende situaties die zich voordoen behandeld worden, wordt eerst een voorbeeld situatie geschetst waarbij de verschillende richtingen en sporen behandeld worden. Een traject is schematisch weergegeven in Figuur 15. Op dit traject rijden treinen van A naar G en vice versa. Hierbij wordt de dienstregeling gesteld als in Tabel 13. Hierbij passeren de treinen van rit 1 en 2

elkaar in passeerpunt E, rit 2 en 3 elkaar in passeerpunt C etc. De passages die zijn gemeten zijn weergegeven in Tabel 14.

Rit	Tijd	Route
1	:00	A naar G
2	:06	G naar A
3	:12	A naar G
4	:18	G naar A

Tabel 13: gebruikte dienstregeling



Figuur 15: Schematische weergave van traject met 3 meetpunten en 2 passeerpunten

Meetpunt B	Meetpunt D	Meetpunt E
1-3-2-4	1-2-3-4	2-4-1-3

Tabel 14: Gemeten ritten op de verschillende meetpunten

Er zijn hierbij een aantal verschillende situaties die zich voordoen:

- Enkel spoor. Bij enkel spoor is de conditionering op elk stuk baan verschillend. De beste toewijzing van WRC systemen over de treinstellen is hierbij sterk afhankelijk van het gekozen meetpunt of doorlooppunt. Bij enkel spoor is het in het gekozen model alleen mogelijk om rekening te houden met de richting, door tussen elk passeerpunt te meten, dat wil zeggen elk traject op te splitsen bij passeerpunten. De passages op elke gedeelte van het traject zijn te vinden in Tabel 14.
- Bij dubbel spoor wordt bij het passeren van de trein niet gelet op de richting. Afhankelijk van het gekozen meetpunt is de volgorde van de passages verschillend. In werkelijkheid is op een van beide sporen de passage 1-3 en op het andere spoor is de passage 2-4. Om deze situatie goed mee te nemen zou in de data bij elk doorlooppunt het spoornummer of de richting meegenomen moeten worden. Waarbij het doorlooppunt per richting een andere naam krijgt. Bijvoorbeeld in Enschede-Drienerlo wordt Esd gesplitst in Esd-1 en Esd-2. Door per spoor een verschillende doorlooppunt te kiezen neemt het algoritme deze doorlooppunten als aparte trajecten.
- Bij meer dan twee sporen doen zich op het Nederlands spoor een aantal situaties voor. Op enkele trajecten zijn er drie spoorbanen, deze situatie is niet verder onderzocht. Bij vier trajecten zijn er sporen waarbij het eigenlijk dubbel-dubbel spoor is. Dit is bijvoorbeeld het geval tussen Rotterdam en Dordrecht. Er zijn twee dubbelspoor lijnen die gedurende een tijd parallel lopen. Deze sporen kunnen afzonderlijk behandeld worden als dubbelspoor. Naast dat vier sporen samengesteld kunnen zijn uit dubbel-dubbel spoor is het ook mogelijk dat het spoor wordt opgedeeld in een intercity en een sprinter spoor. Ook in dit geval moeten alle sporen afzonderlijk als traject in de data meegenomen worden.

De inschatting is dat enkel en dubbel spoor slechts een minieme invloed zal hebben op de resultaten. De meeste treinstellen die heen over een spoor rijden zullen ook over dit spoor weer terugkeren. Mogelijk is wel dat de fractie van het aantal passages over droog spoor zal veranderen

wanneer wel rekening wordt gehouden met de richting. Met het geschetste voorbeeld zal het aantal uit te rusten treinstellen afnemen. Bij het viersporige traject waarbij er sprake is van dubbel-dubbel spoor zal de impact meevallen. Dit omdat dit spoor een samenvoeging is van twee andere trajecten waarop de conditionering al apart berekend is. Mogelijk zouden deze viersporige trajecten dus ook als voortzetting van de tweesporige trajecten gezien kunnen worden en niet als apart traject in de data te hoeven worden opgenomen. Wanneer het gaat om gescheiden intercity en sprinter sporen, kan de impact wel groot zijn. Er wordt met deze situatie op geen enkele manier rekening gehouden. Dit is overigens wel een gegeven wat uit de huidige data gehaald zou kunnen worden.

Niet NSR treinen

Op het spoor rijden naast treinen van NSR ook treinen van andere vervoerders. Hierin vallen twee categorieën te onderscheiden. De ene categorie bevat de lokale personen vervoerders, de andere categorie bevat het goederenvervoer. De lokale personenvervoerders rijden allemaal in relatief nieuwe treinstellen. Deze treinstellen hebben vaak al voorzieningen aan boord om te conditioneren of kunnen eenvoudig worden omgebouwd om dit te doen. Goederentreinen hebben waarschijnlijk veel invloed op de hoeveelheid werkende conditionering en kunnen niet worden uitgerust met een conditioneringssysteem. Beide categorieën komen niet voor in de huidige data. Om een beter beeld te krijgen zouden deze treinstellen bij overlappend spoorgebruik ook meegenomen moeten worden. In de analyses kan er dan bijvoorbeeld vanuit gegaan worden dat een lokale personen vervoerder altijd conditioneert en dat een goederentrein niet conditioneert en misschien ook een grotere invloed heeft op de hoeveelheid werkende conditionering. Dit laatste kan door goederentreinen als meerdere treinstellen te tellen of zelfs door de conditionering geheel te laten verdwijnen bij de passage van een goederentrein door het aanpassen van de overgangsmatrix in paragraaf 4.4.1.

7.3 Model

Verschillende treintypen

Er wordt in de afname van de werking van de conditionering geen rekening gehouden met het passerende treintype. In overleg met NSR is wel besloten om sommige treintypen samen een treinstel te laten vormen (zie paragraaf 6.2). Toch is er met deze samenvoeging nog een groot verschil tussen de verschillende treintypen. Een treinstel van het type SLT-6 heeft bijvoorbeeld zes bakken. Dit terwijl een MAT64-2 maar twee bakken heeft. In het huidige model degradeert de conditionering bij een passage van een van beide typen evenveel. Een mogelijk ondervanging van dit probleem zou kunnen zijn om de toestand van het spoor niet uit te drukken in het aantal gepasseerde treinstellen, maar in het aantal gepasseerde bakken. Hiermee neemt het aantal toestanden wel enorm toe waardoor het algoritme langzamer wordt. Een tussenvorm waarbij niet elk treinstel evenveel invloed heeft op de conditionering, maar waarbij het aantal toestanden beperkter blijft is mogelijk een goede tussenoplossing.

Automatische herstart

Bij de huidige resultaten is het algoritme handmatig gestopt voordat het stopcriterium was bereikt. Dit zorgt ervoor dat het eind antwoord niet een (lokaal) minimum hoeft te zijn. Vervolgens wordt het algoritme opnieuw gestart met de best gevonden oplossing en wordt vanuit deze oplossing met een greedy algoritme, een algoritme dat elke betere oplossing aanneemt en geen slechtere, een (lokaal) minimum gezocht. Dit levert in een aantal gevallen een paar treinstellen verbetering op. Mogelijk kan het algoritme verbeterd worden door, wanneer er lange tijd geen verbetering is gevonden, het algoritme automatisch opnieuw te starten waarbij een eerder gevonden resultaat als uitgangspunt dient.

Spreiding in conditionering

Een van de uitgangspunten van het model is dat als er een treinstel vanuit een bepaalde subgroep over het spoor rijdt, dit een willekeurige trein uit deze groep is. Wanneer dus de helft van een treingroep is uitgerust is de kans dus vijftig procent dat een passerend treinstel uitgerust is met WRC. Er wordt vanuit gegaan dat deze kans onafhankelijk is van eerdere passages. De aanname dat het een willekeurig treinstel is op lange termijn een realistische aanname. De kansen zijn alleen niet helemaal onafhankelijk. Wanneer een treinstel over een traject rijdt is de kans groot dat hetzelfde treinstel nog een aantal dagen op dit traject blijft rijden. Daarmee is op lange termijn de conditionering gemiddeld gezien misschien wel goed, maar kan dit op korte termijn grote afwijkingen vertonen. Dit probleem is in de praktijk mogelijk op te lossen door te sturen op de inzet van treinstellen die zijn uitgerust met WRC. Verder zou dit probleem voorkomen kunnen worden door het uitrusten van complete subgroepen. Wanneer alle treinstellen van een subgroep wel of juist niet zijn uitgerust is de kans dat een trein is uitgerust met WRC gelijk aan één of nul en daarmee speelt de afhankelijk van eerdere passages van treinstellen van dit type geen rol meer.

8 Conclusie en aanbevelingen

Het uiteindelijke doel van dit onderzoek is om te bepalen welke treinstellen van NSR uitgerust zouden moeten worden met WRC om een landelijke dekking van de conditionering te verkrijgen. Dit zodat er minder geluid geproduceerd wordt door het wiel rail contact waardoor er minder geld geïnvesteerd hoeft te worden in andere geluidsbeperkende middelen of er meer treinstellen op trajecten kunnen rijden terwijl de geluidsproductie gelijk blijft.

Uit de verschillende gegevens is een model gekozen wat onder bepaalde voorwaarden een antwoord vindt op deze vraag. Het model dat gebruikt wordt om bij een gegeven verdeling van WRC systemen over verschillende treingroepen, een beeld te geven van het aantal passages over ongeconditioneerd spoor, is goed te gebruiken. Het geeft inzicht in de impact die een gegeven verdeling heeft. Het optimaliseren op dit model om een minimum aantal treinstellen te bepalen dat uitgerust moet worden met WRC, geeft een goede ondergrens voor dit aantal. In de praktijk zal deze toewijzing misschien niet het gewenste resultaat geven. Als eerste zal de spreiding in de conditionering per dag waarschijnlijk groot zijn zoals besproken in paragraaf 7.3. Daarnaast worden er van verschillende treingroepen slechts een klein aantal treinstellen uitgerust met WRC. Dit is mogelijk niet een gewenste situatie in verband met spreiding en onderhoud, zie hiervoor paragraaf 2.4.

Het model geeft een goed inzicht in de invloed die een verdeling van een aantal WRC systemen over verschillende treinstellen heeft. Daarnaast geeft het een beeld van wat de invloed is van de verschillende parameters. De mate van invloed van de parameter f , de maximale fractie die over ongeconditioneerd spoor mag rijden, is afhankelijk van de waarde van f . Bij een percentage van zeven-en-een-half procent van de passages over ongeconditioneerd spoor, levert een wijziging naar vijf procent veel meer extra treinstellen op dan het aantal treinstellen dat bespaard wordt wanneer het percentage naar tien procent gaat.

De invloed van de parameter x , het aantal treinstellen waarvoor een treinstel kan conditioneren, is ook inzichtelijk gemaakt. Bij maximaal $f = 7,5\%$ van de passages over ongeconditioneerd spoor blijkt bij een $x = 5$ ongeveer tweevijfde van de treinstellen een WRC systeem te moeten hebben. Bij een $x = 6$ blijkt dit ongeveer tweezesde te zijn en bij $x = 8$ tweeachtste. Wanneer een treinstel dus voor x treinen conditioneert moeten er ongeveer twee op de x treinstellen worden uitgerust met WRC. De resultaat totalen zijn te vinden in hoofdstuk 6 en voor het gemak van de lezer deels nogmaals weergegeven in Tabel 15. Een uitgewerkt antwoord met het aantal treinstellen per subgroep is te vinden in Bijlage G: Resultaten.

	$x = 5$	$x = 6$	$x = 8$
$f = 5\%$	380	333	267
$f = 7,5\%$	342	299	238
$f = 10\%$	315	272	215
$f = 12,5\%$	290	249	196

Tabel 15: Resultaten aantal met WRC uit te rusten treinstellen

8.1 Vergelijking gewenste en geoptimaliseerde resultaten

Vanuit de wens van ProRail om alleen bepaalde treintypen uit te rusten met WRC is deze toewijzing vergeleken met de resultaten uit het model. Hieruit blijkt dat er bij deze gegeven toewijzing een heel aantal trajecten onvoldoende of geheel niet geconditioneerd worden. Wanneer deze trajecten buiten beschouwing gelaten worden kan de gegeven toewijzing geoptimaliseerd

worden. Dit door, in plaats van alle treinstellen van de gegeven typen, slechts een gedeelte van de gegeven treintypen uit te rusten met WRC. Het blijkt dat de dan verkregen optimale oplossingen veel hoger liggen dan de optimale oplossing op alle treintypen op het gehele model. Bij een $x = 5$ en $f = 10\%$ blijken er bij alleen VIRM, SGM en SLT uitrusten er 342 treinstellen uitgerust te moeten worden om op de vijftig trajecten voldoende conditionering te bereiken. Dit tegen 242 in de optimale oplossing op alle trajecten. Mogelijk is dit beeld iets vertekend door de richtingonafhankelijkheid van de data zoals beschreven in paragraaf 0.

8.2 Interpretatie resultaten

Wanneer gegeven is voor hoeveel treinstellen een treinstel kan conditioneren is de oplossing uit het algoritme interpreteerbaar als het minimum aantal treinstellen dat bij dit gegeven, uitgerust moet worden om een landelijk dekkende conditionering te krijgen die op lange termijn aan gestelde voorwaarden voldoet (uitgaande van de dienstregeling 2011). De antwoorden geven een indicatie van het percentage van het totaal aantal treinstellen dat bij gestelde gegevens moet worden uitgerust met WRC. In de toekomst zijn er een aantal wijzigingen in de dienstregeling en de verdeling van de verschillende treintypen. Hierdoor zal de huidige toedeling van WRC systemen over de verschillende treintypen niet blijven volstaan. De verhouding tussen het totaal aantal beschikbare treinstellen en het aantal treinstellen dat moet worden uitgerust met WRC om landelijke dekking te bereiken is naar verwachting wel ongeveer gelijk.

8.3 Modelkeuze

In hoofdstuk 4 zijn verschillende modellen voorgesteld om een toewijzing van WRC over de verschillende treinstellen te bepalen. In hoofdstuk 6 zijn de uitkomsten van het gekozen model 3 en model 2 naast elkaar gelegd. Hier blijkt dat er bij het gegeven dat een treinstel voor ongeveer vijf andere treinstellen conditioneert en een maximale fractie van 10% van de passages over ongeconditioneerd spoor het aantal treinstellen vergelijkbaar is, 293 tegenover 315. Als het gaat om de fractie van passages over ongeconditioneerd spoor blijkt deze veel ongunstiger verdeeld te zijn. Een gedeelte hiervan valt te verklaren uit de model parameters, maar ook wanneer deze aangepast worden blijkt het resultaat veel slechter te zijn. De keuze voor model 3 boven model 2 lijkt dus een goede keuze. Het levert een antwoord op met een vergelijkbaar aantal treinen maar met een veel kleinere spreiding in de conditionering door een andere verdeling van de conditioneringssystemen over de verschillende treinstellen.

8.4 Aanbevelingen

Vanuit de discussie zijn er een aantal punten naar voren gekomen waarop het model nog verbeterd kan worden. Uit deze punten worden hier een aantal uitgelicht die direct de meeste aanleiding geven voor verder onderzoek:

- Het model en de data aanpassen zodat het rekening houdt met de verschillende sporen op een traject.
- De gevonden oplossingen valideren met nieuwe data.
- De gevonden oplossingen door middel van simulaties controleren op spreiding in de conditionering. Dit door, naar de gevonden verhouding, specifieke treinstellen uit te rusten en daarmee te simuleren.
- Rekening houden met niet NSR treinstellen. Hierbij moet gedacht worden aan zowel regionale vervoerders als goederenvervoer.

9 Bibliografie

1. Arias-Cuevas, O. (2008) *Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact*. Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Delft
2. Bisschop, S. H. (2011) *Wiel-Rail-Conditionering*. Stageverslag, Universiteit Twente, Enschede
3. Descartes, S., Desrayaud, C., Niccolini, E., Berthier, Y. (2005) Presence and role of the third body in a wheel-rail contact. *Wear*, 258 (2005), 1081–1090
4. Eadie, D.T., Kalousek, J., Chiddick, K.C. (2002) The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Wear*, 253 (2002), 185–192
5. Eadie, D.T., Santoro, M. (2005) *Top of Rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction*. Kelsan Technologies Corp
6. Eadie, D.T., Santoro, M., Kalousek, J. (2005) Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves. *Wear*, 258 (2005), 1148–1155
7. F. Vos (2012) Mail aan S. Bisschop, van de datum 1-3-2012
8. Faraon, Irinel Cosmin (2005). *Mixed lubricated line contacts*. Enschede: Ph.D. Thesis, Universiteit Twente, Enschede
9. Hajek, B. (1988) Cooling schedules for optimal annealing. *Mathematics of operations research* Vol. 13, No 2, May 1988
10. Hamrock, B.J., Schmid, S. r., Jacobson, Bo. O. (2004). *Fundamentals of fluid film lubrication*. McGraw-Hill Companies
11. Heckl, M.A., Abrahams, I.D. (1999) Curve squeal of train wheels, part : Mathematical model for its generation. *Journal of sound and Vibration* (2000) 229(3), 669-693
12. Huisman, D., Kroon, L.G., Lentink, R.M., Vromans, M.J.C.M. (2005), Operations Research in Passenger Railway Transportation. *Econometric Institute Report* EI2005-16
13. IGRALUB AG für Schmiertechnik (2011) *Merkblatt HEADLUB*, 18 april 2012 van http://www.igralub.ch/igralub/tl_files/IGRALUB_upload/Igralub_datasheet/HeadLub.pdf
14. Johnson, D.S. Aragon, C.R., McGeoch, L.A., Schevon, C. (1989) Optimization by simulated annealing: An experimental evaluation – Part I (Graph partitioning), *Operations research* 37/6, 865-892
15. Lu, X., Cotter, J., Eadie, D.T. (2005). Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface. *Wear* 259 (2005), 1262-1269
16. Maróti, G., Kroon, L. (2005) Maintenance routing for train units: The interchange model. *Computers & Operations Research* 34 (2007) 1121-1140.
17. Pirlot, M. (1996) General local search methods. *European Journal of Operational Research* 92 (1996) 493-511
18. Popovici, R. I. (2010) *Friction in Wheel - Rail Contacts*. Ph.D. Thesis, Universiteit Twente, Enschede

19. ProRail (2012) *Overzicht nuttige perronlengten in [m]*, 24 april 2012 van <http://www.prorail.nl/Vervoerders/Infrastructuur/Documents/Landelijk%20overzicht%20nuttige%20perronlengten.pdf>
20. Québec Cartier Mining Company (2006) *Using Top of Rail Friction Modifiers to Reduce Fuel Consumption*, 24 April 2012 van http://www.tc.gc.ca/media/documents/programs/quebeccartier_1.pdf
21. Railway Technical web Pages (2012) *Wheels and bogies*. 5 mei van <http://www.railway-technical.com/whlbog.shtml>
22. REBS, *Wheel Flange Lubrication for Rail Vehicles*. 19 april 2012 van <http://rebs.de/english/products/spurkranzschmierung.php>
23. Totten, G. E., Westbrook, S. R., Shah, R.J.(2003) *Fuels and lubricants handbook: technology, properties, performance, and testing, Volume 1*. ASTM International, ISBN: 0803120966, 9780803120969
24. Visser, J. (2012) *Modellering van het effect van een Friction Modifier op booggeluid*. Stageverslag, Universiteit Twente, Enschede
25. Vromans, M.J.C.M. (2005) *Reliability of Railway Systems*. Erasmus Universiteit Rotterdam
26. Wikipedia (n.d.). *Ford–Fulkerson algorithm*. 26 oktober 2011 van http://en.wikipedia.org/wiki/Ford%E2%80%93Fulkerson_algorithm
27. Wikipedia (n.d.). *Tribology*. 15 november 2011 van <http://en.wikipedia.org/wiki/Tribology>
28. Yuanjie WU, M.S. (2008) *Study of interface friction reduction using laser micro-textured die surfaces in metal forming*. The Ohio State University

10 Bijlage A: Gebruikte symbolen

Symbolen

D	Alle doorlooppunten / trajecten
$D' \subset D$	D' alle relevante doorlooppunten voor de bepaling van de isolatiefactor
$f_{\xi, \psi} \in R$	Maximale doorstroom van ξ naar ψ
$iso_{\xi, \psi} \in [0...1]$	Isolatie factor tussen de trajecten ξ en ψ .
$\gamma \in [0...1]$	Drempelwaarde voor isolatiebepaling
$w_{\tau} \in \{0,1\}$	Variabele die aangeeft of een treinstel τ uitgerust is met een WRC systeem
Γ	Set van alle treinstellen
$r \in passage(d, dag)$	Passages r op een traject d op een gegeven dag
$a \in Z$	Aantal keer per dag dat moet worden geconditioneerd
T	Set van alle subgroepen zoals bepaald in hoofdstuk 3.3
$n_t \in Z$	Totaal aantal treinstellen in subgroep t
dag	Een tijdsinterval waarbinnen bijvoorbeeld een gemiddelde gehaald wordt, dit kan per dag zijn maar ook een kleinere of grotere hoeveelheid. Wanneer gesproken wordt over $\forall dag$ wordt hier bedoeld voor elke dag/tijdsinterval waarvan data beschikbaar is
$a(t, d, dag)$	Het aantal treinstellen van subgroep t dat rijdt op traject d op tijdsinterval dag
$u_t \in Z$	Aantal treinstellen dat is uitgerust van een subgroep, $0 \leq u_t \leq n_t, \forall t \in T$
$o_t \in R$	Doelfunctie waarde voor het uitrusten van een treinstel met een WRC systeem uit subgroep t (hiermee kunnen bijvoorbeeld sprinters een voorkeur krijgen bij het uitrusten met WRC boven intercity's)
$c_i \in R$	Penalty waarde, c_1 zijn de kosten voor het negeren randvoorwaarde, c_2 zijn de kosten voor het uitrusten van een treintype
$\nu_d \in \{0,1\}$	Variabele die aangeeft of een trajectvoorwaarde genegeerd wordt
$\theta_t \in \{0,1\}$	Variabele die aangeeft of er treinstellen binnen een subgroep zijn uitgerust met WRC
$x \in N$	Het aantal treinstellen waarvoor één met WRC uitgerust treinstel kan conditioneren (zichzelf meegerekend). Deze x heeft in de verschillende aanpakken dezelfde betekenis maar

	wordt anders gebruikt
	- Eén op de x treinstellen op een traject gemiddeld moet worden uitgerust met WRC - Maximaal aantal treinstellen dat over geconditioneerd spoor kan rijden voordat het spoor ongeconditioneerd is
b	vector die de verschillenden toestanden van het spoor weergeeft:
	$b = \begin{pmatrix} \text{net geconditioneerd} \\ 1 \text{ treinstellen gepasseerd na conditionerend treinstel} \\ \vdots \\ x - 1 \text{ treinstellen gepasseerd na conditionerend treinstel} \\ x \text{ treinstellen gepasseerd/ongeconditioneerd} \end{pmatrix}$
$(b_{r,d})_h$	Kans dat traject d zich na passage r bevindt in toestand h
R_d	Alle passages op een traject d
$P(p_t)$	Overgangsmatrix bij passeren van een treintype t , met p een vector waarin per treingroep de kans is aangegeven dat een treinstel is uitgerust met een WRC systeem:
	$p = \{p_0, p_1, \dots\}, p_t = \frac{u_t}{n_t}, \forall t \in T$
$u_t \in Z$	Het aantal met WRC systemen uitgeruste treinstellen. Dit moet positief zijn en niet het maximaal aantal treinstellen overschrijden.
$f \in R$	Fractie van de passages dat over ongeconditioneerd spoor plaatsvindt
$trein_type(r)$	De treintypesubgroep van het treinstel dat passeert in passage r
$l(r,u) \in R$	Hoeveelheid werkzame conditionering na passage r
$\alpha_l \in R$	Ondergrens waarbij conditionering nog werkt
$\beta_l \in R$	Bovengrens voor werking conditionering
$\kappa(trein_type(r), u_{trein_type(r)})$	$\begin{cases} 0 & \text{Treinstel in passage } r \text{ is niet uitgerust met WRC} \\ 1 & \text{Treinstel in passage } r \text{ is wel uitgerust met WRC} \end{cases}$
$K(l) \in R$	Kostenfunctie voor de aanwezige conditionering l
$B_l \in R$	Variabele die aangeeft wat de maximaal toegestane kosten per traject zijn, uitgaande van de kostenfunctie $K(l)$.
$B_u \in Z$	Variabele die aangeeft wat het maximaal aantal met WRC systemen uit te rusten treinstellen is.
$H = \{0,1, \dots, x\}$	Alle toestanden waarin het spoor zich kan bevinden.

$$s_i = \begin{Bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{|T|} \end{Bmatrix}$$

Variabele om een oplossing in iteratie i weer te geven

$$v \in \mathbb{Z}$$

Stapgrootte in de omgeving gedefinieerd voor de ‘local search’

$$\rho \in [0...1]$$

Kans dat een slechtere oplossing wordt aangenomen

$$\alpha_\rho \in (0...1)$$

Factor waarmee ρ verkleind wordt

$$L_\rho \in \mathbb{Z}$$

Aantal iteraties met een vaste ρ

$$N_v(s)$$

Omgeving van s met stapgrootte v

$$L_v \in \mathbb{Z}$$

Aantal iteraties met een vaste v

$$\alpha_v \in (0...0.75)$$

Factor waarmee v verkleind wordt

11 Bijlage B: Literatuur proces

In deze bijlage wordt kort aangegeven hoe de gebruikte informatie is gevonden. Hierbij worden de verschillende gebruikte zoekmethoden genoemd en de gebruikte zoekwoorden.

11.1 Zoekvragen en zoekstrategie

11.1.1 Werking conditionering

1. Wat is er bekend over de werkingsduur van conditionering?
2. Waarvan hangt de afname van de werking van conditionering af?

11.1.2 Soort informatie en vindplaats

Om een antwoord te vinden op de vragen over de werking van conditionering is er gezocht naar praktisch - wetenschappelijke informatie. Deze wordt verwacht in onderzoeken die gedaan zijn door universiteiten naar de werking van conditionering op treinen, alsmede via sites van bedrijven die conditionering toepassen of onderdelen van de conditioneringssystemen leveren.

Veel van de informatie die gezocht wordt zal te vinden zijn via publieke zoekmachines als Google en Google-scholar. Verder is er de IAVSD (International Association for Vehicle System Dynamics) die veel artikelen die gepubliceerd worden over dit onderwerp verzameld en conferenties organiseert over dit onderwerp. Via deze organisatie zijn veel (links naar) artikelen te vinden. Vanuit de artikelen wordt ook vaak gerefereerd naar andere artikelen en andere auteurs, deze artikelen en auteurs bieden dan een nieuw uitgangspunt. Wanneer naar een artikel gerefereerd wordt, maar deze niet openbaar beschikbaar is, wordt geprobeerd het artikel via een zoekmachines die bereikbaar is via de UT te verkrijgen.

11.1.3 Zoektermen

Omdat veel artikelen in het Engels geschreven zijn wordt ook gezocht in het Engels. De gebruikte termen met uitleg vanwaar ze vandaan komen zijn:

- Adhesion (adhesie)
- adrem (project van NS en ProRail over wiel rail contact)
- “Canadian National Railway” (bedrijf dat conditionering toepast)
- Don Eadie (auteur van artikelen over conditionering)
- Flange (flens van het wiel)
- “Friction modifier” (wrijving beïnvloeder)
- Headlub (het gebruikte conditioneringmiddel)
- Igralub (bedrijf dat Headlub maakt)
- KELTRACK (alternatief voor Headlub)
- Lubrication (smeren)
- Mark Allen (auteur van artikelen over conditionering)
- On-board (er kan ook aan de wal geconditioneerd worden, er wordt specifiek naar on-board conditionering gezicht)
- Portec (bedrijf dat onderdelen voor conditionering levert)
- Richard Stock (auteur van artikelen over conditionering)

- “Top of Rail” (Bovenkant van het spoor, waar naast flens ook geconditioneerd wordt)
- UIC (overkoepelend orgaan waarin verschillende spoorbedrijven samenwerken en onderzoek doen)
- Wheel-Rail contact (wiel-rail-contact)

11.1.4 Reflectie zoekproces

Veel van de zoektermen leveren informatie op die relevant is voor mensen die echt bezig zijn met conditioneren, het monteren van de juiste middelen op de trein etc. Dit is zeker interessant maar minder relevant voor de uiteindelijke vraag die in dit verslag behandeld wordt. Waar in de literatuur conditioneren wordt toegepast op een trein wordt de bepaling van de hoeveelheid belangrijk genoemd, maar niet vermeld. Om een uiteindelijk antwoord te vinden op de vraag waar de werking vanaf hangt, moet teruggevallen worden op de theoretische werking van conditioneren en hieruit zullen de factoren op een trein die invloed hebben afgeleid moeten worden.

11.1.5 Logistiek treinen NSR

3. Wat is er bekend over de treinstel omloop?
4. Waar kan tijdens de planning op gestuurd worden?

11.1.6 Soort informatie en vindplaats

Wanneer het gaat om de planning en de treinstelomloop van de treinen van NSR heeft het door de specifieke karakteristieken alleen zin om te kijken naar de methoden die gebruikt worden in Nederland. Via Google-scholar is hier veel over te vinden, daarnaast zijn er een aantal leerstoelen die hier nauw bij betrokken zijn. Via de publicaties van deze leerstoelen en de zoekresultaten van Google is er veel te vinden. Hierbij is bewust gezocht naar recente informatie, dit omdat de planning van NSR de laatste jaren aan sterke verandering onderhevig is.

Via NSR is ook veel data verkregen waaruit een gedeelte van het antwoord op de vraag naar de treinstel omloop afgeleid kan worden.

11.1.7 Zoektermen

Ondanks dat er vooral naar informatie over Nederland wordt gezocht zijn veel artikelen in het Engels geschreven, daarom worden ook Engelse termen gebruikt. De onderstaande zoektermen zijn gecombineerd gebruikt:

- NSR (Nederlandse Spoorwegen Reizigers)
- Logistiek / Logistic
- Planning / Routing
- treinstel/ railway carriages
- omloop
- treinstel onderhoud planning
- Ingo Hansen (docent NSDelft, werkt samen met ProRail)
- Dennis Huisman (docent Erasmus universiteit, werkt bij NSR)

11.1.8 Reflectie zoekproces

Met behulp van genoemde zoektermen en binnen deze literatuur weer naar verwezen literatuur is er veel te vinden over de treinenomloop bij NSR. Het grote probleem is dat de planning van NSR

wordt gemaakt op trein type niveau. Dit resultaat is geverifieerd bij verschillende betrokken medewerkers, die onderschrijven dat er slechts voor onderhoud op treinstelniveau gepland wordt, deze planning gebeurt op lokaal niveau en maximaal 3 dagen van te voren. Van deze planning wordt slechts een zeer laag percentage gehaald en daarmee is deze planning minder relevant voor mijn onderzoek.

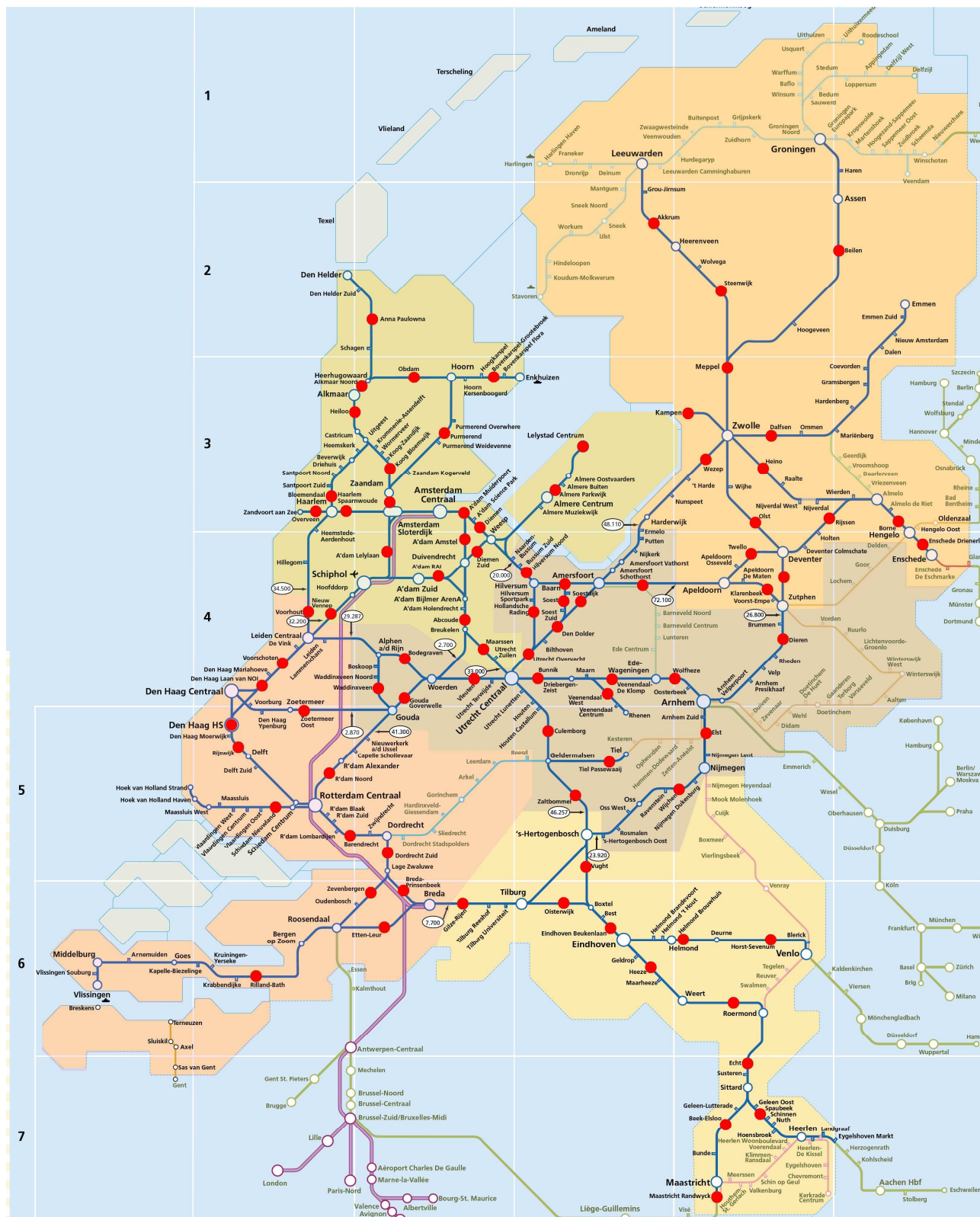
12 Bijlage C: Geselecteerde trajecten

Voor de data die verkregen is van NSR is er voor elk traject in Nederland, dat gebruikt wordt door NSR, een doorlooppunt gekozen. Een overzicht van deze punten met bijbehorende trajecten is te vinden in Tabel 16. De doorlooppunten zijn grafisch weergegeven door middel van rode stippen op een kaart in Figuur 16. Op elk traject is het doorlooppunt willekeurig gekozen. De gevolgen van de keuze van deze doorlooppunten wordt behandeld in paragraaf 0. In de analyses is het traject Maastricht-Grens België buiten beschouwing gelaten.

Doorlooppunt (verkort en volledig)		Traject van/tot	
Ac	Abcoude	Amsterdam Bijlmer Arena	Breukelen
Akm	Akkrum	Leeuwarden	Wolvega
Almp	Almere parkwijk	Almere Centrum	Almere Oostvaarders
Amrn	Alkmaar Noord	Heerhugowaard	Alkmaar
Ana	Anna Paulowna	Den Helder	Heerhugowaard
Asa	Amsterdam Amstel	Duivendrecht	Amsterdam Muiderpoort
Asdl	Amsterdam Lelylaan	Schiphol	Amsterdam Sloterdijk
Asdm	Amsterdam Muiderpoort	Amsterdam Muiderpoort	Amsterdam Centraal
Bdg	Bodegraven	Leiden	Woerden
Bdpb	Breda Prinsenbeek	Lage Zwaluwe	Breda
Bk	Beek Elsloo	Sittard	Maastricht
Bkg	Bovenkarspel-Grootebroek	Hoorn	Enkhuizen
Bl	Beilen	Groningen	Meppel
Bl	Bloemendaal	Uitgeest	Haarlem
Bn	Borne	Almelo	Hengelo
Bnk	Bunnik	Utrecht Centraal	Driebergen-Zeist
Bnva	Barneveld aansluiting	Amersfoort	Apeldoorn
Brd	Barendrecht	Rotterdam Centraal	Dordrecht
Brn	Baarn	Hilversum	Amersfoort
Cl	Culemborg	Utrecht Centraal	Geldermalsen
Ddzd	Dordrecht Zuid	Dordrecht	Lage Zwaluwe
DI	Dalfsen	Zwolle	Emmen
Dld	Den Dolder	Utrecht Overvecht	Den Dolder
Dmn	Diemen	Amsterdam Muiderpoort	Weesp
Dmnz	Diemen Zuid	Duivendrecht	Weesp
Dr	Dieren	Arnhem	Zutphen
Ec	Echt	Roermond	Sittard
Ehb	Eindhoven Beukenlaan	Boxtel	Eindhoven
Esd	Enschede Drienerlo	Enschede	Hengelo
Est	Elst	Arnhem	Nijmegen
Etn	Etten-Leur	Roosendaal	Breda
Gdg	Gouda Goverwell	Gouda	Woerden
Gv	Den Haag HS	Den Haag Centraal	Den Haag HS
Gz	Gilze-Rijen	Breda	Tilburg
Hlms	Haarlem Spaarnwoude	Haarlem	Amsterdam Sloterdijk
Hln	Haalen	Roermond	Weert
Hlo	Heiloo	Alkmaar	Uitgeest
Hmbh	Helmond Brouwhuis	Helmond	Deurne
Hmta	Hemtunnel aansluiting	Zaandam	Amsterdam Sloterdijk
Hno	Heino	Zwolle	Nijverdal
Hor	Hollandsche Rading	Hilversum	Utrecht Overvecht
Hrt	Horst-Sevenum	Deurne	Venlo
Hvsn	Hilversum Noord	Hilversum	Weesp/Almere Centrum
Hze	Heeze	Eindhoven	Weert
Kbk	Klarenbeek	Apeldoorn	Zutphen
Kbw	Koog Bloemwijk	Uitgeest	Zaandam
Klp	Veenendeel-De Klomp	Ede-Wageningen	Driebergen-Zeist
Kpn	Kampen	Kampen	Zwolle
Laa	Den Haag Laan van Nieuw Oost Indie	Den Haag Laan van Nieuw Oost Indie	Den Haag Centraal
Lls	Lelystad Centrum	Almere Oostvaarders	Lelystad Centrum
Mas	Maarssen	Utrecht Centraal	Breukelen
Mp	Meppel	Zwolle	Meppel
Mtr	Maastricht Randwijk	Maastricht	Grens België
Nvp	Nieuw Vennep	Leiden Centraal	Schiphol
Nwl	Schiedam Nieuwland	Hoek van Holland	Rotterdam Centraal
Obd	Obdam	Heerhugowaard	Hoorn
Ost	Olst	Zwolle	Deventer
Ot	Oisterwijk	Tilburg	Boxtel
Ovn	Overveen	Zandvoort aan zee	Haarlem

Pmr	Purmerend	Hoorn	Zaandam
Rai	Amsterdam RAI	Amsterdam Zuid	Duivendrecht/Arena
Rb	Rilland-Bath	Vlissingen	Roosendaal
Rsn	Rijssen	Deventer	Almelo
Rsw	Rijswijk	Den Haag HS	Rotterdam Centraal
Rtn	Rotterdam Noord	Rotterdam Centraal	Gouda
Sbk	Spaubeek	Sittard	Heerlen
Sdn	Soestduinen	Amersfoort	Den Dolder
St	Soest	Baarn	Den Dolder
Swk	Steenwijk	Wolvega	Meppel
Tpsw	Tiel Passewaaij	Tiel	Geldermalsen
Twl	Twello	Deventer	Apeldoorn
Uto	Utrecht Overvecht	Utrecht Overvecht	Utrecht Centraal
Vg	Vught	's Hertogenbosch	Boxtel
Vh	Voorhout	Haarlem	Leiden Centraal
Vndw	Veenendaal West	Rhenen	Driebergen-Zeist
Vst	Voorschoten	Leiden Centraal	Den Haag Laan van Nieuw Oost Indie
Vtn	Vleuten	Woerden	Utrecht Centraal
Wad	Waddinxveen	Gouda	Leiden
Wc	Wijchen	's Hertogenbosch	Nijmegen
Wf	Wolfheze	Arnhem	Ede-Wageningen
Wz	Wezep	Zwolle	Amersfoort
Zbm	Zaltbommel	's Hertogenbosch	Geldermalsen
Zpta	Zutphen Twentekanaal aansluiting	Zutphen	Deventer
Ztmo	Zoetermeer Oost	Den Haag Centraal	Gouda
Zvb	Zevenbergen	Lage Zwaluwe	Roosendaal

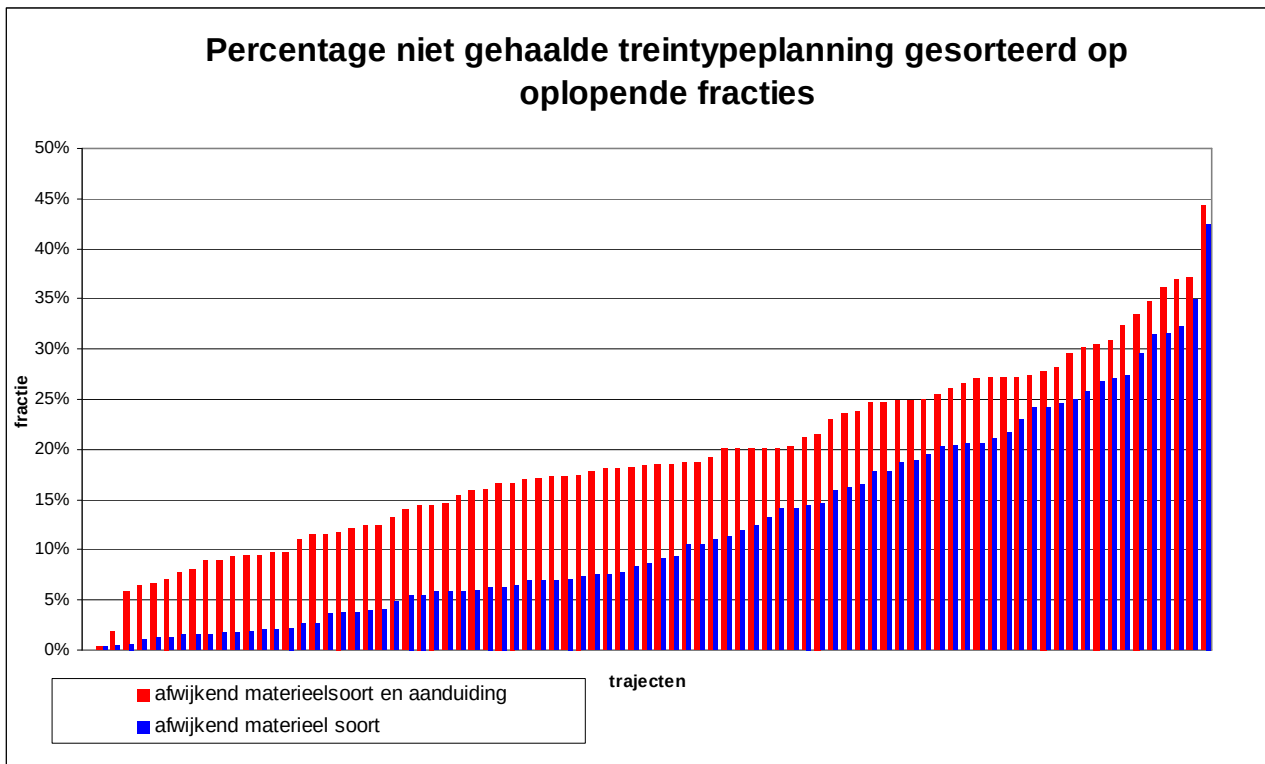
Tabel 16: Gebruikte doorlooppunten met bijbehorend traject



Figuur 16: Gebruikte doorlooppunten

13 Bijlage D: Realisatie planning treinsteltype

In de dienstregeling van NSR wordt voor elke rit een bepaald treintype gepland. Dit treintype bestaat uit een materieelsoort en een materieelaanduiding. Wanneer gekeken wordt naar de realisatie van deze planning valt op dat dit grote afwijkingen vertoont. In Figuur 17 is een overzicht te vinden van de realisatie van de planning. Voor deze grafiek is voor alle trajecten uitgerekend hoeveel procent van de ritten niet gereden is met het geplande materieel soort of met de geplande materieel soort en aanduiding. Om een overzichtelijk overzicht te bieden zijn de trajecten gesorteerd op toenemende fracties. Op elk traject worden een aantal andere ritten gereden, dit kan een vertekend beeld geven in de grafiek. De gemiddelde afwijking van de planning bedraagt voor materieelsoort en aanduiding 20%. De afwijking bedraagt 13% wanneer slechts gekeken wordt naar de materieelsoort.



Figuur 17: Per traject de procentuele afwijkingen van de planning in de realisatie van de planning op treintype niveau

14 Bijlage E: Probleem oplossing per traject

Het probleem van de bepaling van welke treinstellen moeten worden uitgerust met WRC om landelijke dekking te krijgen is voornamelijk moeilijk op te lossen door de grootte van het probleem. De data waarover opgelost moet worden bestaat uit ongeveer tachtig trajecten en veertig treintype subgroepen. Wanneer ook nog rekening gehouden wordt met de richting of het spoor waarop een trein rijdt kan het aantal trajecten nog verdubbelen. Voor een aantal methoden is het totale probleem hiermee te groot om in een keer op te lossen. Om het probleem beheersbaar te houden zou het probleem opgesplitst kunnen worden in kleinere problemen die afzonderlijk opgelost kunnen worden. In deze bijlage worden een aantal mogelijkheden voor het oplossen in subgroepen gegeven en enkele resultaten die behaald zijn met deze methode toegepast op Aanpak 2 – gemiddeld 1 op de x treinstellen moet conditioneren.

14.1 Volgorde trajecten

Bij het opsplitsen van een groter probleem in kleinere problemen die afzonderlijk van elkaar worden opgelost zijn er een aantal punten waar rekening mee gehouden moet worden. De verschillende subproblemen hebben invloed op elkaar. Hierdoor kan een oplossing die voor een bepaald traject optimaal is, heel slecht uitpakken voor andere trajecten. Hierdoor kan het totaal aantal treinstellen dat moet worden uitgerust met WRC snel stijgen. De invloed van dit probleem kan verminderd worden door op een slimme manier de volgorde van de trajecten te kiezen. Op elk traject rijden treinstellen die onderdeel uitmaken van een subgroep (paragraaf 3.3). Er wordt vanuit gegaan dat een algoritme voor een traject een minimale toewijzing vindt van het aantal treinstellen per subgroep dat moet worden uitgerust met WRC zodanig dat het traject voldoende geconditioneerd is. Dit kan aangevuld worden met extra voorwaarden als het minimum aantal treinstellen voor een subgroep of een kostenfunctie voor het niet behalen van de juiste conditionering.

Elke keer als er een traject opgelost moet worden moet er een traject gekozen worden. Dit kan met een aantal regels op een slimme manier. Voor elk nog niet opgelost traject wordt een waarde ϕ berekend. Deze waarde geeft een schatting van het aantal treinstellen dat nog moet worden uitgerust met WRC op dit traject.

- Als voor een traject geldt $\phi < 0$ dan heeft dit traject waarschijnlijk al voldoende conditionering en kan dit traject opgelost worden.
- Als van de nog niet uitgeruste subgroepen op een traject, een subgroep is die meer treinpassages bevat dan het totaal aantal passages van treinstellen op dit traject minus ϕ , moet deze subgroep wel met WRC uitgeruste treinstellen bevatten, of moeten de al uitgeruste subgroepen meer met WRC uitgeruste treinstellen gaan bevatten. In dit geval kan dit traject ook berekend worden.
- Als er nog geen traject is gekozen, kies dan een willekeurig traject

Wanneer een traject wordt opgelost worden hierbij de al behaalde resultaten meegenomen. Als van een subgroep al een aantal treinen zijn uitgerust met WRC, mag een oplossing niet minder dan dit aantal treinstellen uit rusten met WRC.

14.2 Iteratief oplossen

Naast het per traject oplossen van het probleem is het ook mogelijk om dit te combineren met het iteratief oplossen van het probleem. Hierbij wordt er elke keer per traject een benadering van een oplossing gemaakt, vervolgens wordt een nieuw traject gekozen en wordt hier ook een benadering gemaakt van de oplossing waarbij rekening gehouden wordt met de eerder gevonden oplossingen.

14.3 Toepassing op model 2

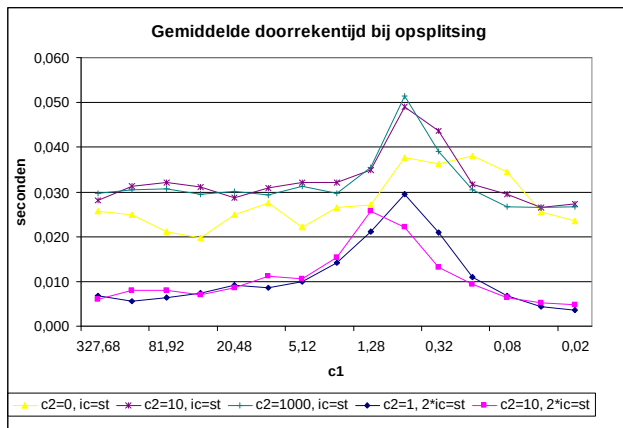
Wanneer de methode van het opsplitsen van het probleem in problemen per traject wordt toegepast op Aanpak 2 – gemiddeld 1 op de x treinstellen moet conditioneren, dan kan voor de waarde van

ϕ gekozen worden voor $\phi_d = \frac{|R_d|}{x} - \sum_{t \in T_d} u_t$. Met

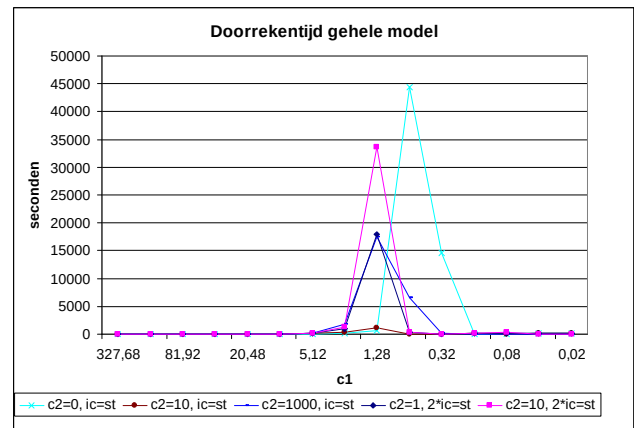
$ R_d $	het totaal aantal treinstelpassages op een traject d
x	Het aantal treinstellen waarvoor een treinstel kan conditioneren
T_d	De subgroepen die rijden op traject d
u_t	Het aantal met WRC uitgeruste treinstellen in subgroep t

De resultaten van een aantal oplossingen uit het model bij $x = 5$ en de andere parameters van model 2 variërend is te vinden in Tabel 17. Wanneer er een willekeurig traject moet worden gekozen is in alfabetische volgorde het eerste nog niet berekende traject gekozen. In de tabel is van alle verschillende subgroepen gegeven of dit een subgroep is van sprinters en hoeveel treinstellen deze subgroep bevat. Bij elk antwoord is gegeven hoeveel keer slechter een intercity de conditionering aanbrengt dan een sprinter en of het probleem in zijn geheel is opgelost of in subgroepen. Daarnaast zijn de kosten gegeven voor het niet halen van het daggemiddelde en daarbij het aantal keer dat het daggemiddelde niet is gehaald. Wat opvalt, is dat berekening 1 en 2, met als enige verschil dat berekening 1 gedaan is in subgroepen, terwijl berekening 2 gedaan is in een keer, slechts 9% verschillen in de doelwaarde. Mogelijk is dit zelfs te verbeteren door te schuiven met c_1 , waarden van deze parameter hebben namelijk een geheel andere invloed wanneer het probleem wordt opgelost in subgroepen. Het aantal overschrijdingen van het daggemiddelde zijn de waarden die tijdens het oplossen zijn berekend. Bij het oplossen in subgroepen kan deze waarde dus in de uiteindelijke oplossing veel lager liggen.

De rekentijden van het model bij opsplitsing zijn een enorme verbetering, bij het voorbeeld in Tabel 17 is de verbetering 65%. Er zijn ook een aantal berekeningen gedaan met verschillende parameters om de verbetering in rekestijd aan te geven. In Figuur 18 en Figuur 19 zijn bij verschillende waarden voor c_1 , c_2 en θ_t de rekentijden gegeven. De grootste verbetering levert een factor 1000 tijdsverschil op voor het oplossen van het probleem. In deze grafieken is de tijd benodigd voor het opbouwen van het probleem niet meegenomen. Het iteratief oplossen is niet toegepast. Voor model 2 zou een iteratieve benadering van de oplossing behaald kunnen worden door de waarde van c_1 zeer laag te laten beginnen en dan langzaam aan te laten toenemen tot de gewenste waarde. Hiermee wordt per traject eerst een oplossing gevonden die voor een aantal dagen goed werkt, dit aantal dagen wordt dan steeds vergroot.



Figuur 18: Gemiddelde rekentijd per traject, $x=5$



Figuur 19: Totale rekentijd bij in één keer oplossen van 84 trajecten, $x=5$

Berekening Factor waarmee een intercity slechter conditioneert dan een sprinter (θ_t) Probleem oplossen in subgroepen C_1 (kosten voor het niet halen van het gemiddelde) Aantal keren dat een daggemiddelde op een traject is overschreden C_2 (kosten voor het uitrusten van een treintype)				1	2	3
				1 ja	1 nee	5 ja
				1	1	0,5
				52	25	1755
				0	0	0
Subgroep	sprinter	Aantal treinstelle n in subgroep		Aantal met WRC uitgerust	Aantal met WRC uitgerust	Aantal met WRC uitgerust
10#1	ja	3		2	1	0
10#2	ja	3		0	1	2
10#3	ja	3		3	0	0
10#4	ja	1		0	0	0
11#1	ja	4		1	0	1
11#2	ja	19		5	5	6
11#3	ja	4		1	1	1
11#4	ja	4		1	1	1
11#5	ja	2		1	1	1
12#1	ja	40		0	0	40
13#1	ja	8		0	0	0
13#2	ja	3		0	0	2
13#3	ja	3		0	0	0
13#4	ja	1		0	0	0
14#1	nee	16		0	0	0
15#1	ja	87		31	31	30
16#1	ja	51		22	22	9
17#1	nee	41		14	15	0
18#1	nee	11		10	4	2
19#1	nee	21		0	0	0
26#1	nee	9		9	1	5
27#1	nee	8		7	0	2
27#2	nee	2		0	0	0
28#1	ja	117		26	24	71
29#1	ja	13		3	3	3
30#1	ja	49		13	12	49
31#1	ja	1		0	0	0
31#2	ja	1		0	0	0
32#1	ja	29		7	6	26
33#1	ja	54		17	18	51
33#3	ja	4		1	1	4
34#1	ja	53		14	11	41
35#1	ja	52		11	11	42
36#1	nee	8		0	0	0
36#2	nee	1		0	0	0
37#1	nee	16		1	14	0
38#1	nee	1		0	0	0
39#1	nee	98		34	25	0
40#1	nee	80		19	20	0
7#1	ja	27		8	6	26
8#1	ja	6		0	0	0
8#2	ja	6		0	0	0
8#3	ja	6		0	0	0
8#4	ja	2		0	0	0
9#1	ja	9		0	0	0
9#2	ja	9		0	0	0
9#3	ja	9		0	0	0
9#4	ja	3		0	0	0
Totaal aantal treinstellen		998		261	234	415
Tijdsduur berekening: (in seconden)				1472,777	2462,903	1559,248

Tabel 17: Resultaten model 2, alle trajecten, x=5

15 Bijlage F: toekomstige treininzet

Voor het vinden van een minimale toewijzing van WRC systemen over de verschillende treinstellen van NSR is gebruik gemaakt van data uit 2010 en 2011. Het vinden van een minimale toewijzing is alleen zinvol wanneer deze toewijzing ook in de jaren na het vinden van deze toewijzing standhoudt. Hiervoor is de inzet van de verschillende treintypen op de verschillende lijnen die NSR bedient vergeleken met de geplande materieelinzet tot 2020. In het basisscenario wat gebruikt wordt als opmaat naar 2020 is per treinserie aangegeven van waar tot waar deze serie rijdt en hoeveel procent van de diensten ingepland is voor welk trein soort. Omdat deze gegevens vertrouwelijk zijn worden alleen de belangrijkste wijzigingen in de inzet van materieel hier gegeven.

Er worden op dertien lijnen de MAT 64, de MDDM en de DD-AR treinstellen vervangen door SLT. Op een enkele dienst vervangt de SGM de MAT 64. Verder worden op vier lijnen de VIRM treinstellen vervangen door het nieuwe materieel DDZ. Er vinden weinig wijzigingen in de ICR/ICM reeks plaats op wat kleine verschuivingen tussen de verhoudingen van ICR en VIRMM na.

Er wordt een belangrijke nieuwe lijn geopend van Zwolle naar Lelystad. Hierdoor rijden treinen van Leeuwarden en Groningen anders. De treinen op de Hanzelijn, de lijn Amersfoort-Utrecht en de treinen op de lijn Zwolle-Utrecht zullen hiermee veranderen. De samenstelling van de treinen op deze lijnen blijft grotendeels gelijk met de huidige samenstelling.

Hieruit valt te concluderen dat door het uitrangeren van de MAT 64 het door de beperkte levensduur duur is om deze treinstellen uit te rusten met WRC. Ongeveer een derde van de MAT 64 lijnen wordt voorlopig gereden door MAT 64, een derde wordt vervangen door SLT en een derde wordt vervangen door SGM.

16 Bijlage G: Resultaten

In deze bijlage zijn de uitgebreide resultaten te vinden. De resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 6 Resultaten. In Tabel 18 is de indeling in subgroepen te vinden. Per subgroep is aangegeven welk treinstel is opgedeeld en op welke doorlooppunten deze subgroep te vinden is. Van model 3 zijn een heel aantal resultaten in detail opgenomen in Tabel 19. Per oplossing zijn de verschillende parameters gegeven en is als uitkomst per subgroep het aantal uit te rusten treinstellen gegeven. Om de resultaten inzichtelijker te maken is een van de resultaten uitgewerkt per traject. Hierbij wordt per traject per treintype de ingezette fractie van dit treintype vermeld en daarbij de fractie van dit treintype dat si uitgerust met WRC. Dit overzicht is te vinden in Tabel 20.

Vanuit ProRail zijn er een aantal intuïtieve toewijzingen voor WRC systemen over verschillende treintypen gegeven. Deze toewijzingen zijn getoets op de percentages droog spoor volgens model 3 zoals aangegeven in paragraaf 6.3. De resultaten hiervan staan in Tabel 21.

Subgroepnaam	Treinsoort en aanduiding	Aantal treinstellen in subgroep	doorlooppunten (voor traject informatie zie Bijlage C: Geselecteerde trajecten)
10#1	DDM1 BVK	4	Almp, Asdl, Asdm, Dmn, Dmnz, Lls, Rai
10#2	DDM1 BVK	3	Bdpb, Brd, Ddzd, Gv, Hlms, Laa, Rsw, Vh, Vst
10#3	DDM1 BVK	3	Bkg, Hmta, Pmr
11#1	DM90 2	23	Bn, Esd
11#2	DM90 2	4	Hno
11#3	DM90 2	4	Kbk
11#4	DM90 2	2	Kpn
12#1	E-LOC 1700	40	Ac, Asa, Asdm, Bdpb, Bk, Bn, Bnk, Bnva, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Est, Etn, Gv, Gz, Hln, Hmbh, Hrt, Hvsn, Hze, Klp, Laa, Mas, Nvp, Ost, Ot, Rai, Rsn, Rsw, Twl, Vg, Vst, Wc, Wf, Zbm, Zpta
13#1	E-LOC 1800	9	Almp, Asdl, Asdm, Dmn, Dmnz, Lls, Rai
13#2	E-LOC 1800	3	Bdpb, Brd, Ddzd, Gv, Hlms, Laa, Rsw, Vh, Vst
13#3	E-LOC 1800	3	Bkg, Hmta, Pmr
14#1	ICE 3M	16	Ac, Asa, Asdm, Bnk, Klp, Mas, Wf
15#1	ICM 3	87	Ac, Akm, Asa, Asdl, Asdm, Bdpb, Bl, Bn, Bnva, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dld, Dmnz, Dr, Ehb, Esd, Est, Etn, Gdg, Gv, Gz, Hmbh, Hrt, Hvsn, Laa, Mas, Mp, Nvp, Ost, Ot, Rai, Rsn, Rsw, Rtn, Sdn, Swk, Twl, Uto, Vg, Vst, Vtn, Wc, Wz, Zbm, Zpta, Ztmo
16#1	ICM 4	51	Ac, Akm, Asa, Asdl, Asdm, Bdpb, Bl, Bn, Bnva, Brd, Brn, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Dr, Ehb, Esd, Est, Etn, Gdg, Gv, Gz, Hmbh, Hrt, Hvsn, Laa, Mas, Mp, Nvp, Ost, Ot, Rai, Rsn, Rsw, Rtn, Sdn, Swk, Twl, Uto, Vst, Vtn, Wc, Wz, Zpta, Ztmo
17#1	ICR BAB	41	Ac, Bdpb, Bk, Brd, Cl, Ddzd, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Est, Etn, Gv, Gz, Hln, Hmbh, Hrt, Hze, Laa, Mas, Nvp, Ost, Ot, Rai, Rsw, Vg, Vst, Wc, Zbm, Zpta
18#1	ICR BBB	11	Ac, Bdpb, Bk, Brd, Cl, Ddzd, Dmnz, Ec, Ehb, Gv, Gz, Hln, Hmbh, Hrt, Hze, Laa, Mas, Nvp, Ot, Rai, Rsw, Vg, Vst, Zbm
19#1	ICR BDS	21	Ac, Bdpb, Bk, Brd, Cl, Ddzd, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Est, Etn, Gv, Gz, Hln, Hmbh, Hrt, Hze, Laa, Mas, Nvp, Ost, Ot, Rai, Rsw, Vg, Vst, Wc, Zbm, Zpta
26#1	ICR-BNL-7 B10	9	Asdl, Brd, Ddzd, Gv, Laa, Nvp, Rsw, Vst, Zvb
27#1	ICR-HSL-6 B10	8	Asdl, Bdpb
27#2	ICR-HSL-6 B10	2	Brd, Ddzd
28#1	MAT 64 2	117	Ac, Almp, Asa, Asdl, Asdm, Bk, Bn, Bnk, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Esd, Est, Gdg, Gv, Gz, Hln, Hlo, Hmbh, Hmta, Hrt, Hvsn, Hze, Kbw, Laa, Lls, Mas, Mtr, Nvp, Ost, Ot, Pmr, Rai, Rb, Rsn, Rsw, Rtn, Sbk, St, Twl, Uto, Vg, Vndw, Vst, Vtn, Wc, Wf, Zpta, Ztmo
29#1	MAT 64 2Z	13	Bk, Dl, Dr, Ec, Ehb, Est, Hln, Hze, Ost, Vg, Wc, Zpta
30#1	MDDM 4	49	Ac, Almp, Amrn, Asa, Asdl, Asdm, Bdpb, Bkg, Bll, Bnk, Brd, Brn, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Etn, Gdg, Gv, Hlms, Hlo, Hmta, Hor, Hvsn, Kbw, Laa, Lls, Mas, Nvp, Obd, Ovn, Pmr, Rai, Rsn, Rtn, Sdn, Uto, Vh, Vndw, Vst, Vtn, Wz, Ztmo, Zvb
31#1	NMBS-LOC 11.8	1	Asdl, Bdpb
31#2	NMBS-LOC 11.8	1	Ddzd
32#1	SGM 2	29	Ac, Almp, Asdl, Asdm, Bdg, Bll, Bn, Bnk, Brn, Dmn, Dmnz, Dr, Esd, Est, Gdg, Gv, Hlms, Hlo, Hmta, Hvsn, Kbw, Laa, Lls, Ovn, Pmr, Rai, Rsn, Twl, Vh, Vst, Vtn, Wad, Wf, Ztmo
33#1	SGM 3	58	Ac, Almp, Amrn, Asa, Asdl, Asdm, Bll, Bn, Bnk, Brn, Dmn, Dmnz, Dr, Esd, Est, Gdg, Gv, Hlms, Hlo, Hmta, Hvsn, Kbw, Laa, Lls, Mas, Nvp, Obd, Ovn, Pmr, Rai, Rsn, Rtn, Twl, Uto, Vh,

Subgroepnaam	Treinsoort en aanduiding	Aantal treinstellen in subgroep	doorlooppunten (voor traject informatie zie Bijlage C: Geselecteerde trajecten)
			Vndw, Vst, Vtn, Wf, Zpta, Ztmo
34#1	SLT 4	53	Ac, Almp, Asa, Asdl, Asdm, Bnk, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Ehb, Etn, Gdg, Gv, Gz, Hlo, Hmta, Kbw, Lls, Mas, Nwl, Pmr, Rai, Rsw, Rtn, St, Tpsw, Uto, Vndw, Vtn, Zbm, Ztmo, Zvb
35#1	SLT 6	52	Ac, Almp, Amrn, Asa, Asdm, Bnk, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Ehb, Etn, Gdg, Gv, Gz, Hlo, Hmta, Kbw, Lls, Mas, Nwl, Ot, Rai, Rsw, Rtn, St, Tpsw, Uto, Vg, Vndw, Vtn, Zbm, Ztmo, Zvb
36#1	TGV PBA	9	Asdl
37#1	TRAXX E186	16	Asdl, Brd, Ddzd, Gv, Laa, Nvp, Rsw, Vst, Zvb
38#1	V250 8	1	Asdl, Dmnz, Gv, Laa, Nvp, Rai, Rsw, Vst
39#1	VIRM 4	98	Ac, Amrn, Ana, Asa, Asdl, Asdm, Bdg, Bdpb, Bk, Bkg, Bl, Bll, Bnk, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Est, Etn, Gdg, Gv, Gz, Hlms, Hln, Hlo, Hmbh, Hmta, Hor, Hrt, Hvsn, Hze, Kbw, Klp, Laa, Mas, Mp, Nvp, Obd, Ost, Ot, Ovn, Pmr, Rai, Rb, Rsw, Rtn, Sbk, Sdn, Uto, Vg, Vh, Vst, Vtn, Wc, Wf, Wz, Zbm, Zpta, Ztmo, Zvb
40#1	VIRM 6	80	Ac, Akm, Amrn, Ana, Asa, Asdl, Asdm, Bdg, Bdpb, Bk, Bkg, Bl, Bll, Bnk, Bnva, Brd, Brn, Cl, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Dr, Ec, Ehb, Est, Etn, Gdg, Gv, Gz, Hlms, Hln, Hlo, Hmbh, Hmta, Hrt, Hvsn, Hze, Kbw, Klp, Laa, Mas, Mp, Nvp, Ost, Ot, Ovn, Pmr, Rai, Rb, Rsw, Rtn, Sbk, Sdn, Swk, Twl, Uto, Vg, Vh, Vst, Vtn, Wc, Wf, Wz, Zbm, Zpta, Ztmo, Zvb
7#1	DD-AR 4	27	Ac, Almp, Amrn, Asa, Asdl, Asdm, Bdpb, Bkg, Bll, Bnk, Brd, Brn, Ddzd, Dld, Dmn, Dmnz, Etn, Gdg, Gv, Hlms, Hlo, Hmta, Hor, Hvsn, Kbw, Laa, Lls, Mas, Nvp, Obd, Ovn, Pmr, Rai, Rsw, Rtn, Sdn, Uto, Vh, Vst, Wz, Zvb
8#1	DDM1 ABV	8	Almp, Asdl, Asdm, Dmn, Dmnz, Lls, Rai
8#2	DDM1 ABV	6	Bdpb, Brd, Ddzd, Gv, Hlms, Laa, Rsw, Vh, Vst
8#3	DDM1 ABV	6	Bkg, Hmta, Pmr
9#1	DDM1 BV	12	Almp, Asdl, Asdm, Dmn, Dmnz, Lls, Rai
9#2	DDM1 BV	9	Bdpb, Brd, Ddzd, Gv, Hlms, Laa, Rsw, Vh, Vst
9#3	DDM1 BV	9	Bkg, Hmta, Pmr

Tabel 18: Indeling in subgroepen

Overzicht verschillende uitkomsten methode 3 bij verschillende parameters													
Oplossing		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x		5	5	5	5	6	6	6	6	8	8	8	8
f		5%	7,5%	10%	12,5%	5%	7,5%	10%	12,5%	5%	7,5%	10%	12,5%
Treingroepen aanpassing, nummer verwijst naar paragraaf		6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Lengte tabu lijst		17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
v_0		25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
α_v		0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
L_v		25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
ρ_0		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
α_ρ		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
L_ρ		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Stoppen na ...													
achtereenvolgende iteraties		17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
geen oplossing gekozen													
Tijdsduur (in 1000 sec)		169	171	170	157	242	161	242	242	430	342	430	420
Aantal iteraties		2681	2653	2677	2556	3251	2779	3229	3333	3964	3544	3954	3984
Verbetering doelwaarde door herstart op best gevonden oplossing		1	1	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0
Waarde best gevonden oplossing		380	342	315	290	333	299	272	249	267	238	215	196
Aantal uitgeruste treinstellen per subgroep met het totaal aantal treinstellen in deze subgroep	10#1	4	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	10#2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10#3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11#1	23	11	10	9	7	9	9	8	7	8	6	6
	11#2	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	11#3	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
	11#4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	12#1	40	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	13#1*	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13#2*	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13#3*	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14#1	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15#1	87	45	45	47	47	47	48	43	35	41	39	35
	16#1	51	22	14	6	1	10	1	2	7	3	0	0
	17#1*	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18#1*	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19#1	21	17	14	14	14	14	15	13	12	13	11	11
	26#1	9	7	6	6	4	5	0	7	5	5	6	4
	27#1	8	4	4	4	1	3	0	2	3	4	1	3
	27#2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	28#1	117	49	46	41	36	45	35	34	32	34	30	26
	29#1	13	6	6	5	5	6	5	5	4	5	4	4
	30#1	49	22	18	16	17	19	18	14	14	15	13	12
	31#1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	31#2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	32#1	29	14	12	14	10	12	11	10	9	10	9	8
	33#1	58	28	25	21	27	25	21	19	18	19	17	15
	34#1	53	25	22	22	18	21	19	18	16	17	15	15
	35#1	52	24	22	19	19	21	20	17	16	17	15	13
	36#1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	37#1	16	0	0	0	2	3	8	0	0	0	0	0
	38#1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	39#1	98	45	40	36	34	39	36	32	31	31	28	26
	40#1	80	42	38	35	33	37	37	31	26	30	29	24
	7#1	27	13	15	15	10	12	10	12	9	9	9	8
	8#1*	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8#2*	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8#3*	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9#1*	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9#2*	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9#3*	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 19: Oplossingen local search, *) subgroep mag niet uitgerust worden met WRC

Resultaten $x = 5$ en $f = 10\%$ weergegeven per traject met bijbehorende treintype inzet

doorlooppunt	Percentages ingeplande treintypen	Per treintype het percentage met WRC uitgeruste treinen	%-droog spoor
Ac	35% VIRM 4, 31% VIRM 6, 11% SLT 6, 8% SLT 4, 6% MAT 64 2	33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,3%
Akm	67% ICM 3, 24% ICM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4	7,6%
Almp	56% SGMM 3, 22% MDDM 4, 11% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 45% MDDM 4, 41% SGMM 3	8,6%
Amrn	43% VIRM 4, 32% VIRM 6, 21% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,4%
Ana	60% VIRM 6, 40% VIRM 4	41% VIRM 4, 43% VIRM 6	6,7%
Asa	35% VIRM 4, 23% VIRM 6, 15% SLT 6, 11% SLT 4, 8% MAT 64 2	33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,7%
Asdl	20% VIRM 6, 19% SGMM 3, 12% VIRM 4, 8% TRAXX E186, 8% MDDM 4	45% MDDM 4, 41% SGMM 3, 6% TRAXX E186, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,9%
Asdm	23% SGMM 3, 22% VIRM 4, 16% VIRM 6, 8% MDDM 4, 7% SGMM 2, 7% SLT 6	45% MDDM 4, 38% SGMM 2, 41% SGMM 3, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,2%
Bdg	73% VIRM 4, 21% VIRM 6	41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,1%
Bdpb	19% ICR BAB, 12% VIRM 4, 11% VIRM 6, 11% MDDM 4, 10% ICR BDS, 10% E-LOC 1700, 10% ICR BBB	78% ICR BAB, 45% MDDM 4, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,2%
Bk	48% MAT 64 2, 25% VIRM 4, 16% VIRM 6	33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,7%
Bkg	47% VIRM 4, 43% VIRM 6	41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,9%
Bl	71% ICM 3, 23% ICM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4	7,5%
BlI	73% DD-AR 4, 20% VIRM 4	37% DD-AR 4, 41% VIRM 4	9,0%
Bn	29% DM90 2, 22% ICM 3, 10% SGMM 3, 10% ICM 4	39% DM90 2, 41% ICM 3, 37% ICM 4, 41% SGMM 3	9,2%
Bnk	31% VIRM 6, 22% VIRM 4, 14% SLT 6, 13% SLT 4, 11% MAT 64 2	33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,4%
Bnva	44% ICM 3, 21% ICM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4	9,7%
Brd	15% VIRM 6, 12% MDDM 4, 12% VIRM 4, 10% SLT 6, 9% ICR BAB	78% ICR BAB, 45% MDDM 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,3%
Brn	22% ICM 3, 13% SGMM 3, 9% SGMM 2, 7% VIRM 4, 7% ICM 4, 7% SLT 4, 7% VIRM 6, 6% SLT 6	41% ICM 3, 37% ICM 4, 38% SGMM 2, 41% SGMM 3, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,5%
Cl	30% VIRM 4, 29% SLT 6, 19% VIRM 6, 12% SLT 4, 6% MAT 64 2	33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,1%
Ddzd	13% VIRM 6, 11% ICR BAB, 11% VIRM 4, 8% SLT 6, 7% MDDM 4, 6% TRAXX E186, 6% ICR-BNL-7 B10	78% ICR BAB, 67% ICR-BNL-7 B10, 45% MDDM 4, 38% SLT 6, 6% TRAXX E186, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,4%
DI	100% MAT 64 2Z	38% MAT 64 2Z	8,8%
Dld	40% ICM 3, 17% ICM 4, 12% MDDM 4, 11% SLT 4, 10% SLT 6	41% ICM 3, 37% ICM 4, 45% MDDM 4, 38% SLT 4, 38% SLT 6	7,7%
Dmn	43% SGMM 3, 14% SGMM 2, 14% MDDM 4, 10% VIRM 4, 10% VIRM 6, 6% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 45% MDDM 4, 38% SGMM 2, 41% SGMM 3, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,8%
Dmnz	22% ICM 3, 21% SGMM 3, 18% MDDM 4, 7% ICM 4, 7% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 41% ICM 3, 37% ICM 4, 45% MDDM 4, 41% SGMM 3	8,7%
Dr	24% SGMM 3, 21% ICR BAB, 11% E-LOC 1700, 11% ICR BDS, 9% VIRM 6, 7% ICM 3, 6% SGMM 2, 6% ICM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4, 78% ICR BAB, 38% SGMM 2, 41% SGMM 3, 43% VIRM 6	6,0%
Ec	38% VIRM 4, 36% MAT 64 2, 17% VIRM 6	33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,9%
Ehb	31% MAT 64 2, 23% VIRM 4, 15% VIRM 6, 10% ICR BAB	78% ICR BAB, 33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,1%
Esd	39% DM90 2, 29% ICM 3, 15% ICM 4, 12% SGMM 3	39% DM90 2, 41% ICM 3, 37% ICM 4, 41% SGMM 3	8,0%
Est	28% VIRM 6, 19% VIRM 4, 14% ICR BAB, 14% SGMM 3, 7% E-LOC 1700, 7% ICR BDS	78% ICR BAB, 41% SGMM 3, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	6,5%
Etn	30% ICR BAB, 15% E-LOC 1700, 15% ICR BDS, 11% VIRM 6, 9% ICM 3, 8% ICM 4, 7% VIRM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4, 78% ICR BAB, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	4,9%
Gdg	29% ICM 3, 18% SLT 6, 18% SLT 4, 12% ICM 4, 8% VIRM 4, 6% VIRM 6, 6% MAT 64 2	41% ICM 3, 37% ICM 4, 33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,3%
Gv	16% VIRM 6, 12% VIRM 4, 10% SLT 6, 10% MDDM 4, 8% ICR BAB	78% ICR BAB, 45% MDDM 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,8%
Gz	24% ICR BAB, 12% E-LOC 1700, 12% SLT 6, 12% ICR BDS, 9% VIRM 6, 8% VIRM 4, 6% ICR BBB	78% ICR BAB, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	6,9%
Hlms	51% DD-AR 4, 18% MDDM 4, 9% VIRM 4, 7% VIRM 6, 6% SGMM 2	37% DD-AR 4, 45% MDDM 4, 38% SGMM 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,9%
Hln	58% VIRM 4, 26% VIRM 6	41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,2%
Hlo	44% VIRM 4, 26% VIRM 6, 13% DD-AR 4, 8% SLT 6	37% DD-AR 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,6%
Hmbh	26% MAT 64 2, 20% ICR BAB, 10% E-LOC 1700, 10% ICR BBB, 10% ICR BDS, 7% VIRM 4, 7% VIRM 6	78% ICR BAB, 33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,9%
Hmta	26% VIRM 4, 20% SGMM 3, 20% VIRM 6,	33% MAT 64 2, 41% SGMM 3, 38% SLT 4, 38%	8,3%

Hno	12% SLT 6, 10% SLT 4, 7% MAT 64 2	SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	
Hor	100% DM90 2	50% DM90 2	3,1%
Hrt	67% MDDM 4, 23% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 45% MDDM 4	6,1%
	29% ICR BAB, 15% E-LOC 1700, 15% ICR BBB, 15% ICR BDS, 11% VIRM 4, 10% VIRM 6	78% ICR BAB, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	
Hvsn	19% MDDM 4, 19% ICM 3, 12% SGMM 3, 8% SGMM 2, 7% VIRM 4, 7% ICM 4, 7% VIRM 6, 6% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 41% ICM 3, 37% ICM 4, 45% MDDM 4, 38% SGMM 2, 41% SGMM 3, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	6,6%
Hze	38% MAT 64 2, 37% VIRM 4, 16% VIRM 6	33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,7%
Kbk	100% DM90 2	50% DM90 2	9,1%
Kbw	30% VIRM 4, 21% VIRM 6, 19% SLT 6, 15% SLT 4, 11% MAT 64 2	33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	3,1%
Klp	53% VIRM 6, 38% VIRM 4, 7% ICE 3M	41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,2%
Kpn	100% DM90 2	50% DM90 2	9,0%
Laa	22% VIRM 6, 16% VIRM 4, 13% MDDM 4, 11% SGMM 3, 7% DD-AR 4, 6% SGMM 2	37% DD-AR 4, 45% MDDM 4, 38% SGMM 2, 41% SGMM 3, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	3,1%
Lls	37% MDDM 4, 35% SGMM 3, 18% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 45% MDDM 4, 41% SGMM 3	7,7%
Mas	35% VIRM 4, 31% VIRM 6, 10% SLT 6, 8% MAT 64 2, 8% SLT 4	33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,8%
Mp	72% ICM 3, 24% ICM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4	8,3%
Nvp	29% VIRM 6, 18% VIRM 4, 14% MDDM 4, 7% TRAXX E186, 6% ICR-BNL-7 B10	67% ICR-BNL-7 B10, 45% MDDM 4, 6% TRAXX E186, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,5%
Nwl	90% SLT 4, 10% SLT 6	38% SLT 4, 38% SLT 6	6,7%
Obd	51% DD-AR 4, 42% VIRM 4	37% DD-AR 4, 41% VIRM 4	9,3%
Ost	31% ICR BAB, 16% E-LOC 1700, 15% ICR BDS, 12% VIRM 6, 9% ICM 3, 9% ICM 4, 6% VIRM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4, 78% ICR BAB, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,4%
Ot	44% MAT 64 2, 16% ICR BAB, 8% E-LOC 1700, 8% ICR BBB, 8% ICR BDS, 7% VIRM 4, 6% VIRM 6	78% ICR BAB, 33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	4,9%
Ovn	86% DD-AR 4	37% DD-AR 4	9,9%
Pmr	49% SGMM 3, 21% VIRM 4, 19% VIRM 6	41% SGMM 3, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,5%
Rai	17% ICM 3, 16% SGMM 3, 14% MDDM 4, 13% VIRM 6, 9% VIRM 4, 6% ICM 4, 6% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 41% ICM 3, 37% ICM 4, 45% MDDM 4, 41% SGMM 3, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,6%
Rb	58% MAT 64 2, 30% VIRM 6, 13% VIRM 4	33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,3%
Rsn	26% ICM 3, 25% SGMM 3, 12% ICM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4, 41% SGMM 3	9,9%
Rsw	16% VIRM 6, 12% MDDM 4, 12% VIRM 4, 10% SLT 6, 8% ICR BAB	78% ICR BAB, 45% MDDM 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,1%
Rtn	37% ICM 3, 18% SLT 6, 16% ICM 4, 11% SLT 4, 7% MAT 64 2, 6% VIRM 6	41% ICM 3, 37% ICM 4, 33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 43% VIRM 6	8,0%
Sbk	50% VIRM 4, 37% MAT 64 2, 12% VIRM 6	33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,3%
Sdn	52% ICM 3, 22% ICM 4, 16% MDDM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4, 45% MDDM 4	8,9%
St	46% SLT 4, 43% SLT 6, 11% MAT 64 2	33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6	7,2%
Swk	71% ICM 3, 26% ICM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4	9,5%
Tpsw	64% SLT 6, 24% SLT 4	38% SLT 4, 38% SLT 6	7,6%
Twl	35% ICM 3, 17% ICM 4, 16% SGMM 3	41% ICM 3, 37% ICM 4, 41% SGMM 3	9,0%
Uto	31% ICM 3, 24% MDDM 4, 13% ICM 4, 9% SLT 4, 8% SLT 6, 7% DD-AR 4	37% DD-AR 4, 41% ICM 3, 37% ICM 4, 45% MDDM 4, 38% SLT 4, 38% SLT 6	9,0%
Vg	38% VIRM 4, 27% MAT 64 2, 24% VIRM 6	33% MAT 64 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,4%
Vh	29% SGMM 3, 22% MDDM 4, 14% DD-AR 4, 13% SGMM 2, 11% VIRM 4, 7% VIRM 6	37% DD-AR 4, 45% MDDM 4, 38% SGMM 2, 41% SGMM 3, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,5%
Vndw	34% SLT 6, 32% SLT 4, 26% MAT 64 2	33% MAT 64 2, 38% SLT 4, 38% SLT 6	9,1%
Vst	22% VIRM 6, 16% VIRM 4, 13% MDDM 4, 11% SGMM 3, 7% DD-AR 4, 6% SGMM 2	37% DD-AR 4, 45% MDDM 4, 38% SGMM 2, 41% SGMM 3, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	9,8%
Vtn	37% ICM 3, 21% VIRM 4, 15% ICM 4, 10% VIRM 6, 7% SLT 4, 6% SLT 6	41% ICM 3, 37% ICM 4, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,8%
Wad	100% SGMM 2	38% SGMM 2	7,7%
Wc	31% MAT 64 2, 19% ICR BAB, 10% E-LOC 1700, 10% ICR BDS, 7% VIRM 6, 6% ICM 4, 6% ICM 3	41% ICM 3, 37% ICM 4, 78% ICR BAB, 33% MAT 64 2, 43% VIRM 6	9,2%
Wf	41% VIRM 6, 29% VIRM 4, 23% SGMM 2	38% SGMM 2, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,7%
Wz	53% ICM 3, 21% MDDM 4, 18% ICM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4, 45% MDDM 4	9,1%
Zbm	40% VIRM 4, 26% VIRM 6, 18% SLT 6, 7% SLT 4	38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,0%
Zpta	29% ICR BAB, 15% E-LOC 1700, 15% ICR BDS, 12% ICM 3, 12% VIRM 6, 10% ICM 4, 6% VIRM 4	41% ICM 3, 37% ICM 4, 78% ICR BAB, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	7,5%
Ztmo	26% ICM 3, 17% SLT 4, 16% SLT 6, 15% VIRM 4, 10% ICM 4, 6% VIRM 6	41% ICM 3, 37% ICM 4, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	5,1%
Zvb	15% SLT 6, 14% VIRM 6, 12% TRAXX E186, 11% ICR-BNL-7 B10, 10% VIRM 4, 7% SLT 4	67% ICR-BNL-7 B10, 38% SLT 4, 38% SLT 6, 6% TRAXX E186, 41% VIRM 4, 43% VIRM 6	8,1%
			7,4%

Tabel 20: resultaten model 3 bij x=5 en f=10% weergave gecombineerd met de inzet van treinstellen

Aantal treinstellen	Typen:DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGMM2, SGMM3, SLT4, SLT6, DDAR	Typen: SGMM2, SGMM3	Type: SGMM3	Typen:DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGMM2, SGMM3, SLT4, SLT6, DDAR, VIRM4, VIRM6	Typen:DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGMM2, SGMM3, SLT4, SLT6, DDAR, VIRM4, VIRM6	Typen: SGMM2, SGMM3, VIRM 4, VIRM 6	Typen: SGMM2, SGMM3, VIRM 4, VIRM 6	Typen: SGMM2, SGMM3, VIRM 4, VIRM 6	Typen: SGMM2, SGMM3, SLT 4, SLT 6, VIRM 4, VIRM 6
	441	87	58	619	619	265	265	265	370
X	5	5	5	6	8	5	6	8	5
Doorlooppunt	Percentage trainen op droog spoor								
Ac	24,8%	95,1%	95,7%	0,2%	0,1%	1,6%	1,1%	0,7%	0,7%
Akm	100,0%	100,0%	100,0%	83,5%	78,8%	85,9%	83,5%	78,8%	85,9%
Almp	0,0%	2,2%	2,6%	0,0%	0,0%	2,2%	1,8%	1,3%	1,1%
Amrn	31,2%	98,0%	98,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Ana	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Asa	6,1%	94,7%	94,7%	0,4%	0,2%	2,5%	1,6%	1,0%	1,2%
Asdl	26,0%	30,9%	32,4%	2,3%	0,7%	4,1%	2,5%	0,7%	4,0%
Asdm	3,0%	18,5%	22,7%	0,1%	0,0%	2,0%	0,9%	0,3%	0,7%
Bdg	95,3%	95,3%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Bdpb	41,0%	100,0%	100,0%	2,4%	0,9%	18,4%	14,4%	9,4%	18,4%
Bk	0,3%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	3,7%	1,5%	0,2%	3,7%
Bkg	84,9%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Bl	100,0%	100,0%	100,0%	76,6%	70,0%	79,9%	76,6%	70,0%	79,9%
BlI	0,0%	90,7%	92,1%	0,0%	0,0%	34,3%	30,3%	23,8%	34,3%
Bn	2,4%	35,9%	42,4%	0,7%	0,1%	35,9%	32,1%	27,9%	35,9%
Bnk	1,1%	93,5%	94,6%	0,0%	0,0%	0,9%	0,3%	0,1%	0,3%
Bnva	100,0%	100,0%	100,0%	92,2%	91,6%	93,0%	92,2%	91,6%	93,0%
Brd	7,8%	100,0%	100,0%	0,1%	0,0%	14,5%	10,2%	5,0%	11,5%
Brr	14,5%	44,7%	50,2%	3,2%	0,3%	14,0%	9,3%	4,4%	7,5%
Cl	0,9%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	4,2%	2,7%	1,4%	1,3%
Ddzd	25,9%	100,0%	100,0%	1,1%	0,2%	13,6%	9,2%	4,0%	5,8%
DI	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Dld	16,8%	100,0%	100,0%	9,7%	3,4%	84,2%	81,9%	77,4%	29,4%
Dmn	0,1%	3,0%	3,7%	0,0%	0,0%	1,3%	1,2%	1,2%	1,3%
Dmnz	1,0%	36,7%	38,0%	0,5%	0,1%	35,7%	28,0%	15,2%	33,9%
Dr	1,2%	1,4%	8,5%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%	0,0%	0,3%
Ec	4,1%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	1,0%	0,4%	0,1%	1,0%
Ehb	16,2%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	6,1%	3,5%	1,0%	5,8%
Esd	4,5%	44,1%	49,6%	1,9%	0,8%	44,1%	40,3%	36,5%	44,1%
Est	20,2%	20,7%	29,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,1%
Etn	82,6%	100,0%	100,0%	30,4%	23,6%	40,4%	36,3%	29,7%	39,6%
Gdg	8,0%	96,7%	97,3%	1,4%	0,3%	58,7%	53,2%	43,4%	8,1%
Gv	20,0%	97,4%	99,0%	2,7%	1,1%	27,0%	22,2%	14,8%	7,7%
Gz	9,8%	100,0%	100,0%	2,8%	0,5%	39,9%	35,2%	27,7%	9,4%
Hlms	0,3%	73,4%	77,8%	0,0%	0,0%	28,4%	21,8%	13,7%	28,4%
Hln	87,1%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,2%	0,0%	0,3%
Hlo	16,2%	98,0%	98,1%	0,0%	0,0%	1,5%	0,9%	0,3%	0,4%
Hmbh	16,1%	100,0%	100,0%	8,5%	7,6%	39,5%	35,0%	27,7%	39,5%
Hmta	4,8%	48,1%	49,4%	0,0%	0,0%	0,4%	0,2%	0,0%	0,2%
Hno	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Hor	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	95,3%	95,2%	95,0%	95,3%
Hrt	96,2%	100,0%	100,0%	26,4%	22,4%	29,5%	26,9%	22,8%	29,5%
Hvsn	6,5%	38,9%	44,1%	0,2%	0,0%	7,6%	5,0%	3,1%	7,6%
Hze	5,9%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	4,4%	2,8%	1,8%	4,4%
Kbk	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Kbw	1,6%	91,7%	92,5%	0,0%	0,0%	2,0%	1,1%	0,6%	0,7%
Klp	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Kpn	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	99,9%	100,0%
Laa	11,2%	45,8%	52,3%	0,1%	0,0%	2,4%	1,2%	0,3%	2,4%
Lls	0,0%	39,9%	40,8%	0,0%	0,0%	39,9%	38,2%	35,3%	38,9%
Mas	16,2%	96,0%	96,0%	0,2%	0,0%	1,5%	1,0%	0,6%	0,7%
Mp	100,0%	100,0%	100,0%	84,2%	80,5%	86,3%	84,2%	80,5%	86,3%
Nvp	31,7%	96,1%	96,1%	0,5%	0,3%	1,2%	0,7%	0,4%	1,2%
Nwl	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%
Obd	29,7%	96,3%	96,3%	0,0%	0,0%	40,5%	38,5%	34,5%	40,5%
Ost	96,2%	100,0%	100,0%	30,3%	20,6%	38,7%	32,3%	22,5%	38,7%
Ot	1,6%	100,0%	100,0%	0,5%	0,4%	46,8%	41,3%	33,7%	46,4%
Ovn	0,0%	84,7%	86,2%	0,0%	0,0%	78,7%	76,8%	73,0%	78,7%
Pmr	0,5%	2,5%	2,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Aantal treinstellen	Typen:DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGMM2, SGMM3, SLT4, SLT6, DDAR	Typen: SGMM2, SGMM3	Type: SGMM3	Typen:DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGMM2, SGMM3, SLT4, SLT6, DDAR, VIRM4, VIRM6	Typen:DDM1, DM'90, MAT 64, MDDM, SGMM2, SGMM3, SLT4, SLT6, DDAR, VIRM4, VIRM6	Typen: SGMM2, SGMM3, VIRM 4, VIRM 6	Typen: SGMM2, SGMM3, VIRM 4, VIRM 6	Typen: SGMM2, SGMM3, VIRM 4, VIRM 6	Typen: SGMM2, SGMM3, SLT 4, SLT 6, VIRM 4, VIRM 6
X	441	87	58	619	619	265	265	265	370
Doorlooppunt	5	5	5	6	8	5	6	8	5
Percentage treinen op droog spoor									
Rai	16,5%	36,0%	37,8%	4,1%	1,1%	9,8%	6,1%	1,9%	9,6%
Rb	0,2%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	1,1%	0,8%	0,7%	1,1%
Rsn	5,5%	5,6%	9,2%	1,7%	0,2%	5,6%	1,8%	0,2%	5,6%
Rsw	7,2%	100,0%	100,0%	0,3%	0,1%	14,3%	9,6%	3,8%	6,4%
Rtn	11,0%	96,5%	96,5%	3,7%	0,7%	66,9%	63,7%	58,1%	16,5%
Sbk	0,3%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sdn	25,1%	100,0%	100,0%	14,8%	5,7%	81,4%	78,5%	73,3%	81,4%
St	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%
Swk	100,0%	100,0%	100,0%	80,8%	75,5%	83,9%	80,8%	75,5%	83,9%
Tpsw	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	99,9%	0,0%
Twl	18,4%	18,5%	23,4%	11,1%	3,8%	18,2%	11,2%	3,9%	18,2%
Uto	5,8%	99,4%	99,4%	2,1%	0,3%	82,7%	79,8%	75,1%	38,3%
Vg	21,1%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,2%	0,1%	0,5%
Vh	0,1%	6,3%	12,2%	0,0%	0,0%	2,9%	1,2%	0,2%	2,9%
Vndw	0,0%	89,6%	89,6%	0,0%	0,0%	89,6%	88,3%	86,4%	7,2%
Vst	11,7%	39,6%	47,2%	0,1%	0,0%	2,8%	1,5%	0,3%	2,8%
Vtn	54,1%	98,3%	99,5%	3,4%	0,5%	31,7%	25,5%	15,6%	10,9%
Wad	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Wc	15,2%	100,0%	100,0%	7,7%	6,5%	54,9%	50,6%	43,1%	54,9%
Wf	15,9%	15,9%	98,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Wz	27,9%	100,0%	100,0%	17,1%	5,4%	90,5%	89,0%	85,9%	90,5%
Zbm	20,7%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,7%	0,6%	0,5%	0,0%
Zpta	91,2%	94,1%	94,1%	26,1%	16,6%	33,6%	27,4%	18,0%	33,6%
Ztmo	2,5%	95,3%	97,3%	0,8%	0,0%	34,3%	27,0%	16,1%	7,2%
Zvb	3,2%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	20,1%	11,8%	3,0%	0,4%
Aantal doorlooppunten die voldoen aan de voorwaarden voor de fracties:									
minder dan 30%	66	11	9	77	79	48	52	58	58
minder dan 10%	43	7	5	72	75	38	41	45	50
meer dan 30%	18	73	75	7	5	36	32	26	26
meer dan 10%	41	77	79	12	9	46	43	39	34

Tabel 21: Percentages over ongeconditioneerd spoor bij gegeven toewijzingen. Bij meer dan 10% passages over droog spoor is het percentage rood gekleurd.

17 Bijlage H: Gebruikte programma's

Om de benodigde data te verkrijgen moeten verschillende tools gebruikt worden. Daarnaast is er data nodig om resultaten te kunnen krijgen. In deze bijlage is een overzicht gegeven van de benodigde data en de verschillende tools met de bijbehorende parameters. Alle tools zijn geschreven in C# Visual Studio 2010, waarbij gebruik gemaakt is van Microsoft SQL server 2008.

maken maximum flow graphs

Gebruik:

graph_maxflow treintype path

treintype: Het treintype waarvoor de resultaten berekend moeten worden, -1 is alle treintypen

path: de directory waarin de resultaten worden opgeslagen

Benodigde data:

Tabel	Velden
Treinenindienstregeling	MAT_SRT, MAT_AANDUIDING, treintype, TA_UTVTIJD_DT
dienstregeling	TA_DRGLPT, TA_VERKEERSDATUM_D, TA_TREINNR_N, TA_UTVTIJD_DT
Mat_route	MU_VERKEERSDATUM_D, MU_TREINNR_N, MU_MATNR
Materiaal_park	MU_MATNR, treintype

Produceert:

Per treintype een transition graph en een maximum flow graph.

Bepaal subgroepen

Gebruik:

determine_subnets treintype path percentage isolationnorm

treintype: Het treintype waarvoor de subnets bepaald moeten worden, -1 voor alle treintypen

path: Path waar de flowgraphs zijn te vinden

percentage: Percentage van dagen dat een treintype op een traject moet rijden voordat dat traject relevant is

isolationnorm: Percentage waaronder trajecten zijn ontkoppeld

Benodigde data:

Tabel	Velden
Treinenindienstregeling	MAT_SRT, MAT_AANDUIDING, treintype,
dienstregeling	TA_VERKEERSDATUM_D, TA_TREINNR_N, TA_DRGLPT, TA_UTVTIJD_DT
Mat_route	MU_VERKEERSDATUM_D,

	MU_TREINNR_N, MU_MATNR
Materiaal_park	MU_MATNR, treintype
matnrsubgroup	ttg, treintype

Transition en maximum flow graphs zoals uit het programma graph_maxflow komen

Produceert:

set drglpt, treintype, subgroup, ttg in subnetworks

Zet ttg in matnrsubgroup

Bepaal treinstellen per subgroup

Gebruik:

numberoftrainsinsubgroup treintype path percentage method methodtosave

treintype: Het treintype waarvoor de verdeling bepaald moeten worden, -1 voor alle treintypen

path: Path waar de resultaten worden opgeslagen

percentage: zie method (alleen gebruikt bij methode 1 en 2)

method: Er zijn 3 verschillende methoden:

1: Tenminste ..% van de treinen moet op een dag op een traject gebruikt zijn om een traject mee te laten tellen

2: De top ..% van de dagen waarop het meeste aantal verschillende treinstellen zijn gebruikt tellen mee

3: Elk treinstel wordt ingezet op het traject waar hij het meest gebruikt is

methodtosave: Wanneer gekozen is voor methode 1 of 2, dan kan de hoeveelheid treinen nog op verschillende manieren bepaald worden:

opties:

min#t: Minimaal aantal verschillende treinen per traject

max#t: Maximaal aantal verschillende treinen per traject

mod#t: Modaal aantal treinen per traject

+dist: mod#t waarbij de treinstellen die niet gebruikt worden of die teveel zijn ingepland worden verrekend met de subgroup waar het meeste aantal treinstellen inzit

Benodigde data:

Tabel	Velden
Treinenindienstregeling	MAT_SRT, MAT_AANDUIDING, treintype,
subnetworks	subgroup, drglpt, treintype
Materiaal_park	MU_MATNR, treintype
dienstregeling	TA_VERKEERSDATUM_D,

	TA_TREINNR_N, TA_DRGLPT, TA_UITVTIJD_DT
Mat_route	MU_VERKEERSDATUM_D, MU_TREINNR_N, MU_MATNR
matnrsubgroup	matnr, ttg

Transition en maximum flow graphs zoals uit het programma graph_maxflow komen

Produceert:

zet nroftains in subnetworks

zet ttg in matnrsubgroups

Bepaal toewijzing WRC systemen over treinen met behulp van transitie matrices

Gebruik:

markovsubgroups dir ttginfo x max%statex interesting tabu-list v0 alpha_v Lv p0 alpha_p Lp stopcrit

dir: directory to save iterations

ttginfo: filename with following matrix: [#trains minequipped maxequipped currentequipped], of gebruik 'db' om gegevens uit database in te lezen. Deze matrix wordt dan opgeslagen en kan vervolgens bewerkt worden voor een volgende run.

x: Aantal toestanden van het system. Met andere woorden, na hoeveel treinen moet er weer geconditioneerd worden

max%statex: Fractie van de tijd die doorgebracht mag worden in de laatste toestand, met andere woorden de fractie van het aantal treinen dat over ongeconditioneerd spoor mag rijden

interesting: welk gedeelte van de dienstregeling moet meegenomen worden, hiervoor zijn drie opties:

0: db, gebruik die data die in de dienstregeling aan is gegeven als interesting

1: all, zet alle data in de dienstregeling op interesting

2: subset, zet in de database een voorgedefinieerde subset van de data op interesting

tabu-list: Lengte van de tabulist, 0 is geen tabu

v0: Begin stapgrootte

alpha_v: Factor waarmee de stapgrootte vermenigvuldigd wordt

Lv: Aantal iteraties voordat de stapgrootte vermenigvuldigd wordt

p0: Begin kans om oplossingen met meer treinen wel aan te nemen

alpha_p: Factor waarmee de kans vermenigvuldigd wordt

Lp: Aantal iteraties voordat de kans vermenigvuldigd wordt

stopcrit: Stop het algoritme als er ... iteraties geen buur gekozen is

Benodigde data:

Tabel	Velden
subnetworks	drglpt, subgroup, treintype, ttg, nroftrains
subgroups	id, equippedtrains, nroftrains, treintype, subgroup, ttg
dienstregsubgroups	id, TA_DRGLPT, interesting, TA_UITVTIJD_DT
dienstregeling	TA_UITVTIJD_DT, interesting

Transition en maximum flow graphs zoals uit het programma graph_maxflow komen

Produceert:

treintype, subgroup, ttg in subgroups

(interesting in dienstregeling)

bestanden met daarin van elke iteratie de omgeving, de geldigheid van deze omgeving, het aantal states, de norm, de huidige v, de huidige p, de best gevonde waarde, de gekozen oplossing en de waarde van deze oplossing.

Bestand met daarin het verloop van het proces in de volgende kolommen:

[Iteration, Value, Valid-worse, Diff]

Resultaat vanuit transitie matrices verwerken

Gebruik:

processsolution #,#,#,...,#

#,#,#,...,#, van elke ttg de hoeveelheid uitgeruste treinen

Benodigde data:

Tabel	Velden
subgroups	ttg, id
subnetworks	ttg, equippedtrains

Produceert:

Zet in subnetworks equippedtrains