



Eindrapportage ATO verkenning Groningen

ProRail

Verbindt. Verbetert. Verduurzaamt.

Colofon

Deze verkenning is mede tot stand gekomen in samenwerking met onze partners:



STADLER



Aan dit rapport hebben meegewerkt:

Vanuit ProRail

Rik van den Band (Projectmanagement)
Siebe Hoekstra (Testmanagement)
Wilco Tielman (Prestatie Analyse Bureau)
Rosa Sterkenburg (Prestatie Analyse Bureau)
Vincent Weeda (Prestatie Analyse Bureau)
Julia Burggraaf (Human Factors)
Douwe de Vries (Dienstregelingsimulaties)
Dick Middelkoop (Dienstregelingsimulaties)
Johanna Knijff (Review)
Allard Katstra (Review)
Tijl Hesselmann (Review)

Vanuit TNO

Charlotte Smit (Projectleider)
Rik Poulus (Business development)
Anja Langeveld (Onderzoek)
Suzanne Nooij (Onderzoek)
Jan Souman (Onderzoek)
Ivo Stuldreher (Onderzoek)
Tanja Vonk (Onderzoek)
Remco Wijn (Review)

Redactie: Marianne Meijerink, hetschrijfbureau.com

Fotograaf: Stefan Verkerk

Documentgegevens	
Eigenaar	Rik van den Band
Kenmerk	P20160080-1501226187-2810
Versie	1.0
Datum	09-09-2020
Onderwerp	Eindrapport ATO Proefritten Groningen
Status van het document	Definitief

Voorwoord

Het spoor heeft de toekomst. We verwachten dat het reizigers- en goederenvervoer binnen enkele decennia fors zal stijgen. ProRail werkt daarom continu aan vernieuwingen om flexibel op een veranderende vraag te kunnen inspelen en de groei te kunnen opvangen. Bovendien wil ProRail dat iedereen straks nog efficiënter, comfortabeler en gemakkelijker kan reizen.

Automatic Train Operation, ATO, is een voorbeeld van een veelbelovende nieuwe technologie. Het is een vorm van automatische treinbesturing die voordelen kan opleveren op het gebied van punctualiteit, capaciteitsvergroting en energiebesparing. Sinds enige tijd voeren we testen uit met dit systeem. De eerste test vond plaats in december 2018 op de Betuweroute, met een vrachtlocomotief.

Met dit rapport rondt ProRail een tweede verkenning af, die we uitvoerden op het traject Groningen-Buitenpost. Hier werd ATO voor het eerst in Nederland getest met een passagierstrein. Deze verkenning heeft ons niet alleen veel nieuwe inzichten opgeleverd over de potentie van het systeem, maar we hebben ook een eerste indruk kunnen vormen van de betekenis van geautomatiseerd rijden voor zowel machinist als passagier.

Ook deze test werd weer uitgevoerd in samenwerking met diverse partners (Provincie Groningen, Arriva en Stadler). Wij innoveren door mensen en ideeën samen te brengen: marktpartijen en overheden, kennisinstituten en multinationals, gevestigde onderzoeksinstituten en startups. Omdat we geloven dat we samen betere resultaten halen door van elkaar te leren, elkaar te stimuleren, te inspireren en uit te dagen.

Zo werken we met elkaar aan optimale mobiliteit binnen een gezonde en leefbare toekomst.

Karel van Gils
Directeur Innovatie en Technologische Vernieuwing

Leeswijzer

Dit eindrapport is een bundeling van de deelrapporten van de verschillende onderdelen van de verkenning. Deze deelrapporten zijn opgenomen als hoofdstuk 2 t/m 5. De deelrapporten zijn afzonderlijk te lezen en worden afgesloten met eigen conclusies en aanbevelingen. Hoofdstuk 6 bevat het beeldverslag van de reizigersritten en het PR- en media-evenement. Een bundeling van alle conclusies en aanbevelingen zijn te lezen in hoofdstuk 7.

INHOUD

VOORWOORD	3
LEESWIJZER	4
MANAGEMENTSAMENVATTING	8
WAT IS ATO?	8
OPZET VAN DE VERKENNING	8
RESULTATEN	9
1 ACHTERGROND, DOEL EN OPZET VAN DE VERKENNING	10
1.1 AANLEIDING	10
1.2 WAT IS ATO	10
1.3 FASERING VAN DE VERKENNING	12
1.3.1 Fase 1 Live: voorjaar 2019	12
1.3.2 Fase 2 Live: najaar 2019	12
1.3.3 Human Factors onderzoek	12
1.3.4 Reizigersonderzoek: voorjaar 2020	12
1.3.5 Dienstregelingsimulaties	12
2 VERSLAG EN RESULTATEN VAN DE LIVE TESTRITTEN	13
2.1 INLEIDING	13
2.2 FASERING	13
2.3 BESTEK VAN DIT HOOFDSTUK	13
2.4 BETROKKEN PARTIJEN	13
2.5 ONDERZOEKSMETHODE	16
2.5.1 Onderzoeksvragen	16
2.5.2 Gegevensbronnen	18
2.5.3 Beschrijving van de belangrijkste variabelen	18
2.6 RESULTATEN FUNDAMENTELE TREINBESTURING	21
2.7 ANDERE MINIMUMVEREISTEN	26
2.8 VOORDELEN	30
2.9 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	35
2.9.1 Conclusies	35
2.9.2 Aanbevelingen	35
3 HUMAN FACTORS ONDERZOEK	37
3.1 WAT IS HUMAN FACTORS ONDERZOEK?	37
3.2 WAT ZIJN DE DRIE ELEMENTEN VAN HUMAN FACTORS MET BETREKKING TOT ATO EN WAT ZIJN RISICO'S?	37
3.3 HUMAN FACTORS ONDERZOEK TIJDENS FASE 1	38
3.3.1 Opzet	38
3.3.2 Resultaten	38
3.4 HUMAN FACTORS ONDERZOEK TIJDENS FASE 2	39
3.4.1 Doelstellingen Fase 2	39
3.4.2 Uitgangspunten	39
3.4.3 Methode	39
3.5 RESULTATEN HF-ONDERZOEK	40
3.5.1 ATO-rijstijl	40
3.5.2 DMI-informatie	41
3.5.3 Adviezen en kanttekeningen voor vervolgprouwen	42
3.6 VERVOLGONDERZOEK	42

4	DIENSTREGELINGSIMULATIES	44
4.1	INLEIDING.....	44
4.2	ONDERZOEKSVRAAG EN AFBAKENING.....	44
4.2.1	Toelichting punctualiteit.....	45
4.2.2	Toelichting capaciteit.....	45
4.2.3	Toelichting veiligheid	45
4.3	OPZET SIMULATIES	46
4.3.1	Simulatiesoftware FRISO.....	46
4.3.2	Rijmodellen	46
4.3.3	Geografie	48
4.3.4	Infrastructuur.....	48
4.3.5	Dienstregeling.....	49
4.3.6	Rijweginstelling	49
4.3.7	Gebruikte realisatiedata	49
4.3.8	Verstoringen	50
4.3.9	Inschatting validiteit simulaties	50
4.4	RESULTATEN SIMULATIES.....	50
4.4.1	Vergelijking aankomstvertragingen	51
4.4.2	Vergelijking punctualiteit.....	58
4.4.3	Vergelijking planafwijking	59
4.4.4	Vergelijking ongeplande stops.....	60
4.4.5	Toepasbaarheid simulatie.....	61
4.5	CONCLUSIES	62
4.5.1	Validiteit simulaties	62
4.5.2	Effecten van varianten.....	62
4.5.3	Conclusies	62
4.6	AANBEVELINGEN	63
4.7	MOGELIJK VERVOLGONDERZOEK	63
5	REIZIGERSONDERZOEK	64
5.1	INLEIDING.....	64
5.2	DOEL EN OPBOUW VAN HET ONDERZOEK	64
5.2.1	Literatuurscan	64
5.2.2	De reizigerservaring	64
5.2.3	G-krachtenmetingen	65
5.3	LITERATUURSCAN.....	65
5.3.1	Introductie	65
5.3.2	Methode	66
5.3.3	Resultaten.....	66
5.3.4	Conclusies naar aanleiding van het literatuuronderzoek	68
5.4	REIZIGERSONDERZOEK	69
5.4.1	De testritten.....	69
5.4.2	De deelnemers.....	70
5.4.3	De reizigersenquête	70
5.4.4	Beschrijving van de data	70
5.4.5	De verwachtingen vooraf.....	72
5.4.6	Ervaringen tijdens de testritten	73
5.4.7	Vragen na de ritten	77
5.4.8	Conclusies naar aanleiding van het reizigersonderzoek	79
5.5	G-KRACHTENONDERZOEK	80
5.5.1	Methode	80
5.5.2	De meetresultaten	81

5.5.3	Vergelijking ATO en niet-ATO in versnellingen	82
5.5.4	De maximale en minimale versnelling per rit	83
5.5.5	Conclusies naar aanleiding van het G-krachtenonderzoek.....	84
5.6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	84
5.6.1	Conclusies	84
5.6.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	84
6	BEELDVERSLAG REIZIGERSRITTEN EN MEDIA-EVENEMENT.....	86
6.1	MEDIA-EVENEMENT	86
6.2	REIZIGERSRITTEN	87
7	OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	90
7.1	CONCLUSIES	90
7.2	AANBEVELINGEN	90
8	BIJLAGEN.....	92
8.1	BIJLAGE BIJ HOOFDSTUK 2: LIVE TESTRITTEN.....	92
8.2	BIJLAGEN BIJ HOOFDSTUK 4: DIENSTREGELINGSIMULATIES	94
8.2.1	Vergelijking simulatie met realisatiedata	94
8.2.2	Gebruikte softwareversies en verbeteringen t.o.v. TOL-studies 2017	95
8.3	BIJLAGEN BIJ HOOFDSTUK 5: REIZIGERSONDERZOEK	96
8.3.1	Reizigersenquête	96
8.3.2	Reizigerservaring per rit.....	102
8.3.3	Bewegingsdata per rit.....	104
8.3.4	Geraadpleegde literatuur	106

Managementsamenvatting

Wat is ATO?

ATO is een technologie die geautomatiseerd rijden op het spoor mogelijk maakt. Het geteste ATO-systeem ondersteunt de machinist en neemt taken over. In een ATO-systeem kunnen de handelingen die de machinist uitvoert, afhankelijk van het niveau van automatisering, voor een deel of volledig geautomatiseerd worden. In deze verkenning is het tweede niveau van automatisering getest. Dat houdt in dat het systeem de remmen en de tractie aanstuurt. De machinist en conducteur blijven de overige taken uitvoeren. Dit niveau van automatisering is vergelijkbaar met de automatische piloot in een vliegtuig.

Een ATO-systeem bestaat uit een on-board en eventueel een track-side unit. De ATO-OnBoard zit in de trein geïntegreerd en haalt data uit de boordcomputer en/of ETCS-OnBoard (zoals locatie, snelheid, rijtoestemming). Aan de hand van deze data kan de ATO-OnBoard de ideale snelheid, rem- en acceleratiecurve berekenen en tractie- en remcommando's versturen.

ATO heeft de potentie om de spoorcapaciteit efficiënter te benutten. Door nauwkeuriger te rijden wordt de spreiding in de uitvoering van de treindienst verminderd. Hierdoor ontstaat er meer ruimte op het spoor waardoor treinen dichters op elkaar kunnen rijden met een hogere punctualiteit. Lokale knelpunten kunnen worden opgelost en het spoor kan hierdoor meer treinen tegelijk aan. Ook kan met ATO energie bespaard worden omdat het mogelijk is om optrekken, snelheid en remmen optimaal in te stellen. Daarnaast biedt ATO kansen om de betrouwbaarheid en de veiligheid van het vervoer per spoor verder te verbeteren.

Opzet van de verkenning

Deze ATO-tests zijn uitgevoerd door ProRail als opdrachtgever in samenwerking met medeopdrachtgever provincie Groningen. Arriva was betrokken als projectpartner en vervoerder en de firma Stadler was aangesloten als technische partner en ATO-leverancier.

De verkenning bestond uit een vijftal onderdelen:

Live testritten: testritten met het ATO-systeem op het traject Groningen-Buitenpost, waarbij antwoord is gezocht op een groot aantal vragen rondom het technisch functioneren en de potentiële baten van ATO. Deze proeven werden voorafgegaan door statische en rijdende tests met de basisfuncties van het systeem.

Human Factors onderzoek: verkenning van ergonomische aspecten van het systeem in samenwerking met de testmachinisten.

Dienstregelings simulaties: virtueel onderzoek naar het functioneren van ATO binnen een gesimuleerde dienstregeling en de mogelijke winst in termen van punctualiteit.

Reizigersonderzoek: enquêtes en G-krachtenmeting tijdens aparte reizigersproefritten met ATO; dit onderzoek werd voorafgegaan door een literatuurverkenning naar bestaande studies naar reizigerservaringen met ATO-systemen.

PR- en media-evenement: presentatie van ATO tijdens een rit voor pers en een aantal speciale gasten uit overheid, vervoer en politiek.

Dit eindrapport is een bundeling van een aantal deelrapporten. Deze deelrapport kunnen afzonderlijk worden gelezen.

Resultaten

Deze, voor Nederland unieke eerste verkenning van het rijden met een door ATO bestuurd passagierstrein heeft een schat aan belangwekkende informatie opgeleverd. Voor een systeem dat nog volop in ontwikkeling is mag dit worden beschouwd als een indrukwekkend resultaat. De belangrijkste bevindingen staan hieronder kort samengevat. Gedetailleerde conclusies en aanbevelingen per onderdeel zijn in de afzonderlijke hoofdstukken te vinden.

Live testritten

Het onderzoek heeft een aantal positieve resultaten opgeleverd met betrekking tot het technisch functioneren van het systeem. Zo bleek het met ATO goed mogelijk te zijn de tractie en rem naar behoren te bedienen, rittoestemmingen te verwerken en op te volgen, precies te halteren en routewijzigingen te verwerken. Daarnaast konden tijdens de proef noodzakelijke kwaliteitsverbeteringen aan het ATO-systeem worden opgespoord en aangebracht. Er is op dit moment nog geen duidelijk zicht op de rijtijdwinst die het rijden met ATO kan opleveren. Bij vervolgonderzoek wordt nader ingaan op de impact naar energieverbruik en het rijden volgens dienstregeling.

Human Factors onderzoek

Het onderzoek heeft veel inzicht gegeven op de interactie tussen ATO en machinist, met name wat betreft acceleratie, remmen en haltering. Gaandeweg zijn verbeteringen doorgevoerd omdat de acceleratie en het remmen als te krachtig werd ervaren. Ook zat de ATO-remcurve soms te dicht op de ATB-remcurve en dreigde een ingreep door het beveiligingssysteem. Tevens is duidelijk geworden welke informatie essentieel is om te tonen op de DMI en welke informatie weggelaten kan worden.

Dienstregelsimulaties

Vergelijking van virtuele ATO-ritten met modellen van reële rijgegevens uit 2018 laten winst zien in termen van punctualiteit. De punctualiteitswinst zou vertaald kunnen worden naar capaciteitswinst. Dit vraagt om nader onderzoek naar de capaciteitsbehoefte en de toekomstige planningen. Met name de punctualiteit op -30 tot +30 seconden verbeterde met ATO, zowel in de spits als in het dal. Ook waren er met ATO minder planafwijkingen en ongeplande stops.

Reizigersonderzoek

Er was grote interesse bij reizigers om deel te mogen nemen aan de allereerste reizigersritten met ATO. De ritten waren binnen 24 uur na aankondiging volgeboekt. Reizigers (die niet wisten of het ATO-systeem al dan niet geactiveerd was) zijn in beide gevallen overwegend positief over de rit. Wel scoren de reguliere ritten weliswaar licht, maar wel significant hoger in termen van rapportcijfer. Het G-krachtenonderzoek toont schokkeriger rijgedrag aan met ATO. Mogelijk heeft dit de beleving beïnvloed.

PR- en media-evenement

Er was grote belangstelling bij gasten en pers voor dit evenement. Projectmedewerkers van ATO waren in de trein aanwezig om toelichting te geven en vragen te beantwoorden. Hoofdstuk 6 bevat een beeldverslag.

Alle onderdelen van de verkenning hebben aanbevelingen opgeleverd voor verder onderzoek.

1 Achtergrond, doel en opzet van de verkenning

1.1 Aanleiding

De komende jaren wordt een forse groei verwacht in de mobiliteitsbehoefte op het Nederlandse spoorwegnet. De spoorcapaciteit staat hierdoor onder druk en daarmee de kwaliteit van het railvervoerssysteem. Dat geldt overigens niet alleen voor Nederland, maar ook voor andere landen in Europa.

Nederland loopt voorop op het gebied van automatisch rijden op de weg en wil daarvoor het testland zijn. Vanuit technisch oogpunt is juist ook het spoor uitermate geschikt voor automatisch rijden. Daarom willen we werken aan dit concurrentievoordeel ten opzichte van de weg. Internationaal opererende leveranciers geven ook aan dat Nederland een goed testland is door de mate van georganiseerdheid op het Nederlandse spoor en de hoge frequentie van treinen.

Er zijn diverse innovatieve ontwikkelingen die ervoor kunnen zorgen dat het spoor een aantrekkelijke vervoersmodaliteit is en blijft. Eén van deze nieuwe ontwikkelingen is het geautomatiseerd rijden van treinen, ook wel Automatic Train Operation (ATO) genoemd. Hiermee wordt het niet alleen mogelijk om de capaciteit van het railvervoerssysteem te vergroten, maar ook de betrouwbaarheid en de veiligheid ervan verder te verbeteren. Daarnaast kan het ook efficiënter rijden en energiebesparing opleveren.

De benodigde ATO-technologie en -systemen worden onderzocht en ontwikkeld door een internationaal opererende industrie. ProRail wil samen met vervoerders en partners leren over de potentie die deze ontwikkeling te bieden heeft. De invulling die ProRail daaraan kan geven ligt met name op het gebied van het faciliteren van testen om zo meer te leren van het systeem. Ook in het buitenland wordt ATO gezien als belangrijke gamechanger voor de spoorsector. Daar wordt met verschillende niveaus van automatisering al testervaring opgedaan. Noord-Nederland profileert zich als regio op het gebied van autonoom vervoer. Om die reden heeft de Provincie Groningen samen met ProRail het initiatief genomen om onderzoek te doen naar ATO op het spoor in Groningen.

Het doel van deze verkenning is:

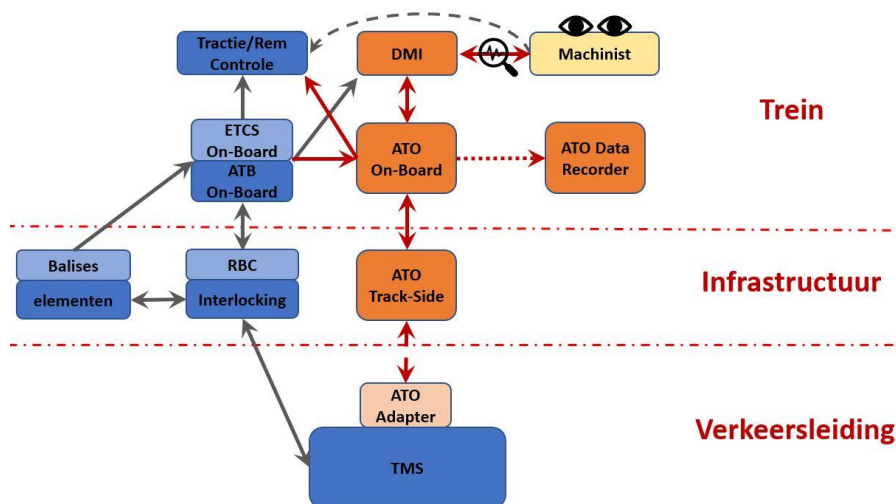
- Aantonen dat het automatisch rijden op GoA2 van treinen mogelijk is op het Nederlandse spoor op de huidige infrastructuur.
- De potentiële effecten van ATO middels proefritten en simulaties aantonen voor punctualiteit, capaciteit, duurzaamheid, veiligheid en Human Factors (machinist, treindienstleiders en reizigers)

Voorafgaand aan deze verkenning zijn in vergelijkbare proeven uitgevoerd met een locomotief op de Betuweroute.¹ De verkenning ATO-Groningen is een volgende stap in deze ontwikkeling.

1.2 Wat is ATO

Automatic Train Operation (ATO) is een ruim begrip. In de praktijk wordt onderscheid gemaakt naar de verschillende stappen in het automatiseren van de operationele taken van het rijdend personeel. Kortweg komt het erop neer dat de trein/het systeem de machinist (en conducteur) verder ondersteunt of taken volledig overneemt. Geautomatiseerd rijden kan zowel zonder als met het ERTMS-beveiligingssysteem, maar de specificaties die binnen de EU worden ontwikkeld zijn op ERTMS gericht.

¹ ATO-verkenning Betuweroute Eindrapportage, 21-07-2020



Figuur 1.1: Schematische weergave van een ATO-systeem

Een ATO-systeem bestaat uit een on-board en eventueel een track-side unit. De ATO-OnBoard zit in de trein geïntegreerd en haalt data uit de boordcomputer en/of ETCS-OnBoard (zoals locatie, snelheid, rijtoestemming). Aan de hand van deze data kan de ATO-OnBoard de ideale snelheid, rem- en acceleratiecurve berekenen en kan het tractie- en remcommando's versturen. Ook als ATO actief is, blijven de treinbeveiligingssystemen (ATB, ERTMS) altijd leidend.

Om in te kunnen spelen op ander treinverkeer heeft de ATO-OnBoard data nodig vanuit de ATO-TrackSide of rechtstreeks vanuit het TMS (Traffic Management Systeem), zoals routeinformatie, vertragingen, dienstregelpunten en ander treinverkeer. In Europees verband wordt er gewerkt aan een Europese standaard om interoperabiliteit te garanderen. Er is echter nog geen definitieve standaard beschikbaar hoe een ATO-systeem er exact uit zal zien, dus mogelijk zal dit nog wijzigen ten opzichte van de huidige stand. Tijdens de ATO-proef die in het kader van deze verkenning is uitgevoerd werd er geen verbinding gemaakt met de ProRail-systemen.

De mate van automatisering van het rijden van treinen wordt uitgedrukt in Grades of Automation (GoA) volgens de standaard IEC 62290-1 (zie ook figuur 1.2):

- GoA1 – huidige situatie: machinist rijdt en is verantwoordelijk voor het veilig rijden van de trein maar wordt wel ondersteund door beveiligings- en adviessystemen
- **GOA2 – automatisch rijdt de trein volgens dienstregeling van A naar B, maar de machinist is nog steeds verantwoordelijk voor het veilig rijden van de trein.**
- GOA3 – automatisch rijdt volgens dienstregeling van A naar B, de machinist is niet meer verantwoordelijk voor het veilig rijden van de trein en hoeft niet in de cabine aanwezig te zijn, maar kan wel overige zaken regelen (bijv. deuren sluiten) en in noodsituaties ingrijpen.
- GOA4 – er is geen machinist meer op de trein aanwezig, alle functies zijn door automaten overgenomen; bij noodsituaties moet vanaf de wal worden ingegrepen.

De ATO-verkenning Groningen is uitgevoerd onder niveau GOA2.

Grade of automation	Type of train operation	Setting train in motion	Stopping train	Door closure	Operation in event of disruption
GoA 1 	ATP with driver	Driver	Driver	Driver	Driver
GoA 2 	ATP and ATO with driver	Automatic	Automatic	Driver	Driver
GoA 3 	Driverless	Automatic	Automatic	Train attendant	Train attendant
GoA 4 	UTO	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic

ATP – Automatic Train Protection ATO – Automatic Train Operation

Figuur 1.2: Schema Grades of Automation

1.3 Fasering van de verkenning

1.3.1 Fase 1 Live: voorjaar 2019

Fase 1 omvatte het testen van de basisfuncties van het ATO-systeem, door middel van statische tests in de werkplaats en testritten tussen Groningen en Zuidhorn. Daarbij is het in- en uitbouwen van het systeem geoefend, zijn de basisfuncties van ATO getest en zo nodig aangepast, zoals accelereren en remmen, en het rijden zelf. Ook is een eerste verkenning gedaan van de Human Factors elementen.

1.3.2 Fase 2 Live: najaar 2019

Tijdens fase 2 zijn daadwerkelijk proefritten uitgevoerd op het traject Groningen - Buitenpost, gedurende meerdere testperiodes. Tijdens deze fase zijn complexe functies van ATO toegevoegd, zoals precies stoppen en het rijden over verschillende routes. Ook zijn er metingen verricht om de effectiviteit van ATO te kwantificeren.

1.3.3 Human Factors onderzoek

Tijdens fase 2 is het Human Factors onderzoek uitgevoerd, in de vorm van vragenlijsten en het houden van evaluatiegesprekken met de deelnemende machinisten over hun ervaringen met het systeem.

1.3.4 Reizigersonderzoek: voorjaar 2020

Tijdens een viertal avonden konden reizigers proefritten maken met al dan niet door ATO-bestuurde treinen, waarbij zij zijn bevraagd naar hun ervaringen, om zo eventuele verschillen aan te tonen. Ook werden tijden die ritten de G-krachten gemeten. In deze periode vond ook het PR- en media-evenement plaats.

1.3.5 Dienstregelings simulaties

Tijdens deze verkenning is een simulatiestudie uitgevoerd naar de effecten van ATO op de lijnen rond Groningen bij de infra en dienstregeling van 2023. Onderzocht is in welke mate er beter volgens plan gereden wordt als alle treinen geautomatiseerd rijden volgens GoA2. Tevens is onderzocht welke effecten dit heeft vooral gericht op punctualiteit. Dit is gedaan door de resultaten te vergelijken met een model van het gedrag van machinisten in dit studiegebied in 2018.

2 Verslag en resultaten van de live testritten

2.1 Inleiding

Het ATO-testprogramma is uitgevoerd met een personentrein (DMU GTW2/8) op de lijn tussen Groningen en Buitenpost. De trein was uitgerust met het ATB-NG-treinbeveiligingssysteem.

2.2 Fasering

De tests in Groningen verliepen in afzonderlijke fases. In fase 1 werden de eerste testritten met een ATO-systeem uitgevoerd. Er werd gebruik gemaakt van een basis-ATO-systeem zonder verbinding met het treinbeveiligingssysteem. Het ATO-systeem is eerst getest in de werkplaats en hierna op de lijn Groningen - Zuidhorn. Dit gebied werd afgesloten voor ander treinverkeer en alle seinen werden op groen gezet. ATO reed op basis van een snelheidsprofiel in plaats van een dienstregeling. Deze tests waren grotendeels succesvol.

Dit hoofdstuk gaat in op fase 2 van de verkenning: de live testritten, waarin de effectiviteit van ATO op verschillende wijzen is gemeten. Deze fase heeft plaatsgevonden tussen Buitenpost en Hoogkerk-Vierverlaten (zie figuur; Hoogkerk-Vierverlaten wordt hier Vierverlaten genoemd omwille de leesbaarheid van de tekst, in lijn met de afkorting Vvl). In deze fase was ATO wel verbonden met het treinbeveiligingssysteem. De testritten werden deels tussen de normale dienstregeling door uitgevoerd.



Figuur 2.1: Spoorlayout van de testlijn (© Sporenplan online, 2019)

2.3 Bestek van dit hoofdstuk

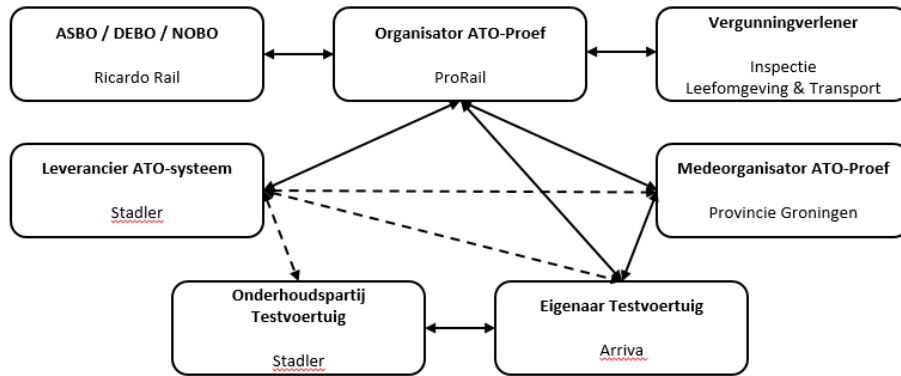
Het bestek van dit hoofdstuk omvat de analyse van de praktijktesten die plaatsvonden in de herfst van 2019: deze periode kende grotendeels succesvolle ritten waarover gegevens beschikbaar zijn. Het bestek omvat drie weken:

- Week 45 (alleen 5 november)
- Week 47 (3 bruikbare testnachten)
- Week 51 (2 bruikbare testnachten)

De analyse is gericht op de rijstijl van ATO: rittijden, stopprecisie en naleving van seininformatie.

2.4 Betrokken partijen

Op hoofdlijnen kende het project tijdens de live tests de onderstaande structuur. De ononderbroken lijnen zijn hierbij de formele communicatieroutes, de onderbroken lijnen zijn informeel maar zijn noodzakelijk zijn voor de voortgang van het project.



Figuur 2.2: Betrokken partijen live tests

ProRail

ProRail is de spoorinfrastructuurbeheerder van Nederland. ProRail is verantwoordelijk voor het gehele spoorwegnet van aanleg tot onderhoud, beheer en veiligheid. ProRail loopt aan tegen de grenzen van de capaciteit van het railnet. Daarom zijn innovatieve oplossingen noodzakelijk om het spoor beter te kunnen benutten en meer treinpaden aan te leveren. Automatic Train Operation is een van die innovaties.

Rol in het project:

Vanuit het oogpunt van het testen van innovatieve oplossingen voor de spoorcapaciteit was ProRail voor deze test de initiatiefnemer en medeopdrachtgever.

ProRail Verkeersleiding begeleidde de test vanuit de Verkeersleidingspost Groningen. ProRail Asset Management was betrokken als 'leverancier' van het testspoor.

ProRail Capaciteitsverdeling verleende toestemming voor het gebruik van de treinpaden.

ProRail Veiligheid gaf (onder andere) advies over de te volgen veiligheidsprocedures.

ProRail Incidentenbestrijding stond met de reguliere calamiteitenorganisatie altijd paraat voor eventuele incidenten op het spoor. Er waren voor deze proef geen aanvullende afspraken over de inzet van Incidentenbestrijding nodig.

Het projectteam van ProRail volgde de test met de ATO-trein vanuit een tijdelijk coördinatiecentrum.

Provincie Groningen

De Provincie is als regionaal bestuurder verantwoordelijk voor onder andere ruimtelijke ordening en openbaar vervoer in de Provincie Groningen. De Provincie is toezichthouder op gemeenten en waterschap. De Provincie Groningen heeft de ambitie om de meest innovatieve provincie te worden op gebied van slimme en duurzame mobiliteit en profileert zich in het bijzonder als vooruitloper op gebied van autonome mobiliteit. Met deze proeven wil de Provincie onderzoeken hoe een automatisch bestuurd trein kan bijdragen aan het vergroten van de mobiliteit, efficiëntie, duurzaam en comfortabel reizen.

Rol in het project:

De Provincie Groningen was mede-opdrachtgever en partner in het project.

Arriva

Arriva Personenvervoer Nederland (kortweg: Arriva) is een Nederlandse vervoersmaatschappij, met haar hoofdvesting in Heerenveen. Zij is een dochteronderneming van Arriva plc die voor 100% eigendom is van Deutsche Bahn. Arriva Nederland verzorgt stads- en streekvervoer per bus in verschillende regio's in het land en exploiteert een aantal regionale treinverbindingen zoals in de Provincie Groningen.

Rol in het project:

Arriva was betrokken als vervoerder en als partner in het project. Voor deze test stelde Arriva een trein (GTW DMU-2 2/8) beschikbaar waar de ATO-apparatuur kan worden ingebouwd en vervolgens

worden getest en leverde Arriva testmachinisten. Omdat de apparatuur in een trein van Arriva werd ingebouwd, was Arriva ook verantwoordelijk voor de inbouw en diende akkoord te gaan met de wijziging.

Stadler

Stadler is in de transportsector op diverse terreinen actief als leverancier van vervoersmiddelen zoals treinen, trams en metro's, en treinbeveiligingssystemen en ondersteunende systemen. In dit project is met name de afdeling treinbeveiliging van Stadler betrokken.

Rol in het project:

Stadler is leverancier van het te testen ATO-systeem. In deze hoedanigheid was Stadler verantwoordelijk voor de ontwikkeling, in- en uitbouw en veilige werking van het systeem tijdens de test.

Stadler (Onderhoud)

Stadler is voor onder andere het technisch onderhoud van spoorvoertuigen door Arriva aangesteld om de treinen van Arriva te onderhouden en veilig en inzetbaar te houden.

Rol in het project:

Stadler Onderhoud stelde hun werkplaats in Leeuwarden beschikbaar waar Stadler de in- en uitbouw van de ATO-apparatuur kon uitvoeren. Tijdens die bouwactiviteiten (zowel in- als uitbouw) leverde Stadler Onderhoud technische assistentie leveren en zag erop toe dat de trein veilig bleef werken.

Ricardo Rail

Ricardo Nederland B.V. is een consultancy- en engineeringorganisatie op het gebied van rollend materieel en infrastructuur. Binnen Ricardo Nederland zijn twee Business Units actief: Consultancy Rolling Stock en Consultancy Signalling & Infra.

Ricardo Certification B.V. is een aparte en totaal onafhankelijke B.V. en omvat alle werkzaamheden op het gebied van testen en certificeren. Ricardo Certification is geaccrediteerd voor het uitvoeren van een breed scala aan specialistische toetsings- en certificeringswerkzaamheden. Ricardo Certification is o.a. verantwoordelijk voor onafhankelijke veiligheidsbeoordelingen en het toetsen van treinen en spoor op internationale regelgeving.

Rol in het project:

In dit project is Ricardo Rail door ProRail ingeschakeld als NOBO/ASBO/DEBO. Ricardo Certification beoordeelt de ombouw van de locomotief en controleert conformiteit met de vigerende wetgevingen.

Inspectie Leefomgeving en Transport

De taak van de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) is ervoor te zorgen dat bedrijven, organisaties en overheidsinstanties de wet- en regelgeving over de duurzame leefomgeving, de fysieke veiligheid en de woningcorporatiesector naleven. ILT bevordert de naleving van wetten en regels via vergunningverlening, door middel van handhaving en door onderzoek te doen.

Rol in het project:

ILT is de vergunningverlenende instantie, ook voor vergunning van treinen. ILT was verantwoordelijk voor onder andere het verlenen van een ontheffing of een vergunning.

Een ontheffing wordt verleend voor het rijden met een niet-toegelaten voertuig. Door de inbouw van het ATO-systeem zou de GTW DMU-2 2/8 namelijk niet meer voldoen aan de oorspronkelijk verleende vergunning.

2.5 Onderzoeksmethode

2.5.1 Onderzoeksvragen

Er zijn voor het live onderzoek een aantal vragen opgesteld. Deze zijn in de tabel hieronder te zien. De kleuren in de rechterkolom geven aan hoe elk onderdeel wordt behandeld: groen geeft aan dat een vraag binnen het bestek van dit rapport valt. Vragen 1A.3 en 1A.5 zouden binnen het bestek moeten vallen, maar wielslip is in de beschikbare gegevens niet zichtbaar. Punten in de antwoordstatus zonder kleur worden op een andere manier behandeld of nog onderzocht.

ID	Fundamentele treinbesturing	Antwoordstatus
1A.1	Kan het ATO-systeem de tractie en rem besturen?	Analysefase 2
1A.2	Kan het ATO-systeem de tractie geleidelijk opbouwen en afbouwen?	Analysefase 2
1A.3	Kan het ATO-systeem versnellen zonder wielslip?	Moet nog verder onderzocht worden
1A.4	Kan het ATO-systeem de rem geleidelijk opbouwen en afbouwen?	Analysefase 2
1A.5	Kan het ATO-systeem remmen zonder wielslip?	Moet nog verder onderzocht worden
1A.6	Kan het ATO-systeem remmingen continue en constant uitvoeren, zonder veel variaties in remkracht of tussendoor lossen van de remmen?	Analysefase 2
1A.7	Kan het ATO-systeem een rit uitvoeren zonder onnodige snelheidsschommelingen (accelereren of afremmen)?	Analysefase 2
1A.8	Kan het ATO-systeem een rit met hellingen uitvoeren zonder onnodige snelheidsschommelingen (accelereren of afremmen)?	Analyse testbestek 1e
1A.9	Kan het ATO-systeem accelereren bij lage adhesie?	Geen onderdeel van het oorspronkelijke testbestek
1A.10	Kan het ATO-systeem bij lage adhesie snelheidsverlagingen op tijd bereiken?	Geen onderdeel van het oorspronkelijke testbestek
ID	Andere minimumvereisten	Antwoordstatus
1B.1	Kan het ATO-systeem movement authorities (rijtoestemmingen) verwerken? Met inbegrip van herzieningen/verlengingen van de movement authority?	Analyse testbestek 1c, 1d
1B.2	Kan het ATO-systeem movement authorities (rijtoestemmingen) opvolgen?	Analysefase 2
1C.1	Kan het ATO-systeem tijdelijke snelheidsbeperkingen verwerken?	Oorspronkelijk testbestek test 5
1C.2	Kan het ATO-systeem tijdelijke snelheidsbeperkingen opvolgen?	Oorspronkelijk testbestek test 5
1D.1	Kan het ATO-systeem op een vooraf bepaalde tijd op een station arriveren?	Oorspronkelijk testbestek test 1a
1D.2	Kan het ATO-systeem op een vooraf bepaalde tijd een punt passeren?	Oorspronkelijk testbestek test 1b
1D.3	Kan het ATO-systeem op een vooraf bepaalde tijd van een station vertrekken?	Oorspronkelijk testbestek test 1a
1D.4	Kan het ATO-systeem veranderingen in de dienstregeling verwerken? (tijd)	Oorspronkelijk testbestek test 3b
1D.5	Kan het ATO-systeem veranderingen in de route verwerken? (route)	Analyse testbestek 3a: week 51
1E.1	Kan het ATO-systeem binnen de vastgestelde afstandslimieten bij het perron stoppen, zelfs als dit dicht bij het EoA komt?	Analysefase 2 test 1a

1F.1	Kan het ATO-systeem de snelheid handhaven binnen de aankondigingsvensters van spoorweginstellingen?	Analyseresultaten 1D.1
1G.1	Welke door het ATO-systeem uitgevoerde taken vereisen toezicht van de machinist?	Veiligheidsbeoordeling van ATO
1G.2	Is de machinist voldoende in staat om toezicht te houden op de taken die het ATO-systeem uitvoert?	Onderzoek naar menselijke factoren machinist
1G.3	Is de machinist voldoende in staat om de taken uit te voeren die niet door het ATO-systeem worden uitgevoerd wanneer het ATO-systeem in gebruik wordt genomen?	Onderzoek naar menselijke factoren machinist
ID	Voordelen	Antwoordstatus
2A.1	Hoe nauwkeurig is het tijdvenster van het ATO-systeem bij aankomst op een vooraf bepaald tijdstip en locatie?	Oorspronkelijk testbestek test 1a
2A.2	Hoe nauwkeurig is het tijdvenster van het ATO-systeem bij vertrek op een vooraf bepaald tijdstip en locatie?	Oorspronkelijk testbestek test 1b
2A.3	Hoe nauwkeurig is het tijdvenster van het ATO-systeem bij het passeren van een dienstregelingspunt op een vooraf bepaald tijdstip en locatie?	Oorspronkelijk testbestek test 1a
2A.4	In hoeverre biedt het ATO-systeem een verbetering in nauwkeurigheid ten opzichte van handmatige besturing?	Referentiegegevens handmatige besturing
2A.5	Welke verhouding bestaat er tussen capaciteitstoename en de nauwgezette navolging van de dienstregeling?	Analyse van CM-afdeling
2A.6	Welke verhouding bestaat er tussen de toename in punctualiteit en de nauwgezette navolging van de dienstregeling?	Simulatie
2B.1	Welke tijdsbesparingen kan het ATO-systeem behalen bij acceleratie?	Analyse testbestek 11b Referentiegegevens handmatige besturing
2B.2	Welke tijdsbesparingen kan het ATO-systeem behalen bij het stoppen bij een station?	Analyse testbestek 11b Referentiegegevens handmatige besturing
2B.3	Welke verhouding bestaat er tussen snellere stops en de toename in capaciteit?	Analyse van CM-afdeling
2C.1	In hoeverre kan het ATO-systeem vertragingen in de dienstregeling oplossen?	Oorspronkelijk testbestek test 4a
2C.2	Hoe goed kan het ATO-systeem omgaan met hinder van een trein voor zich?	Oorspronkelijk testbestek test 4b
2C.3	Hoe goed kan het ATO-systeem omgaan met veranderingen in de dienstregeling?	Oorspronkelijk testbestek test 3b
2D.1	Welke verhouding bestaat er tussen het precies opvolgen van de dienstregeling en ongeplande stops bij een rood sein?	simulatie
2E.1	Wat is het verschil in energieverbruik tussen een handmatig door een machinist bestuurd trein en een door een ATO-systeem bestuurd trein?	Oorspronkelijk testbestek test 11a
2F.1	Merken passagiers of het ATO-systeem ingeschakeld is tijdens hun rit?	TNO-passagierscomfortonderzoek
2F.2	Zijn er verbeteringen in het passagierscomfort tijdens de rit?	TNO-passagierscomfortonderzoek
2F.3	Zijn er verbeteringen in het passagierscomfort tijdens een stop bij een station?	TNO-passagierscomfortonderzoek

Wat betreft 1D.1 en 1D.2: de gegevens uit week 45 wijzen op pogingen om op een specifieke tijd te passeren of aan te komen. Er is echter aangegeven dat deze pogingen niet succesvol zijn uitgevoerd. Daarmee is deze analyse t nog niet uitgevoerd.

De volgende paragrafen bevatten antwoorden op de vragen die onderdeel uitmaken van dit onderzoek. De vraagcodes hierboven worden als paragraafnummers gebruikt. Het merendeel van de onderzoeksvragen wordt voornamelijk behandeld aan de hand van de analyse van week 47, maar de resultaten zijn ook vergeleken met die van week 45 en 51. Deze weken worden genoemd waar dit van toepassing is. Bij bepaalde vragen vormt week 45 of 51 de basis.

2.5.2 Gegevensbronnen

Er waren verschillende gegevensbronnen beschikbaar voor de analyse van de tests:

- ATO-registratie. Dit vormt de voornaamste gegevensbron, met informatie over tijd, positie, ATO-Status en Rijmodus
- ATB-gegevens: toegestane snelheid en af te leggen afstand
- Segmentprofielgegevens: Hoogtegegevens met betrekking tot rijanalyses rond hellingen
- Reisprofielgegevens: Timing Points en routewijzigingen
- Energiegegevens: deze zijn niet gebruikt in de analyse.

Deze bronnen zijn in één tabel samengevoegd voor het plotten van grafieken en om verdere analyse mogelijk te maken. Deze gegevens bevatten geen proefritnummers. Deze zijn toegewezen op basis van de tijds- en bakenvolgorde.

2.5.2.1 Problemen met ATO-gegevens

Tijdens het voorbereiden van de gegevens deden zich verschillende problemen voor:

- Ontbrekende gegevens, al is er nog steeds genoeg beschikbaar voor analyse. De meeste gegevens uit de eerdere testweken zijn verloren gegaan; van week 45 is alleen de laatste nacht overgebleven. Week 47 is grotendeels compleet. Er waren gegevens beschikbaar van twee nachten in week 51, maar één bestand genaamd Dec 19 bevatte in werkelijkheid overbodige informatie over 19 november. In toekomstige tests zou gegevensverzameling wellicht extra aandacht moeten krijgen om zoveel mogelijk te profiteren van de testresultaten.
- Onsamenvhangende gegevens. Decimalen en komma's zijn niet consequent gebruikt; de posities in de kolommen veranderden; de registraties van 17 november hebben tijdsvermeldingen die verwijzen naar de dag van 13 november; de reisprofielen van week 51 zijn niet zoals in week 47 genummerd maar op een andere manier gelabeld. Automatische gegevensverzameling in een nauwgezet (bij voorkeur bestaand) gegevensformaat zou het voorbereiden van de gegevens efficiënter kunnen maken en tot meer analysemogelijkheden kunnen leiden.

2.5.2.2 Andere bronnen

- Er zijn testritgegevens (handgeschreven notities) met betrekking tot de stoppositie geraadpleegd.
- Er is beperkt gebruikgemaakt van TROTS-gegevens (sectiebezetting en seinstatus) als hulpbron bij de interpretatie van de tests. Deze gegevens zijn toegankelijk gemaakt door middel van Sherlock (platform voor gegevensaanvragen uit vele actieve bronnen) en TOON (visualisatie in dispatcher-stijl).

2.5.3 Beschrijving van de belangrijkste variabelen

De belangrijkste variabelen in de analyse vereisen een inleiding en uitleg. Voor sommige variabelen moesten keuzes gemaakt worden. Dit wordt in deze paragraaf toegelicht.

Datum

Het testprogramma is vanwege de beschikbaarheid van het spoor 's nachts uitgevoerd. Sommige van de eerste ritten zijn laat in de avond begonnen, maar de meeste tests vonden na middernacht plaats. In de gegevens verwijzen de tijds- en datumaanduiding van deze tests naar de volgende dag. Tabellen, grafieken en beschrijvingen in dit rapport verwijzen altijd naar een nacht door de datum van de dag daarvoor te noemen: 17 december is de nacht na 17 december.

Tijdsintervallen

In de gegevensbronnen worden de volgende twee tijdsintervallen gebruikt.

- 1 opname per seconde (relatieve locatie vanaf het voorgaande baken)
- 5 opnames per seconde (cumulatieve locatie)

Deze laatste optie lijkt nauwkeuriger, maar de opeenvolgende tijd-afstandstappen vormen geen reëel snelheidsprofiel. Daarnaast resulteren 5 opnames per seconde in meer gegevens dan in de analyse gebruikt kunnen worden, aangezien het gedrag van de trein niet zo snel verandert. Hierom worden gegevens met tijdsintervallen van 1 seconde gebruikt in alle verdere gegevensanalyses.

Positie-as

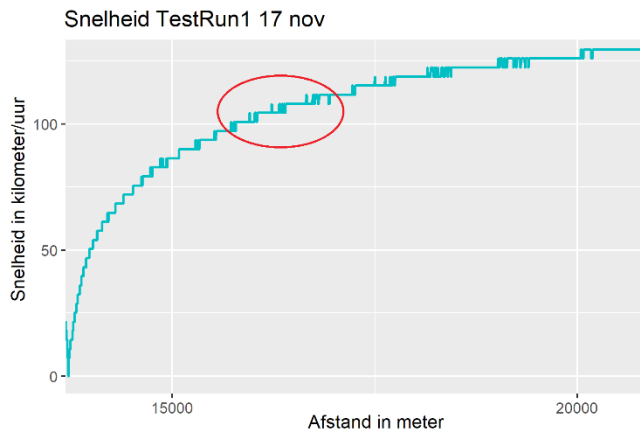
De treinpositie is berekend door middel van een kilometerteller op basis van de bakens in het spoor.

Twee metingen zijn voor de analyse relevant:

- Relatieve positie ten opzichte van het voorgaande baken. Deze informatie kan gebruikt worden om stopposities op dezelfde locatie tijdens verschillende ritten te vergelijken.
- Cumulatieve positie van een hele testrit. De brongegevens bevatten een cumulatieve positie, maar het nulpunt hing hierbij af van de startpositie. Om een bruikbare grafiek met de snelheidsprofielen van alle testritten te maken zou een vast nulpunt bepaald moeten worden. Het nulpunt is om deze reden verschoven, waardoor het eerste gepasseerde baken het nulpunt vormt.

Snelheidsmeting

De brongegevens bevatten snelheidsopnames in m/s zonder decimalen. Dit heeft twee nadelen: ten eerste is de resolutie van 3,6 km/u erg onnauwkeurig voor een analyse van het rijgedrag. Daarnaast lijkt het geregistreerde cijfer zelfs bij deze onnauwkeurige resolutie incorrect. Dit is te zien in de grafiek hieronder: in de acceleratiefase hoort elke snelheidsmeting hoger te liggen dan die ervoor. De snelheidswaarde schiet echter op en neer. Dit is met een cirkel aangegeven.



Figuur 2.3: Voorbeeld snelheidsopname in m/s zonder decimalen

Als alternatieve oplossing is de snelheid berekend aan de hand van de geregistreerde positiegegevens. Dit biedt een oplossing voor het afrondprobleem, maar de waardes vormen nog steeds geen gelijkmatig snelheidsprofiel. In opeenvolgende secondes kan de afgelegde afstand 60, 120, 60 en 120 meter zijn. Iets in de tijds- of positiemeting klopt dus niet helemaal. De gemiddelde afgelegde afstand per 10 seconden resulteert echter wel in een aannemelijk snelheidsprofiel.

De geregistreerde en berekende snelheden zijn van relatief matige kwaliteit. Er is voor de tweede optie gekozen omdat hierbij op zijn minst de bepalingsmethode bekend is. Snelheidsgegevens en grafieken in dit rapport bestaan tenzij anders vermeld uit berekende waardes.

Deze berekende waardes zijn ook gebruikt bij het berekenen van de acceleratie. Om tot een redelijk gelijkmatig profiel te komen was het nodig de acceleratie te bepalen als een gemiddelde van de

snelheidswaardes in 20 seconden. Gecombineerd met het gelijktrekken van de snelheidsopnames betekent dit dat de acceleratie bestaat uit positiegegevens van 30 seconden. De acceleratie varieert waarschijnlijk binnen die periode, waardoor de curves die hieruit voortkwamen slechts beperkte waarde hadden en geen onderdeel uitmaken van dit rapport.

Snelheidsprofielgrafieken

De analyse wordt ondersteund door het plotten van snelheidsprofielen. Deze grafieken bieden een nuttig perspectief voor het vergelijken van verschillende testritten in dezelfde richting. De berekende snelheid wordt geplot over de cumulatieve afstand, die als gemeenschappelijke waarde dient voor de verschillende ritten. De snelheidswaardes zijn gelijkgetrokken per 10 seconden en alleen de waardes waarbij AtoState = ENGAGED worden getoond.

Afhankelijk van de doelstelling kunnen de grafieken voor één of meerdere testritten geplot worden. Volledige grafieken met alle ritten in één week zijn te zien in Bijlage 8.1. Indien relevant zijn er details of grafieken van individuele treinen toegevoegd aan dit rapport.

ATO-statussen en modi

Het ATO-systeem kan de volgende statussen hebben, op volgorde van activiteit:

- NO_POWER
- ATO_CONFIGURATION
- ATO_AVAILABLE
- ATO_READY: deze status wordt gebruikt bij stops bij stations en wanneer de besturing van de trein tijdelijk handmatig wordt overgenomen.
- ATO_ENGAGED: bij deze status bestuurt het systeem de trein tijdens het rijden. De grafieken zijn alleen geplot voor delen van de rit waarbij ATO geactiveerd was.

De ATO-modi kunnen de volgende waardes hebben:

- DWELL is een passieve mode die gewoonlijk voor het begin van een rit voorkomt. Deze modus wordt nooit gebruikt terwijl de ATO op ENGAGED staat of wanneer er met ATO een stop gemaakt wordt.
- ACCELERATE
- STEADY, wordt gebruikt om de trein op constante snelheid te laten rijden.
- COASTING, alleen in week 51!² Het uitrollen zonder motor of remkracht speelt een rol in het behalen van Timing Points en energiedoelstellingen.
- DECELERATE
- DECELERATE TO STOPPING
- STOP: een geplande stop bij een station, waarbij de trein door het systeem stilgezet wordt.

Vertrek en aankomst

Vertrek- en aankomstmomenten zijn belangrijk voor het beantwoorden van onderzoeksvragen over acceleratie- en remtijdvoordelen. Deze momenten worden op de volgende manier bepaald:

Een registratie wordt als *aankomst* gemarkeerd als de volgende veranderingen plaats hebben gevonden:

- AtoState van ENGAGED naar READY
- DriveMode van DECELERATETOSTOPPING naar STOP
- Snelheid gaat van positief naar 0.

Een registratie wordt als *vertrek* gemarkeerd als de volgende veranderingen plaats hebben gevonden:

- AtoState van READY naar ENGAGED
- DriveMode van STOP naar ACCELERATE
- Snelheid gaat van 0 naar positief.

² Coasting kwam ook voor in enkele testritten in week 47, maar dit gebeurde terwijl de trein handmatig bestuurd werd (ATO niet actief) en maakt daarom geen deel uit van de analyse.

2.6 Resultaten fundamentele treinbesturing

Hieronder worden de resultaten per onderzoeksvraag weergegeven.

1A.1 Kan het ATO-systeem de tractie- en remhendels bedienen?

Ja: er zijn voldoende registraties in de gegevens waarbij de Status = ENGAGED en DriveMode = ACCELERATE of DECELERATE.

1A.2 Kan het ATO-systeem geleidelijk meer of minder tractie geven?

De matige nauwkeurigheid van de tijds- en afstandsgegevens maken het lastig om de nuances van het gebruik van de tractiehendel te analyseren. Desondanks wordt in deze paragraaf onderzocht wanneer het gelijkmatig bedienen van de tractie een probleem vormt en wat we wel uit de gegevens kunnen opmaken.

Tractie geven

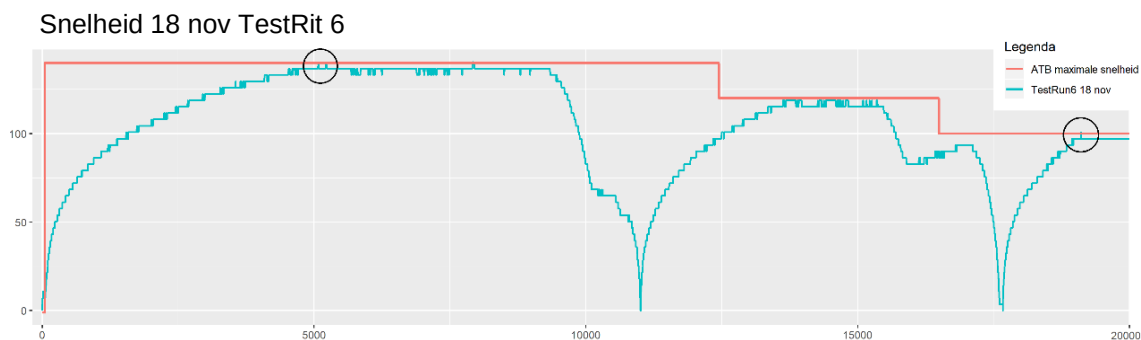
Bij het inschakelen van de tractie zorgen de reactietijden in de dieselgenerator en de tractiemotoren voor voldoende vertraging om te zorgen voor comfortabel rijgedrag. Er zijn hierbij geen grote uitdagingen voor het ATO-systeem.

Tractie minderen bij lage snelheden

Het geleidelijk loslaten van de tractie is vooral relevant bij het accelereren naar een beperkte snelheid (40 tot 60 km/u): bij een dergelijke snelheid is de tractiekracht hoog, en het abrupt loslaten van de tractie zou kunnen leiden tot ongemak of een te hoge snelheid. Dergelijke lagere initiële snelheidsbeperkingen komen in het testgebied echter niet voor³.

Tractie minderen bij hogere snelheden

Bij het bereiken van de kruissnelheid is de tractie beperkt. Hierdoor nadert de trein langzaam zijn doelsnelheid en is het geleidelijk verminderen van de snelheid geen grote uitdaging. Enkele testritten in week 47 tonen echter geringe indicaties dat de doelsnelheid wordt overschreden. De grafiek hieronder laat de gemeten snelheden zien (dit zijn redelijk onnauwkeurige metingen vanwege het afronden naar hele m/s) van 18 nov Testrit 6 na vertrek uit Buitenpost en Zuidhorn. Gezien de onnauwkeurigheid van de metingen is hier verder geen extra aandacht aan besteed.



Figuur 2.4: Voorbeeld mogelijke overschrijdingen doelsnelheid

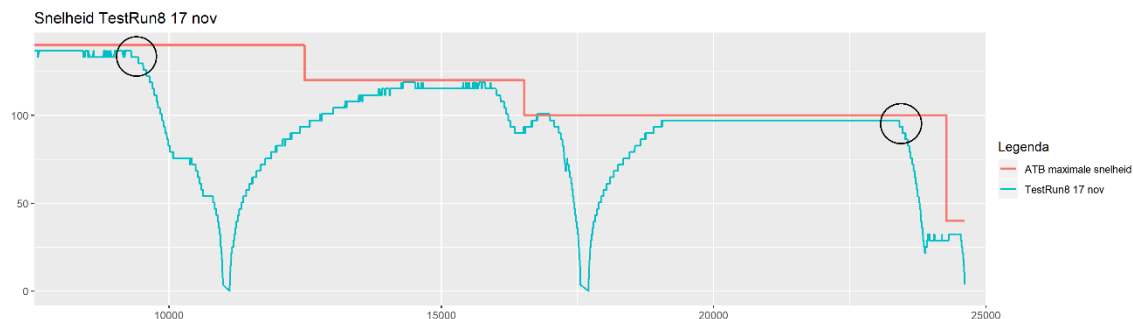
1A.4 Kan het ATO-systeem de rem geleidelijk indrukken en loslaten?

Deze analyse vereist een onderscheid tussen snelheid minderen om te stoppen en afremmen naar een hogere doelsnelheid.

³ De snelheidsbeperking van 60 km/u bij vertrek vanuit Vierverlaten geldt voor een dusdanig kleine afstand dat dit voor de acceleratie geen beperking vormt.

Snelheid minderen om te stoppen

De gemeten snelheden geven een beeld van de aanvang (zie grafiek van 17 nov Testrit 8): de snelheidsmindering vanaf 140 km/u links lijkt stapsgewijs opgebouwd te zijn; de snelheidsmindering vanaf 100 km/h rechts geeft een abruptere indruk. Door de eerdergenoemde beperkte nauwkeurigheid kan het precieze moment van activatie en loslaten van de rem bij stilstand niet worden bepaald.



Figuur 2.5: Voorbeeld verschillen in snelheidsmindering

Vertraging tot doelsnelheid > 0

Wanneer de rem losgelaten wordt bij een doelsnelheid hoger dan nul kunnen de daadwerkelijke treinsnelheidsresultaten na het loslaten van de rem echter wel geïdentificeerd worden. In week 47 leidde dit tot overschrijding. Dit kwam op bijzonder systematische wijze voor op de sectie Vierverlaten-Zuidhorn (maar bleef niet tot deze sectie beperkt). 17 nov Testrit 1 dient als voorbeeld voor de opeenvolgende gebeurtenissen (zie linker afbeelding bovenaan de volgende pagina, km 6):

- 450m voor de afname van de snelheidslimiet van 100 naar 80 km/u remt ATO van 97 km/u naar 80 km/u (Status = DECELERATE);
- de treinsnelheid vermindert hierna nog voor 5 seconden, en dit resulteert in een snelheid van ongeveer 72 km/u (Status = STEADY);
- de treinsnelheid loopt zonder wezenlijke hellingsgraad op naar 80 km/u in 20 seconden (Status staat nog steeds op STEADY);
- nadat de Status verandert naar DECELERATE gaat de snelheid naar 83 km/u voordat de rem daadwerkelijk wordt geactiveerd.

Een vergelijkbaar verschijnsel deed zich in oostelijke richting voor, op de plaats waar treinen de bocht in het spoor bij Vierverlaten naderen. Het seinbeeld vereist hier een snelheidsmindering naar 40 km/u. De ATO kwam uit op een iets lagere snelheid om vervolgens weer te versnellen.

In week 51 is de beëindiging van de eerste remactie sterk verbeterd (bovenaan de volgende pagina, rechterafbeelding): de snelheid van alle ritten is nu 80 km/u op de juiste plaats, gevolgd door coasten en een doorlopende vertraging tot stilstand.

Het zou nuttig zijn om te onderzoeken of het passagierscomfortonderzoek meer inzichten biedt met betrekking tot de gelijkmatigheid van het gas geven en remmen.

1A.6 Kan het ATO-systeem continu en constant remmen zonder te veel schommelingen in remvermogen of tussentijds loslaten van de rem?

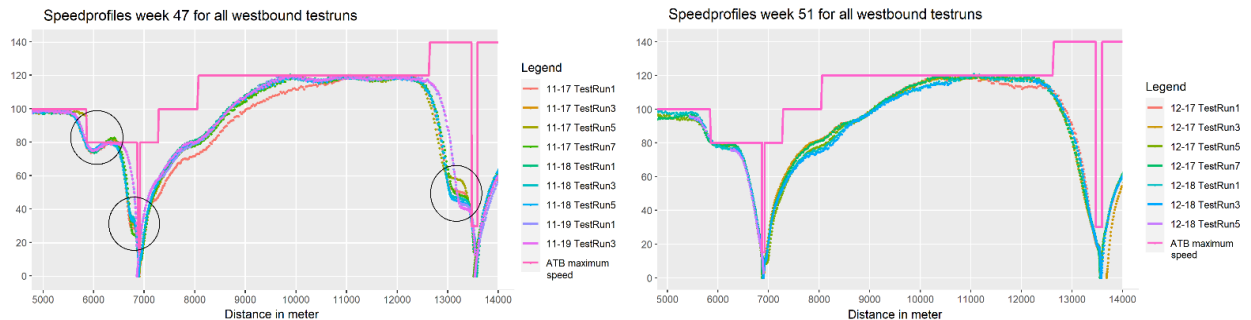
Hier is nogmaals het verschil tussen nul of een hogere doelsnelheid van belang.

Snelheid minderen om te stoppen

Het lastigste aspect van deze vraag is de aankomst op stations, aangezien hierbij zowel de eindsnelheid en de eindpositie aangegeven worden. Het merendeel van deze gevallen vindt plaats bij EoA (richting een rood sein) als gevolg van spoorwegovergangen of het eindpunt van de reis. In week 47 vonden de meeste gevallen van vertraging tot stoppen in twee stappen plaats. Elke stationsingang heeft een gangbare tussensnelheid die enkele seconden aangehouden moet worden (zie linker

afbeelding hieronder en de grafieken in Bijlage 8.1). Deze snelheid lijkt gekoppeld te zijn aan de beginsnelheid:

- Vierverlaten-Zuidhorn (westelijke richting): beginsnelheid 80 km/u, tussensnelheid 30 km/h
- Zuidhorn-Grijskerk (westelijke richting): beginsnelheid 120 km/u, tussensnelheid 50 km/u
- Buitenpost-Grijskerk (oostelijke richting): beginsnelheid 140 km/u, tussensnelheid 70 km/u
- Grijskerk-Zuidhorn (oostelijke richting): beginsnelheid 100 km/u, op 17 nov (alle ritten) en 18 nov (Testrit 2) remmen treinen af met een tussensnelheid van ongeveer 20 km/u.



Figuur 2.6: Verbetering in de remcurve tussen wk 47 en wk 51

Houd rekening met het feit dat de ATO-rijmodus in deze gevallen voortdurend DECELERATE aangeeft. Dit betekent dat alleen het remvermogen tijdelijk verminderde.

In de ideale situatie zou er een gelijkmatige remcurve van baanvakssnelheid naar 0 moeten zijn. In week 47 kwam dit slechts tijdens bepaalde ritten op bepaalde plaatsen voor.

- Vierverlaten-Zuidhorn (westelijke richting), 19 nov Testrit 1 en 3 (met langere MA)
- Grijskerk-Buitenpost (westelijke richting, EoA): 17 nov Testrit 5
- Grijskerk-Zuidhorn (oostelijke richting, EoA): op 5 (Testrit 2 en 8), 18 (Testrit 4 en 6) en 19 nov (Testrit 2 en 4) werd een geleidelijke remcurve van 100 km/u tot stilstand behaald.

In week 51 is een geleidelijke vertraging tot stilstand de norm geworden (zie rechterafbeelding hierboven). Dit gebeurt met een remvermogen dat gemiddeld iets lager ligt, wellicht om het remvermogen indien nodig iets te kunnen verhogen.

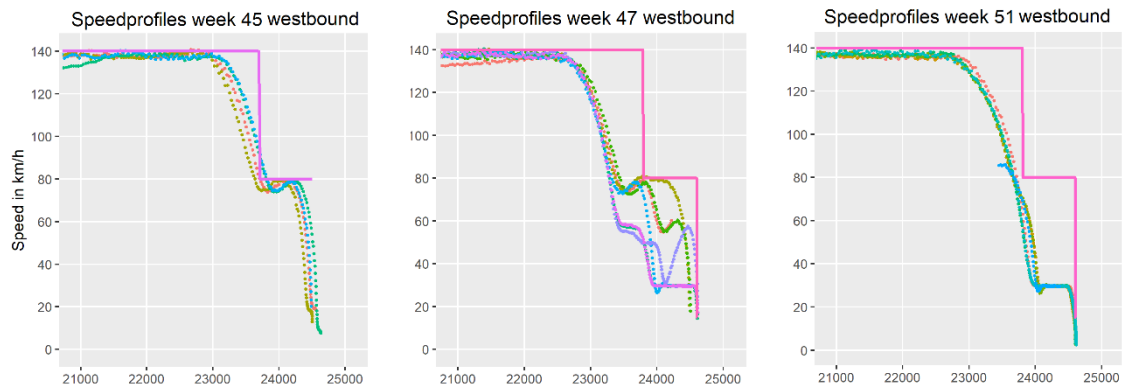
Vertraging tot doelsnelheid > 0

Afremmen tot een doelsnelheid >0 zorgt niet voor besturingsproblemen *tijdens* het remmen, aangezien er hier geen sprake is van een vooraf bepaalde eindpositie. Systematisch positieve doelsnelheden komen voor op:

- Vierverlaten-Zuidhorn (westelijke richting) 100-80 km/u
- Zuidhorn-Vierverlaten (oostelijke richting) 100-40 km/u

Op beide locaties remmen de treinen in één continue beweging af (zie Bijlage 8.1).

Er zijn tijdens de testweken meer veranderingen te zien bij het naderen van terminalstation Buitenpost (zie grafieken hieronder): in week 45 waren er treinen die 140-80-0 remden, week 47 laat complexe patronen zien en in week 51 is de EoA dominant geworden met een rempatroon dat over het algemeen de vorm 140-40-0 aanneemt.



Figuur 2.7: Ontwikkeling van het rempatroon gedurende de testen

1A.7 Kan het ATO-systeem een rit uitvoeren zonder onnodige snelheidsschommelingen (accelereren of afremmen)?

We maken hier onderscheid tussen acceleratie, cruisen, coasten en remmen.

Acceleratie

Acceleratie is een geleidelijk proces en is gewoonlijk in één actie van stilstand tot baanvaksnelheid toegestaan. Bij stations met een beperkte initiële vertreksnelheid (Vierverlaten 60 km/h, Zuidhorn spoor 1 80 km/u) wordt de toestemming voor baanvaksnelheid ontvangen voordat de trein de vertreksnelheid bereikt heeft.

Cruisen

Het vasthouden van de maximumbaanvaksnelheid van 100 km/u en hoger werkt goed. Wanneer het ATO-systeem de trein op een lagere constante snelheid moest houden leek het in ieder geval in week 47 niet te lukken om een vermogen te vinden dat laag genoeg was. In de meeste gevallen waar constante snelheden tussen 40 en 80 km/u vereist zijn bij rijmodus = STEADY neemt de snelheid langzaam toe (zie figuur 2.6 hierboven in paragraaf 1A.6).

In week 51 werd het merendeel van deze gevallen door middel van coasten opgelost. De korte afstanden waarbij een vaste snelheid van 40 km/u gereden werd duiden aan dat een toereikend vermogen is gevonden voor lagere snelheden. Dit is nuttig voor stationsgebieden en lijnen als Groningen-Roodeschool, waar de baanvaksnelheid voornamelijk 80 km/u bedraagt.

Coasting

Coasting (uitrollen) is essentieel voor energiebesparing en op tijd rijden. Deze modus kwam voor 18 december (week 51) niet voor in de registraties. Het gebruikelijke patroon ziet er als volgt uit:

- Wanneer er STEADY op baanvaksnelheid wordt gereden (of tijdens ACCELERATION indien de baanvaksnelheid nog niet bereikt is), schakelt het ATO-systeem ruim voordat er een remopdracht binnenkomt om naar COASTING. Dit gebeurt 20-60 seconden van tevoren. Dit bespaart energie maar resulteert niet in wezenlijk tijdverlies. Dit maakt dit verschijnsel moeilijk te herkennen in de snelheidsgrafieken. Wat betreft snel en milieubewust rijden is dit goed nieuws. Aan de andere kant moet het coasten eerder plaatsvinden als tijdverlies juist nodig is om op de correcte manier een Timing Point te passeren.
- Het remmen bij een station kan mogelijk in stappen gedaan worden, zoals in het geval van Zuidhorn. Vanaf Vierverlaten daalt de toegestane snelheid van 100 naar 80 km/u vanwege splitsingspunten, en vanaf Grijpskerk daalt de baanvaksnelheid van 120 naar 100 km/u. In beide gevallen vindt er op de tussenafstand van een paar honderd meter coasting plaats. Dit kan beschouwd worden als optimaal gedrag vergeleken met de bovengenoemde 'continue' versnelling. Opvallend is dat er bij de lage snelheidslimiet van 40 km/u bij het binnenrijden van keerstations Buitenpost en Vierverlaten nog steeds op STEADY gereden wordt, terwijl coasting hier ook een mogelijkheid zou zijn.

Remmen

De eerdergenoemde overschrijding bij het afremmen naar een positieve doelsnelheid resulteerde in week 47 in acceleratie (hou er rekening mee dat de ATO-status hier STEADY is) waarna vervolgens werd afgeremd. Dit gebeurde op deze locaties (zie Bijlage 8.1):

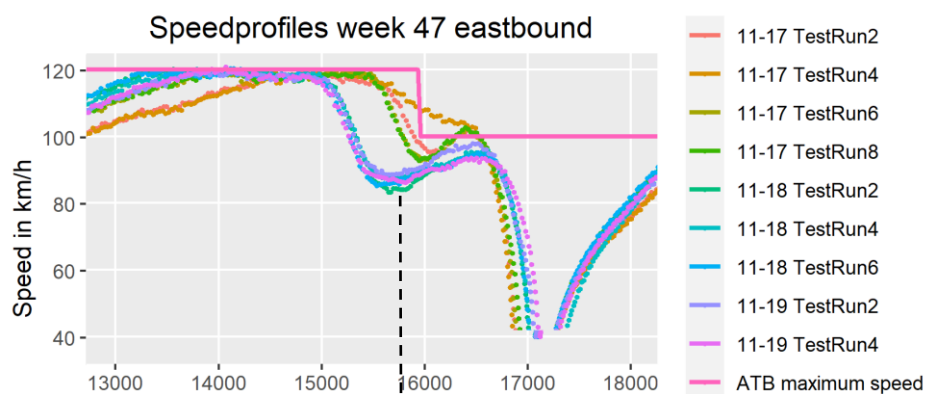
- Vierverlaten-Zuidhorn (westelijke richting): een eerste remactie verlaagt de snelheid naar 75 km/u; 'continue' acceleratie leidt vervolgens tot een lichte overschrijding van de 80-grens voordat ATO snelheid mindert tot stilstand bij Testritten 1 en 7 op 17 nov.
- Grijpskerk-Buitenpost (westelijke richting): bij de meeste ritten kwam een tussentijdse 'STEADY'-fase voor. 18 nov TestRit 1 en 19 nov TestRit 1 en 3 waren verdeeld, maar hadden een ietwat verminderd remvermogen en een continue DECELERATE-status.
- Grijpskerk-Zuidhorn (oostelijke richting), uitgewerkt onder 1A.8 hellingen.
- Zuidhorn-Vierverlaten (oostelijke richting): afremmen tot 25 km/u en vervolgens accelereren tot 30 of 40.

In week 51 waren de meeste onnodige snelheidswijzigingen opgelost (met uitzondering van hellingen, zie 1A.8). Dit leidde echter over het algemeen tot iets langere rittijden (zie hoofdstuk 2.8).

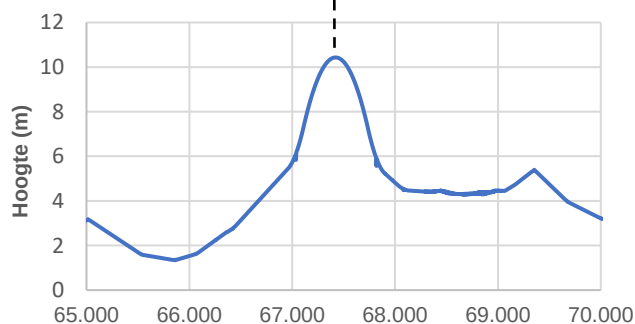
1A.8 Kan het ATO-systeem een rit met hellingen uitvoeren zonder onnodige snelheidsschommelingen (accelereren of afremmen)?

De testlijn is grotendeels min of meer plat, maar de brug over het Van Starckenborghkanaal net ten westen van Zuidhorn heeft een aanzienlijke hoogte van 10 meter. In westelijke richting accelereren de treinen: de brug leidt tot een enigszins andere vorm (zie Bijlage 8.1) maar zorgt niet voor besturingsproblemen of een wijziging in de rijmodus.

In oostelijke richting is de brug onderdeel van de benaderingszone van Zuidhorn (km 67,4), wat zorgt voor een uitdaging in de remstrategie. Om dit te onderzoeken worden hieronder het snelheids- en hoogteprofiel vergeleken.



Figuur 2.8: Snelheidsprofiel ter hoogte van de brug over het Van Starckenborghkanaal



Figuur 2.9: Hoogteprofiel van de brug over het Van Starckenborghkanaal

Rond de brug neemt de toegestane snelheid af van 120 naar 100 km/u (km 67,540). De remopdracht wordt heuvelopwaarts ontvangen.

- Tot 17 nov wordt tijdens de meeste ritten relatief laat geremd maar wordt wel een snelheid van minder dan 100 km/u behaald met behulp van de stijgende helling. Na een daling tot 95 km/u stijgt de snelheid licht tijdens de afdaling. Wanneer een snelheid van 100 km/u bereikt wordt begint de vertraging richting het station.
- Bij Testrit 4 op 17 nov (oranje in de grafiek) wordt de snelheid echter nauwelijks verminderd en wordt de doelsnelheid van 100 km/u later bereikt dan de ATB vereist. Dit is waarschijnlijk de reden geweest om het algoritme aan te passen voor een voorzichtigere rijstrategie.
- Testritten vanaf 18 nov remmen eerder en naar een lagere snelheid rond 90 km/u op de brug. Heuvelafwaarts rollen de treinen en versnellen zij naar 96 km/u voordat ze vertragen tot stilstand. De ATB-bovengrens wordt niet overschreden, maar het resultaat kan minder optimaal zijn wat betreft rittijd (zie paragraaf 5.2B.2) en energieverbruik. Een menselijke machinist zou waarschijnlijk rollen en licht remmen om 100 km/h te bereiken op de brug, en vervolgens heuvelafwaarts remmen om op 100 km/h te blijven.

2.7 Andere minimumvereisten

1B.1 Kan het ATO-systeem movement authorities (MA, ofwel rijtoestemmingen) verwerken? Met inbegrip van herzieningen/verlengingen van de movement authority?

Ja. De ATO-registratie bevat MA's met betrekking tot drie variabelen die in deze paragraaf beschreven worden.

MaxPermittedSpeed ahead (Maximaal Toegestane Snelheid Vooruit) heeft de waarden:

- 0 voor EoA
- -1 bij geen binnenkomende informatie (dit is het geval bij rijden op naderingssnelheid en wanneer een MA nog geen afstandslimiet heeft)
- 40, 80, 100, 120 overeenkomstig de betreffende snelheidslimieten in km/u. Houd er rekening mee dat de toename van de snelheidslimiet naar 140 niet wordt aangekondigd.

Huidige toegestane snelheid (wordt interessant genoeg MaxCalcSpeed genoemd):

- -1 aan het begin van een rit, wanneer er nog geen informatie is ontvangen
- 15 of 30 voor de naderingssnelheid bij respectievelijk beheerde en permissieve seinen
- 40, 60, 80, 100, 120, 140 overeenkomstig de betreffende snelheidslimieten. Een limiet van 60 km/h is alleen aanwezig aan het begin van de testritten in westelijke richting. Dit verklaart waarom deze niet voorkomt in de lijst met aangekondigde snelheden.

MaxDistanceToGo (Maximaal Af Te Leggen Afstand) tot de toegestane snelheid, met waarden:

- 0 als er op naderingssnelheid wordt gereden, maar ook als er nog geen toegestane snelheidslimiet is
- anders een continue schaal met een maximum van 7000 meter (voor langere MA's is de afstand 0, zoals hierboven aangegeven)
- de minimumwaarden gaan tot 30 meter (als de DistanceToGo onder de 50 komt gaat gewoonlijk een nieuwe MA of naderingssnelheid in).

Verlenging MA

Gewoonlijk is er al een route vastgesteld (in dit testprogramma op een vrijwel leeg spoor) maar geeft de ATB-NG slechts beperkte informatie vanwege het ontwerp:

- De MA wordt verlengd met een lagere snelheid. In dit geval wordt de af te leggen afstand naar de snelheidswijziging aangegeven. Alle ritten in westelijke richting naar Zuidhorn en Buitenpost ontvangen bijvoorbeeld een naderende snelheidslimiet van 80 km/u. De af te leggen afstand wordt minder. Wanneer dit de 50m bereikt wordt een nieuwe MA

- ontvangen van 80 km/u voor 800-1000m. Deze wordt gewoonlijk met een gelijkmatige 80 km/u gepasseerd. Dit is tot zekere hoogte afhankelijk van de versie van het algoritme.
- Een lange MA wordt ruim voordat de trein de EoA nadert verlengd. Bijvoorbeeld: 19 nov Testrit 1 van Zuidhorn naar Grijpskerk heeft een MA met een snelheid van 120 km/u en een afstand van 2870m; op 00:12:30 wordt deze verlengd naar 4763m. Dit wordt correct ontvangen en de ATO accelereert naar baanvaksnelheid.
- Kritieke MA-verlengingen zijn zeldzaam, maar komen soms voor rond het vertrek. Bijvoorbeeld: Testrit 18 nov Testrit 4 verlaat Zuidhorn richting Vierverlaten met een korte MA met 100 km/h. Als de teller op 174m staat wordt de MA verlengd naar 3495m. Ten tijde van de verlenging was de trein aan het accelereren (ongeveer 25 km/h) en bleef dit doen.

Een merkwaardige gebeurtenis, namelijk 'tijdelijke MA-verkorting' doet zich voor tijdens 18 dec Testrit 2 in Zuidhorn:

- Bij aankomst strekt de MA zich uit tot 3500m.
- Zodra de ATO naar de ACCELERATE-modus springt op 01:08:55 zakt de MA naar slechts 274m. Dit valt niet te reconstrueren aan de hand van de seindata, wat kan wijzen op een ATB-probleem.
- Wat de oorzaak ook was, ATO brengt de trein op toereikende wijze naar 30 km/u STEADY.
- 01:09:20 de MA over 3500m komt terug. ATO accelereert verder maar blijft dit doen tot wel 01:10:00.

1B.2 Kan het ATO-systeem movement authorities opvolgen?

Er zijn verschillende soorten MA's die in deze paragraaf geanalyseerd worden.

Toegestane snelheid hoger dan huidige snelheid

Als de toegestane snelheid hoger is dan de huidige snelheid (tijdens een stop, bijvoorbeeld), staat de DriveMode op ACCELERATE. Er moeten hier twee speciale gevallen genoemd worden:

- Bij naderingssnelheid 15 of 30 km/u accelereert het ATO-systeem naar deze snelheid tot een MA wordt ontvangen bij een bocht of baken.
- Een lage vertreksnelheid kan gevolgd worden door een toestemming voor hogere snelheid voordat de trein de initiële bovengrens bereikt. In dit geval blijft ATO accelereren (bijvoorbeeld: 18 nov Testrit 1 Vierverlaten 60 km/u vanwege een vertakking, Grijpskerk 30 km/u vanwege naderingssnelheid).

Toegestane snelheid gelijk aan huidige snelheid

Als de trein op de toegestane snelheid rijdt staat het ATO-systeem in DriveMode STEADY. Dit werkt goed, maar alleen bij snelheden vanaf 100 km/u (zie paragraaf 1A.7).

Naderende lagere toegestane snelheid

ATO ontvangt de huidige toegestane snelheid, de volgende naderende toegestane snelheid en de afstand tot deze wijziging. Dit stelt het systeem in staat om op tijd te remmen.

- Dit werkt over het algemeen goed. De eerste sectie van de testritten in westelijke richting vormt een goed voorbeeld: deze sectie heeft een baanvaksnelheid van 100 km/u maar komt Zuidhorn binnen met een limiet van 80 km/u tot aftakkend spoor 1. ATO reageert gewoonlijk 450m voor de snelheidslimietwijziging met een DECELERATE-opdracht van 100 tot 80 km/u. De doelsnelheid wordt gewoonlijk op tijd bereikt.
- Tijdens 17 nov Testrit 5 op deze locatie wordt de DECELERATE-status geregistreerd, maar de trein remt helemaal niet en rijdt de 80 km/u zone binnen met een snelheid van 100 km/u. De machinist deactiveert ATO vervolgens en remt handmatig.
- In de tegengestelde richting bereikt 17 nov Testrit 4 de 100 km/u ietwat te laat (zie paragraaf 3 1A.8).

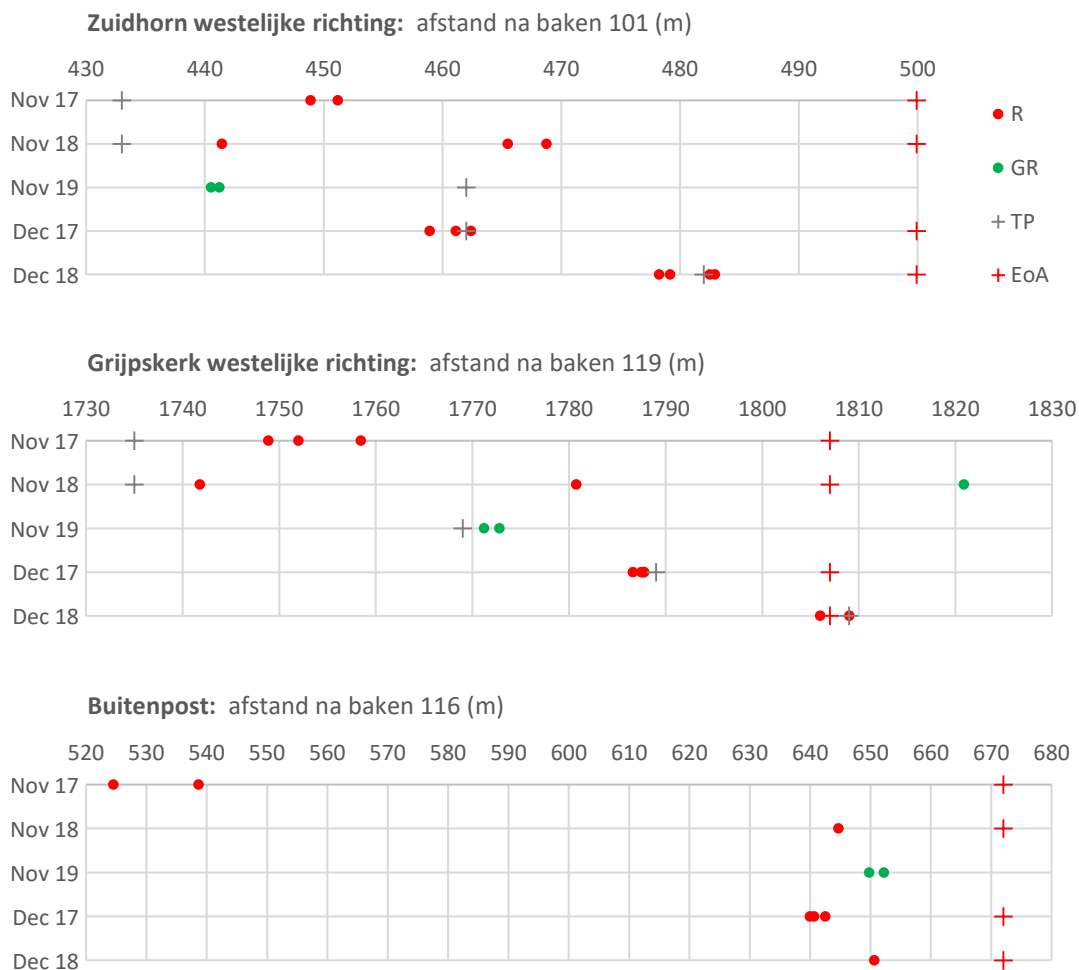
1D.5 Kan het ATO-systeem veranderingen in de route verwerken?

Ja. Zes ritten in westelijke richting op 17 en 18 december gaan in hun oorspronkelijke Journey Profile (JP) tot Timing Point 9 (Buitenpost spoor 2). Slechts 3 minuten voor de geplande aankomst wordt er een JP-update gestuurd waarbij het Timing Point naar 4 wordt veranderd (Buitenpost spoor 1). Het Donna-plan en de route-instelling leiden de trein naar spoor 1, en verscheidene ritten worden met ATO voltooid. Dit betreft in ieder geval 17 dec Testrit 5 en 18 dec Testrit 1. Vier andere ritten zijn in deze twee nachten handmatig de Buitenpost in gestuurd, maar er zijn geen indicaties gevonden dat het hier om een routewijziging ging.

1E.1 Kan het ATO-systeem binnen de vastgestelde afstandslimieten bij het perron stoppen, zelfs als dit in de buurt van de EoA is?

De stopprecisie wordt geanalyseerd door de positiegegevens te plotten van alle aankomsten waarbij ATO = ENGAGED. De grafieken hieronder vereisen wat uitleg:

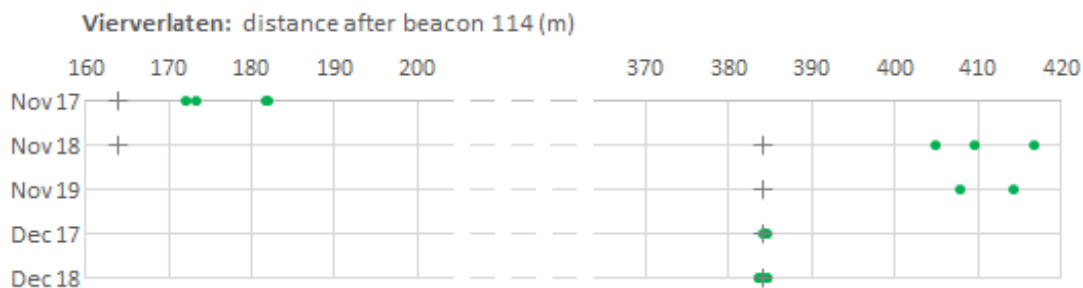
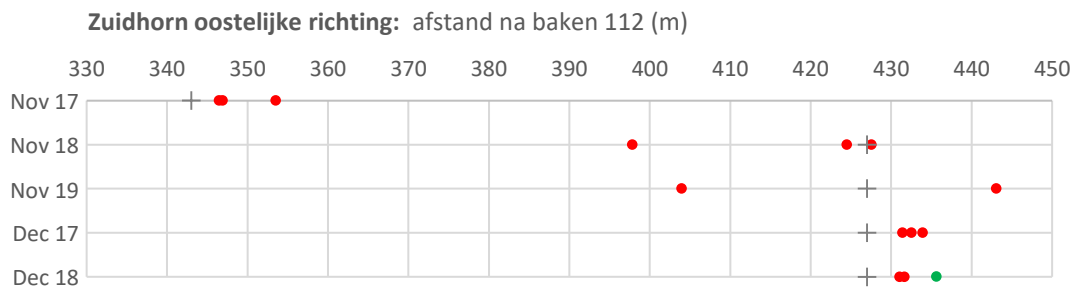
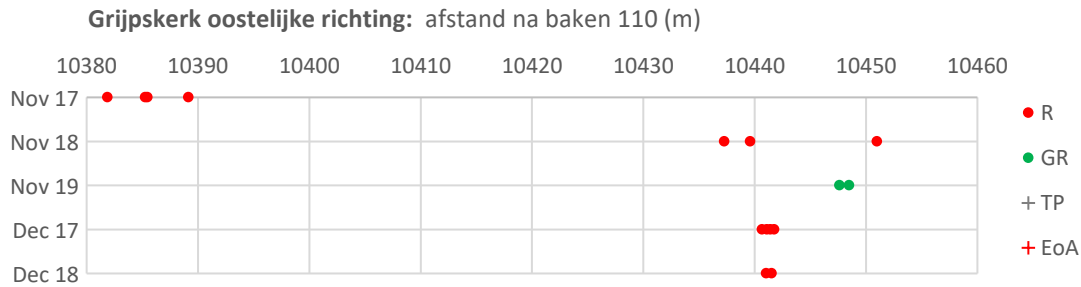
- De afstand staat op de horizontale as in relatie met het voorgaande baken (D_Location).
- Elke stip is één Testrit in één nacht. Aankomsten dicht bij EoA (minder dan 170m) zijn roodgekleurd en Aankomsten met langere MA's zijn groengekleurd (500m en langer).
- De EoA is weergegeven als een rode +.
- Het Timing Point is het doel en is weergegeven als een grijze +. In sommige gevallen konden geen Timing Points gevonden worden.
- De dagen zijn verticaal weergegeven omdat omstandigheden zoals het algoritme, Timing Point en MA verschillende keren zijn veranderd.



Figuur 2.10: Ontwikkeling stopposities langs perron gedurende de tests (westelijke richting)

Bij Buitenpost gebeuren er enkele merkwaardige dingen:

- De registraties tonen dat het Timing Point op 462 en later op 442m zou zijn (niet toegevoegd aan de grafiek omwille van meer detail met betrekking tot de stoppositie). Dit is waarschijnlijk incorrect; als dit correct is heeft het systeem hier matig gepresteerd.
- Testritten 5 en 7 op 17 nov (rode stippen rond de 530m) stopten zo vroeg dat de trein handmatig naar 650m gestuurd is als startlocatie voor het volgende vertrek.
- Testritten 1 en 3 op 19 nov (groene stippen) werden eerst rond 650m geregistreerd. Deze positie versprong echter plotseling naar respectievelijk 531 en 541m na stilstand. De oorzaak hiervan is nog niet achterhaald.



Figuur 2.11: Ontwikkeling stopposities langs perron gedurende de tests (oostelijke richting)

We zien bij alle locaties een typerend verbeteringspatroon:

- Op 17 november was de variatie groot: de stoplocaties besloegen een gebied van 10-30 meter, afhankelijk van de locatie in kwestie.
- Op 18 november werden de Timing Points gewijzigd, maar de variatie bleef aanwezig. Het TP in Vierverlaten is 's nachts veranderd; beide worden getoond.
- Op 19 november lijkt er een experiment uitgevoerd te zijn met stoppen zonder MA-beperking (naar verwachting Zuidhorn oostelijke richting). Dit lijkt een meer gelijkmatige stoppositie mogelijk te hebben gemaakt. Vierverlaten heeft constant een redelijk lange MA gehad, aangezien het sein ver weg is.
- Op 17 december is er een grote verbetering te zien in het algoritme voor het correct dichtbij de EoA stoppen: op sommige locaties worden met ATO vier stops uitgevoerd binnen dezelfde meter! De variatie is nergens meer dan een paar meter.
- Op 18 december is de aangegeven positie in westelijke richting geoptimaliseerd, waardoor de hoge nauwkeurigheid van de voorgaande dag behouden is gebleven.

Vergelijking met handgeschreven notities

Voor 17 en 18 december zijn zowel gegevens als handgeschreven notities van de stoplocaties beschikbaar. Verschillende fenomenen doen zich voor:

- De handgeschreven notities en de gegevens komen overeen. Bijvoorbeeld: met betrekking tot 18 dec Testrit 4 (trein 82519) is expliciet geschreven: 'Op deze route stopt ATO binnen de marges.' De gegevens komen hiermee overeen. Hiernaast verklaren verscheidene beschreven incidenten waarom ATO niet ingeschakeld is bij bepaalde stations, zoals: 18 dec Testrit 3 (82518) 'Buitenpost tussenkomst van de machinist omdat ATO te laat zou zijn gestopt.'
- Gemengd beeld: Over 18 dec Testrit 3 (82518) is geschreven dat hier tussenkomst van de machinist plaatsvond in Grijpskerk en Buitenpost. Dat laatste viel af te leiden uit de gegevens, maar in Grijpskerk staat er in het ATO-logboek dat het systeem op ENGAGED stond tot de trein tot volledige stilstand kwam.
- De handgeschreven notities en de gegevens komen niet overeen. Bijvoorbeeld: Bij 17 dec Testrit 7 (82522) staat geschreven dat de trein op -10m is gestopt in Zuidhorn (niet ver genoeg) en op -25m in Grijpskerk, terwijl de gegevens laten zien dat de stoppositie binnen een meter van het Timing Point was. Afgezien van de problemen bij de aanduiding van de gegevens kan het zijn dat het beeld dat een machinist heeft van een correcte stoppositie afwijkt van de opdracht die ATO heeft ontvangen.

Alhoewel de notities in week 51 nog steeds problemen beschrijven zijn er tegen die tijd al grote verbeteringen doorgevoerd met betrekking tot stopprecisie.

2.8 Voordelen

ATO kent verschillende potentiële baten zoals capaciteit, duurzaamheid en veiligheid. In sectie worden twee onderzoeksvragen over de potentiële baten beantwoord op basis van de uitkomsten van de live tests.

2B.1 Welke tijdsbesparingen kan het ATO-systeem behalen bij acceleratie?

Deze vraag wordt beantwoord door de *acceleration time loss* (acceleratietijdsverlies) als indicator te gebruiken (ATL in de tabellen). Dit is het verschil tussen:

- de rittijd bij acceleratie van stilstand tot baanvaksnelheid;
- de rittijd van dezelfde afstand bij constante baanvaksnelheid.

Acceleratietijdsverlies ATO

In de ATO-registratie wordt het acceleratietijdsverlies berekend vanaf de vertreklocatie tot de positie op het spoor waar de treinen de maximumsnelheid bereiken hebben (afgeleid van de snelheidsprofielgrafieken die in Bijlage 8.1 staan). De tabel hieronder geeft een beeld van de berekening voor Grijpskerk in westelijke richting op 5 november: de rit vertrekt net na 13,5 kilometer en heeft de baanvaksnelheid ruim bereikt op 20,0 km. De eerste opname hierna wordt dus gebruikt. De precieze positie is niet van belang, want de trein verliest geen tijd meer nadat de baanvaksnelheid bereikt is.

AtoState_Tijdstip	TestRun	Locatie	Snelheid	Act	AtoState_State	DriveMode	dx	dt	dt_140	atl
6-11-2019 00:19:55	1	13728	0	V	ATO_ENGAGED_EG	ACCELERATE				
6-11-2019 00:23:37	1	20011	139		ATO_ENGAGED_EG	STEADY	6284	222	162	60
6-11-2019 01:50:37	3	13565	0	V	ATO_ENGAGED_EG	ACCELERATE				
6-11-2019 01:54:25	3	20005	146		ATO_ENGAGED_EG	STEADY	6440	228	166	62

Het acceleratietijdsverlies kan het best worden onderzocht op locaties zonder bijzondere omstandigheden zoals lokale snelheidsbeperkingen of hellingen. De volgende locaties zijn geschikt:

- Gk westelijke richting (tot 140 km/u)
- Gk oostelijke richting (tot 120 km/u)
- Zh oostelijke richting (tot 100 km/u)

Acceleratietijdverlies Donna

Om deze onderzoeksvraag te beantwoorden moeten de gevonden waardes vergeleken worden met handmatige besturing. Er zijn jammer genoeg geen gedetailleerde snelheidsprofielen beschikbaar van normale treinbesturing op regionale spoorwegen. De prestaties worden regelmatig geanalyseerd met behulp van sectiebezettingsgegevens. Deze gegevens zijn echter niet gedetailleerd genoeg om het acceleratietijdverlies nauwkeurig te meten en daarmee te vergelijken.

Als alternatieve oplossing wordt de rittijdberekening van Donna (minimale tijden zonder vertraging) gebruikt als een schatting van de huidige handmatige besturing. Donna wordt berekend op basis van GTW2/8 DMU (de langere versie, zoals bij de tests). De exacte parameters verdienen echter extra aandacht. Het passen met de operationele gegevens (10^{de} percentiel van de rittijden van station tot station van een grote hoeveelheid treinen en locaties) bracht een goede reden voor aanpassingen in de parameters van het rollend materieel aan het licht:

- Er wordt al 15 jaar van de oude instellingen gebruikgemaakt. Deze gaan uit van een hoge adhesie (wat bij individuele ritten het geval kan zijn maar onwaarschijnlijk is in de herfst) en geen opstarttijd (dit zou als nalatigheid beschouwd kunnen worden). De resultaten van deze parameters zijn te zien in de tabel, aangezien we niet precies weten welke motorinstellingen door ATO geactiveerd worden.
- De nieuwe instellingen worden momenteel ingevoerd voor de dienstregeling vanaf 2022 op de noordelijke spoorwegen. Er wordt hierbij uitgegaan van normale adhesie en de opstarttijd die nodig is voor systeemreactietijden en voor de diesel- en elektrische motors om tot de maximale tractiekracht te komen. De nieuwe parameters vormen waarschijnlijk een beter model voor de huidige handmatige handelingen (10^{de} percentiel, dus tijdbesparend rijden).

Resultaten per locatie

De volgende tabel toont het tijdverlies van alle acceleraties met ATO voor de drie geselecteerde locaties.

Gk westbound 140 km/h			Gk eastbound 120 km/h			Zh eastbound 100 km/h		
Date	TestRun	ATL	Date	TestRun	ATL	Date	TestRun	ATL
5-nov	1	61	2-nov	2	44	2-nov	2	31
5-nov	3	63	5-nov	8	45	5-nov	4	30
5-nov	5	90	17-nov	2	56	5-nov	6	31
5-nov	7	62	17-nov	4	56	5-nov	8	31
17-nov	1	88	17-nov	6	49	17-nov	2	35
17-nov	5	71	17-nov	8	49	17-nov	4	37
17-nov	7	74	18-nov	2	43	17-nov	6	32
18-nov	1	65	18-nov	4	44	17-nov	8	32
18-nov	5	67	18-nov	6	44	18-nov	2	31
19-nov	1	83	19-nov	2	54	18-nov	4	44
19-nov	3	73	19-nov	4	53	18-nov	6	30
17-dec	1	69	17-dec	2	45	19-nov	2	36
17-dec	3	64	17-dec	4	43	19-nov	4	34
17-dec	5	67	17-dec	6	45	17-dec	4	30
17-dec	7	68	17-dec	8	45	17-dec	6	31
18-dec	1	73	18-dec	2	52	17-dec	8	31
			18-dec	4	52	18-dec	2	68
						18-dec	4	37
Minimum		61	Minimum		43	Minimum		30
Median		68	Median		45	Median		32
Donna-old		60	Donna-old		42	Donna-old		31
Donna-new		69	Donna-new		51	Donna-new		38

In Grijpskerk in westelijke richting naar Buitenpost is de diversiteit van het rijgedrag beperkt, maar drie rode waardes springen in het oog (zie Bijlage 8.1):

- 5 nov Testrit 5 remt om vervolgens te accelereren. Dit heeft waarschijnlijk te maken met een Timing Point.

- 17 nov Testrit 1 heeft een lagere acceleratie bij hogere snelheid. Hoewel de meeste testritten op vergelijkbare manier accelereren en binnen 6 km 140 km/u bereiken is deze aanzienlijk langzamer en heeft 9 km nodig om volledige acceleratie te bereiken (minder steile lijn).
- 19 nov Testrit 1 accelereert iets langzamer op lage snelheid (bijna niet te zien in de grafiek, maar dit heeft een relatief hoge impact).

Grijpskerk in de andere richting heeft een nog lagere bandbreedte. Het tijdverlies is hier minder door de lagere baanvaksnelheid. Uitschieters:

- 17 nov en 18 dec Testritten 2 en 4 komen hoger uit door een lagere acceleratie en hogere snelheid (duidelijk zichtbaar).
- 19 nov Testrit 4 is iets langzamer met een lagere snelheid.

Zuidhorn oostelijke richting is redelijk gelijkmatig, nogmaals met lagere waarden richting de 100 km/u.

- 18 nov Testrit 4 heeft een lichte daling in de acceleratie rond de 30 km/u.
- 18 dec Testrit 2 blijft even op de 30 km/u cruisen. Dit lijkt te komen door een late MA-verlenging.

Vergelijking met Donna

Op alle locaties ligt het minimaal behaalde tijdverlies door ATO in de buurt van de oude, snelle Donna-instellingen (zonder vertraging). Zelfs de mediaan valt nog onder de nieuwe instellingen! Voor normale handmatige besturing zijn de precieze acceleratiecurves onbekend. Het 10^{de} percentiel is waarschijnlijk vergelijkbaar met de nieuwe, langzamere instellingen. Dit suggereert dat ATO goed werk verricht, ook al zijn de precieze motorinstellingen onder ATO niet bekend.

Lagere acceleratie

Eén van de verwachte voordelen van ATO is meer gelijkmatigheid in het rijgedrag. De locatieanalyse hierboven bevat een aantal bijzonder langzame acceleraties. Om ATO beter te begrijpen zou het nuttig zijn om te kijken of er een oorzaak gevonden kan worden voor de gevallen die nog niet verklaard zijn.

2B.2 Welke tijdsbesparingen kan het ATO-systeem behalen bij het stoppen bij een station?

Deze vraag houdt nauw verband met acceleratietijdverlies en kan worden beantwoord door de braking time loss (remtijdverlies, BTL) in de ATO-tests en in Donna te bepalen.

Remtijdverlies Donna

Het remmodel in Donna is gebaseerd op een comfortgerichte vertragingswaarde van $-0,5 \text{ m/s}^2$ op basis van het 10^{de} percentiel van veldmetingen zonder inbegrip van hellingen. Soms kan een vroeg beperkend (voor)signaal eerder leiden tot een remactie dan comfortabel is; in dit geval begint een trein met remmen met $-0,33 \text{ m/s}^2$ tot deze de $-0,5$ -curve bereikt.

Resultaten per locatie

Er zijn twee locaties die 'schoon' genoeg zijn voor een ongestoorde meting van het remtijdverlies. Alle zes locaties worden hieronder echter behandeld, aangezien het remtijdverlies een belangrijk effect laat zien van diverse bovengenoemde onderzoekspunten. Daarom gebruiken we hier geen samenvattende statistiek, maar een lijst met ritten voor elke locatie inclusief een uitleg waarom de resultaten groot of klein zijn. Enkele opmerkingen:

- De testritten zijn door middel van horizontale lijnen in groepen met vergelijkbaar systeemgedrag ingedeeld. De uitleg is van toepassing op alle ritten in deze groep, behalve in het geval van insprong.
- Bij sommige locaties is het remprofiel stapsgewijs, maar niet als zodanig beschikbaar in Donna: in dit geval wordt in plaats hiervan een eenvoudige 'topsnelheid tot nul'-curve gebruikt. Deze is grijs gemaakt, aangezien dit geen volledig eerlijke vergelijking is.

- Week 45 maakt geen onderdeel uit van de eerste en tweede fase aangezien de experimenten met lagere cruisesnelheden het remsnelheidsverlies onvergelykbaar maken.
- De details kunnen vergeleken worden met de snelheidsprofielen in Bijlage 8.1.

Zuidhorn westelijke richting 100-80-0 km/u			
Datum	TestRit	BTL	Uitleg
17-nov	1	43	Remmen - accelereren - remmen op 17 en 18 november
17-nov	7	42	
18-nov	1	37	
18-nov	3	43	
18-nov	5	43	
19-nov	1	32	Remmen 80-0 efficiënt laat
19-nov	3	30	
17-dec	5	54	Gelijkmatig, maar verliest eerder snelheid en neemt meer tijd in beslag
17-dec	7	50	
18-dec	1	58	
18-dec	3	59	
18-dec	5	60	
Donna 100-0		28	19 nov komt in de buurt, goed gedaan voor 100-80-0

Grijpskerk westelijke richting 120-0 km/u			
Datum	TestRit	BTL	
17-nov	1	45	Consequent, maar langzamer dan Donna -0,5 m/s ²
17-nov	5	45	
17-nov	7	44	
18-nov	1	46	
18-nov	5	51	
19-nov	1	43	
19-nov	3	44	
17-dec	1	60	Aangepast algoritme is gelijkmatig, maar nog langzamer. Naderingssnelheid 30 km/u werkt beperkend. Meeste tijd verspild bij lagere snelheden.
17-dec	5	64	
17-dec	7	63	
18-dec	1	71	
Donna 120-0		33	Moeilijk om te evenaren als gevolg van EoA

Buitenpost 140-80-0 km/u			
Datum	TestRit	BTL	
5-nov	3	56	Efficiënt snelheidsprofiel
5-nov	5	63	
5-nov	7	35	Net te laat onder de limiet van 80 km/u
17-nov	5	46	80-0 efficiënt laat, stoppositie niet ver genoeg
17-nov	7	52	55-0 efficiënt laat
18-nov	1	112	Remstrategie aangepast naar 140-30-0 ten koste van 1 minuut Accelereert opnieuw ('STEADY') naar 55 km/u net voor het station
19-nov	1	82	
19-nov	3	112	
17-dec	1	102	
17-dec	5	100	
18-dec	1	109	
Donna 140-80-0		53	Alleen in de laatste testfases behaald

Grijpskerk oostelijke richting 140-0 km/u

Datum	TestRit	BTL	
2-nov	2	50	Tijdverlies bij het rijden van een korte afstand met 30 km/u
5-nov	4	49	
5-nov	6	49	
5-nov	8	50	
17-nov	2	50	Tijdverlies bij het rijden van een korte afstand met 70 km/u
17-nov	4	48	
17-nov	6	50	
17-nov	8	44	
18-nov	2 & 4	49	
18-nov	6	48	
17-dec	2	53	Gelijkmatig, maar over het algemeen een iets lagere remsnelheid
17-dec	4	54	
17-dec	6 & 8	55	
18-dec	2	54	
Donna 140-0		39	

Zuidhorn oostelijke richting 120-100-0 km/u			
Datum	TestRit	BTL	
2-nov	2	27	Lichte snelheidsoverschrijding; 100-0 efficiënt laat
5-nov	8	27	
17-nov	2	45	Tijdverlies bij het rijden van een korte afstand met 10-20 km/u
17-nov	4 & 6	56, 55	
17-nov	8	32	
18-nov	2	64	Zeer voorzichtig: vroeg 90 km/u en tijdverlies op lage snelheid.
18-nov	4	59	
18-nov	6	73	
19-nov	2	35	Vroeg 90 km/u maar 95-0 efficiënt laat
19-nov	4	36	
17-dec	2	41	Toestemming 120/100 km/u niet gebruikt maar efficiënt remmen tot stilstand
17-dec	4	43	
17-dec	6 & 8	42	
18-dec	2	41	
Donna 120-0		33	Hellingen zorgen dat er niet volledig gebruik gemaakt kan worden van de toestemmingslimiet.

Vierverlaten 100-(40)-0 km/u			
Datum	TestRit	BTL	
2-nov	2	23	Rechte route tot spoor 252 (100-0 km/u) met EoA/rood sein 500m verder
5-nov	4 & 6	20	
5-nov	8	19	
17-nov	2	69	Snelheidslimiet 40 km/u 400m eerder bereikt dan nodig, daling 25 km/u en vervolgens lichte acceleratie, gelijkmatige 30-35 km/u op locatie waar 40 km/u is toegestaan.
17-nov	4	73	
17-nov	6	72	
17-nov	8	75	
18-nov	2	96	
18-nov	4 & 6	81, 82	
19-nov	2	87	
19-nov	4	83	
17-dec	4	80	Gelijkmatig profiel werkt met meer consistentie maar is niet sneller
17-dec	8	82	
18-dec	2	80	
18-dec	4	88	
Donna 100-0		28	Week 45 nog sneller

Interpretatie

De vertragingen bij binnenkomst van Grijpskerk (vanuit beide richtingen) resulteren in de minste verstoringen. Hier overschrijdt het remtijdverlies de Donnaberekening met tenminste 10 seconden. Dit lijkt het gevolg te zijn van een combinatie van de EoA, de naderingssnelheid en voorzichtige ontwerpkeuzes.

Op de andere locaties met speciale omstandigheden evenaart ATO zelden het theoretische remtijdverlies in Donna. Zuidhorn westelijke richting op 19 november (100-80-0, bijna net zo snel als Donna 100-0) en Vierverlaten week 45 (100-0, sneller dan Donna) zijn ware prestaties.

Over het algemeen biedt de versie van het algoritme die tot week 51 gebruikt werd geen tijdbesparingen bij het stoppen bij stations. Dit is niet bijzonder verrassend, aangezien de rittijd hier nog niet geoptimaliseerd was. De genoemde prestaties lijken veelbelovend. Met verdere ontwikkeling zou ATO in staat kunnen zijn om regelmatig dezelfde prestaties te leveren als de 10% snelste menselijke machinisten.

2.9 Conclusies en aanbevelingen

2.9.1 Conclusies

De live test heeft waardevolle informatie over de prestaties van ATO onder ATB-NG opgeleverd. Een aantal onderzoeksvragen gaan over de capaciteit van het systeem om eenvoudige treinbesturingsacties uit te voeren. Deze vragen kunnen op basis van het onderzoek simpelweg worden beantwoord met ja:

- Bedienen van de tractie en de rem (1A.1)
- Het verwerken en opvolgen van MA's (1B.1 en 2)
- Het verwerken van routewijzigingen (1D.5)

Enkele punten ondergingen een iteratieve ontwikkeling in de eerste testweken. Dit resulteerde in een duidelijke vooruitgang naar een goed kwaliteitsniveau voor de volgende prestaties:

- Het uitvoeren van een gelijkmatige rit (1A.6, 7 en 8), al is er nog steeds ruimte voor verbetering wat betreft de rittijden, vooral in het geval van hellingen.
- Stoppen op de voorgeschreven positie bij een perron (1E.1).

Het vraagstuk met betrekking tot het geleidelijk beginnen en eindigen van tractie en remacties (1A.2 en 4) kon niet voldoende worden behandeld, aangezien de beschikbare gegevens hier niet nauwkeurig genoeg voor zijn.

De voordelen voor de rittijden tonen een gemengd beeld:

- Bij acceleratie (2B.1) lijkt ATO beter te presteren dan handmatige besturing. Het is echter lastig om hier exacte cijfers voor te geven.
- Bij het vertragen tot stilstand (B2.2) houdt het systeem snelle machinisten niet bij. Aanpassingen in het algoritme zorgden voor verbetering in de basisvereisten hierboven, maar resulteerden ook in iets langere rittijden.

2.9.2 Aanbevelingen

De bevindingen in dit onderdeel zouden aangevuld kunnen worden met extra informatie:

- Kan de passagierservaring een indicatie geven van de geleidelijkheid van de gas- en remacties?
- Testritten 1 en 3 op 19 november werden eerst rond 650m geregistreerd. Deze positie versprong echter plotseling naar respectievelijk 531 en 541m na stilstand. Kan hier een oorzaak voor gevonden worden?
- Voor een juiste interpretatie van de snelle waargenomen acceleratie: welke motorinstellingen activeerde ATO precies? Komen deze instellingen overeen met de instellingen van normale handmatige besturing?

- Enkele testritten accelereerden uitermate langzaam (details in paragraaf 2.5, 2B1). Kan hier een oorzaak voor gevonden worden om meer inzicht in ATO te krijgen?

De gegevensanalyse van een volgend testprogramma kan verbeterd en versneld worden door aandacht te besteden aan enkele problemen met de gegevens:

- Nauwkeurigere metingen van positie, snelheid en eventueel acceleratie
- Volledigheid van de gegevensverzameling
- Automatische verzameling in een consequent (liefst bestaand) format.

Om meer voordelen uit ATO te behalen kan het algoritme op twee punten verbeterd worden:

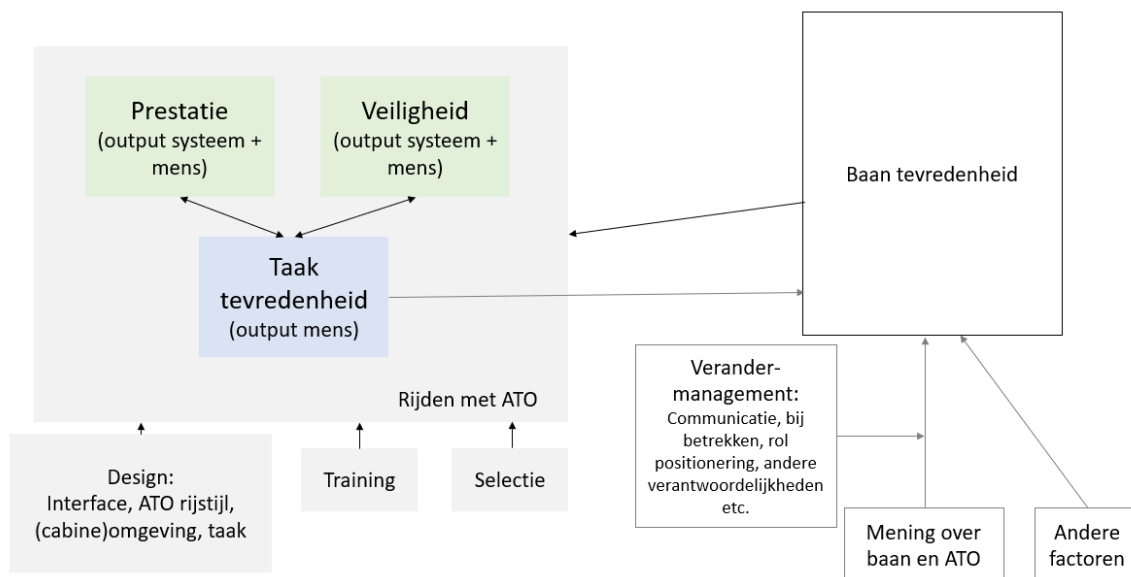
- Op dusdanige manier remmen op hellingen dat het toegestane snelheidsprofiel optimaal benut wordt
- Latere en sterkere vertraging bij stations om remtijdverlies te beperken.

3 Human Factors onderzoek

3.1 Wat is Human Factors onderzoek?

Bij het veranderen van systemen, zoals het invoeren van ATO, is het naast het ontwikkelen en testen van de techniek ook van belang om te onderzoeken hoe de mens met de nieuwe systemen kan werken. Human Factors (HF-)onderzoek bestudeert de interactie tussen mensen en de systemen. Het HF-onderzoek richt zich op het verbeteren van drie elementen:

1) prestatie (bijvoorbeeld voor spoor: capaciteit, punctualiteit, duurzaamheid), 2) verhogen van veiligheid en 3) behouden taaktevredenheid. De taaktevredenheid van de gebruiker kan invloed hebben op de prestatie en de veiligheid, en andersom. De kwaliteit van deze drie elementen kan worden beïnvloed door een goed design, training en selectie. HF-onderzoek levert adviezen op om mens en systeem optimaal te laten samengaan.



Figuur 3.1: Schema van de elementen en onderling verband

Design, Training en Selectie hebben een directe invloed op de elementen Prestatie, Veiligheid en Taaktevredenheid. Een indirecte link is de beïnvloeding van de Baantevredenheid op deze elementen. De tevredenheid met de taak, hier het rijden met ATO, kan invloed hebben op de Baantevredenheid van de machinist en kan invloed hebben op het uitvoeren van de taak 'rijden met ATO'. Baantevredenheid wordt echter door veel meer factoren (bijvoorbeeld beloning, werktijden, perceptie van eigen rol en toegevoegde waarde, interactie met collega's en leidinggevende) beïnvloed dan alleen de ervaring van rijden met ATO. Dit ligt op het terrein van verandermanagement, met onder andere keuzes over communicatie, betrekken van machinisten bij veranderende rol, rol positionering, andere verantwoordelijkheden etc. Dit is een ander onderzoeksgebied dat weliswaar raakvlakken heeft met HF-onderzoek, maar een plan van aanpak daarvoor valt buiten het bestek van dit project. Wel hebben machinisten suggesties gedaan die van nut kunnen zijn voor een dergelijk plan.

3.2 Wat zijn de drie elementen van Human Factors met betrekking tot ATO en wat zijn risico's?

Prestatie – ATO is bedoeld om de prestatie van het spoorstelsel te verbeteren met betrekking tot capaciteit, punctualiteit en duurzaamheid. Hiervoor is het vooral van belang dat de machinist niet onnodig ingrijpt in het systeem en het rijden van de automaat overneemt. Het risico vanuit HF-perspectief is hier het onnodig ingrijpen van de machinist.

Veiligheid – ATO (GOA 2) is een semiautomatisch systeem. De machinist blijft aanwezig op de trein maar de automaat neemt een aantal handelingen over. De machinist moet kunnen ingrijpen wanneer

het ATO-systeem een fout maakt of wanneer er externe factoren zijn waar ATO geen rekening mee houdt, zoals koeien op het spoor.

Eén van de risico's bij automatisering is dat de werknemer meer 'out-of-the-loop' is; hierdoor kan 'de-skilling' ontstaan in het herkennen van een ongewenste situatie. Ook kan er sprake zijn van een verminderde alertheid door de lage belasting van monitoringstaken. Er kan een te groot vertrouwen ontstaan in het systeem, waardoor fouten van het systeem over het hoofd worden gezien.

Taak-tevredenheid – Hierbij gaat het vooral om de tevredenheid tijdens het uitvoeren van de taak met ATO. De taaktevredenheid wordt o.a. beïnvloed door (de afwezigheid van) frustraties in de interactie met het systeem (goed design), voldoende stimulans (geen onderbelasting), fysiek comfort en mentaal comfort (geen gevoel van onveiligheid).

3.3 Human Factors onderzoek tijdens fase 1

3.3.1 Opzet

Tijdens fase 1 is een beperkte start gemaakt met HF-onderzoek. Tijdens de testweek hebben machinisten van de vervoerder en treindienstleiders van Post Groningen na elke testnacht een vragenlijst ingevuld. Met de machinisten is vervolgens na de testweek een gesprek gevoerd waarin dieper werd ingegaan op hun ervaringen tijdens testweek, wat zij hebben geleerd, welke aanbevelingen zij hebben en hoe zij de toekomst van ATO zien. Hierdoor kon een eerste indruk worden gevormd van hoe machinisten ATO beleven.

3.3.2 Resultaten

Treindienstleiders

Door Post Groningen is enthousiast meegewerkt aan de proef. Omdat tijdens de testweek weinig 'ander werk' als gevolg van ATO werd waargenomen, ten opzichte van het reguliere werk van de treindienstleider, is er geen direct resultaat te benoemen van het werken met ATO en de gevolgen voor de taken van de treindienstleider.

Machinisten

Door de aard van de testweek konden de risico's op de drie elementen van HF-onderzoek met machinisten nog niet voldoende beoordeeld worden. Het HF-deel tijdens deze testritten was vooral gericht op het ophalen van informatie voor vervolgtesten met ATO. Ook is informatie ingewonnen die input kan leveren voor verandermanagement. Het vraaggesprek en de vragenlijsten geven input aan het ontwerp van een interface/display (belangrijk voor prestatie, veiligheid en taaktevredenheid) en over de ATO-rijstijl (belangrijk voor de taaktevredenheid en ook enigszins prestatie in termen van reizigerscomfort).

Hieronder een selectie van de door de machinisten verstrekte observaties en aanbevelingen:

Algemeen:

- Bijeenkomsten vooraf aan de testweek waren waardevol omdat voor de testmachinisten duidelijk werd wat ATO GOA 2 doet en wat van de machinisten werd verwacht
- Bij niet goed functioneren van het ATO-systeem (vooral tijdens de eerste nachten) was het ingrijpen makkelijk doordat de hendel maar aangeraakt hoefde te worden om ATO uit te zetten
- Rijden met ATO geeft een heel andere rijervaring dan eigen rijgedrag (met name bij remmingen; ATO stelt de remming uit ten opzichte van het eigen rijgedrag van de machinist)
- Zorg dat in een testfase de actuele infra in het ATO-systeem is ingebouwd
- Betrek collega-machinisten in een vroeg stadium van ATO-ontwikkelingen zodat ze zien, horen en ervaren wat ATO is en ook wat ATO niet is.

Display:

- Tijd en afstand zien wanneer ATO remming gaat inzetten
- De tractie van de trein moet zichtbaar blijven (nu staat dit op het hoofdscherm wat niet meer zichtbaar is als het ATO-scherm open staat)
- Zien of ATO aan of uit staat
- Bij overwegen kunnen zien hoe lang het nog duurt totdat ATO de trein in beweging gaat zetten
- Deurvrijgave zichtbaar maken
- Overzicht geven van de dienstregeling.

Veiligheid:

- Gladde sporen: ATO trekt hard op en remt hard af, dit kan met gladde sporen wielslip geven. Zelfs wanneer dit niet tot objectief onveilige situaties leidt, wordt het door machinist als erg onprettig ervaren en kan het leiden tot onnodig ingrijpen. Aanbeveling: onderzoek hoe ATO op gladde sporen reageert.
- Zorgen dat tijdens testsituaties stoptijd op stations bij overwegen in combinatie met doorgaande rijwegen niet meer dan 10 seconden bedraagt, om gevaarlijke situaties met weggebruikers te voorkomen.
- ATO remt hard en schokkerig richting haltering en trekt hard op, gevolgd door schokkerig remmen als de baanvaksnelheid wordt bereikt en overschreden, wat ten koste gaat van reizigerscomfort (vallende reizigers). De machinisten geven aan dat het zou helpen als ATO minder schokkerig rijdt.
- Als ATO wordt ingevoerd, zorg dan dat nieuw op te leiden machinisten ook zonder ATO kunnen rijden zodat zij weten hoe en wanneer op het systeem in te grijpen als het systeem verkeerde beslissingen neemt.

3.4 Human Factors onderzoek tijdens fase 2

3.4.1 Doelstellingen Fase 2

De doelstellingen van dit deel van het HF-onderzoek waren:

- Bepalen welke informatie nodig is vanuit de baan/ProRail systemen voor een bruikbaar DMI
- Ontwerp van de Driver Machine Interface (DMI) verbeteren voor veilige en betrouwbare uitvoering van de tests
- Vervoerders adviseren in het uitvoeren van Human Factors onderzoek van de vervoerder

3.4.2 Uitgangspunten

- ProRail bepaalt niet de uiteindelijke ontwikkeling van de DMI.
- ProRail werkt als infrabeheerder non-discriminatoire en deelt haar kennis met al haar klanten en opdrachtnemers gelijkwaardig. Met inachtneming van privacygevoelige of concurrentiegevoelige informatie; deze wordt uiteraard niet gedeeld.

3.4.3 Methode

3.4.3.1 Opzet HF-onderzoek

Dit Human Factors onderzoek is een vervolg op het HF-onderzoek tijdens fase 1 en richt zich op machinisten. Er werd door dezelfde twee testmachinisten aan meegewerkt.

De benodigde informatie werd als volgt verzameld:

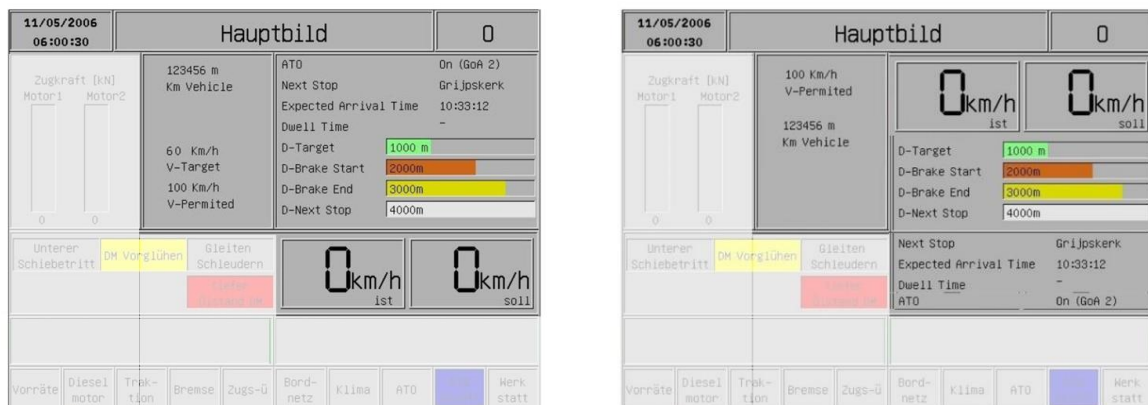
- Machinisten vulden vragenlijsten in na elke testnacht
- Machinisten werden na elke week geïnterviewd
- Machinisten werden geïnterviewd na afronding van de testweken tijdens Fase 2, door ProRail, aan de hand van de resultaten van de vragenlijsten en de tussentijdse interviews van Arriva

- Machinisten werden nogmaals geïnterviewd na de apart ingeplande testritten met reizigers
- Indien tussentijdse aanpassingen nodig waren o.b.v. kritische signalen van de machinisten, nam Arriva contact op met Stadler. Aanpassingen werden vervolgens door Stadler verwerkt in de vernieuwde versie.

3.4.3.2 Uitvoering HF-onderzoek

DMI-aanpassingen

ProRail heeft de gewenste aanpassingen in de vorm van mock-ups, per mail aangeleverd aan Stadler om toe te werken naar een gebruiksvriendelijker DMI. Aanpassingen betroffen vooral het groeperen van informatie en plaatsing van informatie zodat de aandacht en blik direct wordt getrokken naar de belangrijkste informatie en op een natuurlijke manier naar de overige informatie wordt geleid. Waar relevant is de terminologie iets verduidelijkt. Daarnaast is ervoor gekozen om de testmachinisten een verklarende lijst te geven. Dit is als positief en voldoende ervaren door de testmachinisten. In onderstaande figuren is eerst een door Stadler gemaakte mock-up van de DMI te zien. Daaronder staat de eerste mock-up die door het HF-team is gemaakt. De lichte gedeelten bevatten niet-ATO-gerelateerde informatie. De aandacht wordt automatisch getrokken door de twee grote cijfers. Door deze bovenaan te plaatsen, ontstaat een natuurlijke zichtlijn van boven naar beneden. Vaak veranderende informatie, zoals Brake Start, is naar boven gehaald en de slechts sporadisch veranderende informatie zoals volgende stationsnaam, is naar onder geplaatst. De belangrijkste verandering in latere versies is de toevoeging van de Driving Mode.



Figuur 3.2: Eerste versie DMI (links) en HF-versie DMI (rechts)

Dataverzameling

Eén testmachinist heeft de vragenlijsten niet ontvangen, de andere machinist heeft deze wel ontvangen en ingevuld. De ingevulde vragenlijsten zijn gedeeltelijk vooraf en gedeeltelijk na het eindinterview ontvangen. Er heeft één tussentijdse update plaatsgevonden. Het eerste eindinterview ter afsluiting van de 'reguliere' testritten is uitgevoerd op 3 februari 2020. Het tweede eindinterview ter afsluiting van de testritten met reizigers is uitgevoerd op 26 maart 2020.

3.5 Resultaten HF-onderzoek

3.5.1 ATO-rijstijl

Tijdens de eerste testweken waren er regelmatig ATO-storingen en was ook niet altijd de gewenste informatie beschikbaar op de DMI. Een aantal problemen in de ATO-rijstijl zijn gedurende de testweken opgelost, waaronder:

- Acceleratie van ATO tijdens een roodseinnadering, waardoor de machinist moest ingrijpen.
- Optrekken van ATO. ATO trok aanvankelijk op met 100%. De manier waarop ATO optrekt lijkt volgens de testmachinisten iets te zijn aangepast. De machinisten geven aan dat ATO bij glad spoor nog te sterk zal optrekken.

- Snelheid waarmee ATO door de wissel reed (aanvankelijk te hoog voor comfortabel rijden)
- Incorrecte, of het ontbreken van informatie op de DMI (de afstands balkjes voor 'Target' en 'Brake End' werkten niet). Dit is door Stadler opgelost door deze informatie helemaal weg te laten, aangezien de machinisten geen belang hechtten aan deze informatie en het niet misten. Dit gaf een rustiger beeld en maakte het makkelijker om snel de relevante informatie te zien.

Bij de laatste softwareversie van ATO, werd de rijstijl van ATO als positief ervaren. ATO wijkt vooral nog af doordat hij soms wat vroeger tot stilstand komt bij een haltering en dan weer gaat optrekken, terwijl een machinist de trein zou laten uitrollen. Daarnaast zijn er wel plekken waar de machinist extra alert moet zijn. Bij de aankomst op Buitenpost rijdt ATO precies op de ATB-remcurve. Omdat ATO zo dicht op de ATB-remcurve rijdt, is er heel weinig ruimte voor fouten. Er hoeft maar een klein beetje glad spoor te zijn en je hebt gelijk een ATB-ingreep.

De rijstijl van ATO onder glad spoor is nog een open vraag. Daarnaast is het onbekend wat de invloed is van ATO's 'krappe' rijstijl op de machinist die langdurig rijdt en al dan niet ATB-ingrepen ervaart. Dit zijn thema's voor vervolgonderzoek.

3.5.2 DMI-informatie

Welke informatie moet er minimaal getoond worden op de DMI?

De machinisten waren positief over de DMI. Zij gaven aan veel te kijken naar Brake Start (een afstandsindicatie in meters waar gestart wordt met remmen die continue wordt bijgewerkt) en Next Stop (afstandsindicatie tot de volgende stop in meters). Dit bleek voor hen essentiële informatie te zijn. Bij het naderen van een station controleerden ze Brake Start om te kijken wanneer de trein zou starten met remmen. Tijdens de remming zelf keken ze vooral naar buiten om zelf in te schatten of het goed gaat. Wanneer de trein op heel lage snelheid langs het perron reed, keken ze naar de afstands balk bij Next Stop, om te controleren of ATO niet te ver langs het perron zou doorschieten. Eén machinist keek wel naar V-Target (doelsnelheid), de ander niet. Direct na het passeren van een vierkant snelheidsbord met hogere toegestane snelheid, verandert V-Target en gaat de trein accelereren. De machinist controleerde of V-Target overeenkwam met de toegestane baanvak snelheid en of deze bijvoorbeeld niet te hoog was (100 km/u bij snelheidsbord 80 km/u). De driving mode werd ook bekeken, vooral om bevestigd te zien dat de trein in coasting (uitrollen) of cruising (vasthouden constante snelheid) was. In de allerlaatste versie zouden ook V-Setting (actuele snelheid) en V-Target grijs zijn geworden tijdens coasting, wat positief werd ervaren door de machinist die deze laatste rit heeft gereden.

Beide machinisten gaven aan niet naar V-setting te kijken, omdat dit overeenkomt met de actuele snelheid. De machinisten gaven aan niks gedaan te hebben met Door Side Selection. De machinisten keken ook niet naar de dienstregelingsinformatie, omdat deze niet klopte, vanwege het feit dat de dynamische planning tijdens deze testen nog niet werd meegenomen. Voor de testritten misten de testmachinisten dit niet. De testmachinisten vinden het wel relevant voor reguliere ritten. Target en Brake End, werden tijdens de testritten onjuist weergegeven, maar de bedoelde informatie werd door de machinisten niet gemist.

Voor het overzicht en het in één opslag kunnen zien van de juiste info (vooral Brake Start en Next Stop), is het belangrijk om zo min mogelijk informatie op de DMI te tonen. De machinisten ervaren de DMI niet als afleidend wanneer ATO is ingeschakeld, maar tijdens ritten zonder ATO is de ATO-DMI wel afleidend. Tijdens de testritten met reizigers heeft de testmachinist meerdere malen zonder ATO gereden en ervaren dat de ATO-DMI dan wel informatie toont. Verandering in de informatie kan dan afleiden omdat de visuele periferie zeer vatbaar is voor het signaleren van veranderingen. Het wordt daarom geadviseerd om geen informatie te tonen op de DMI als ATO uitstaat.

Samenvattend is het antwoord op de vraag aan de machinisten: Welke informatie moet er minimaal getoond worden op de DMI?:

- Zo min mogelijk informatie

- Brake Start
- Next Stop
- Driving Mode (in ieder geval coasting vs niet-coasting)
- V-Target
- Dienstregelingsinformatie bij reguliere ritten (niet nodig voor testritten)

Hoewel het advies is om zo min mogelijk informatie te tonen (en géén informatie te tonen als ATO uit staat), is het mogelijk dat er een grotere informatiebehoefte is als er onder andere omstandigheden wordt gereden. Bovenstaande informatie is minimaal noodzakelijk.

3.5.3 Adviezen en kanttekeningen voor vervolgprouven

Periodekeuze: glad spoor

De testweken vonden plaats in de herfst, met daarmee grote kans op gladde sporen. Beide machinisten gaven aan dat de aanwezigheid van gladde sporen invloed heeft gehad op het uitvoeren van de ATO-testen. Het was duidelijk voor de machinisten dat de omgang van ATO met gladde sporen buiten de scope van deze testritten viel. De machinisten hebben daarom geadviseerd om in het vervolg niet tijdens de herfst te testen. Als er geen glad spoor is, kan de testmachinist namelijk goed inschatten of hij moet ingrijpen of niet, aangezien hij ziet hoeveel afstand er nog is tot het stoptonend sein en uit ervaring weet hoe lang de remweg van de trein is. Bij gladde sporen is het echter zeer onzeker hoe lang de daadwerkelijke remweg van de trein is. Ook tijdens de huidige treindienst (reguliere ritten) bestaat deze onzekerheid bij glad spoor. Om de veiligheid te bewaken, moest de testmachinist daarom voor de zekerheid in deze situaties vroeg ingrijpen. Pas als de trein tot stilstand was gekomen op het gladde spoor, werd zichtbaar of het ingrijpen zo vroegtijdig nodig was. De testmachinist kan onder deze omstandigheden dus wel goed de veiligheid bewaken, maar minder goed zijn rol als testmachinist uitvoeren die zo min mogelijk ingrijpt. De machinisten gaven aan dat ze de testen niet willen laten mislukken door te veel op het ATO-systeem in te grijpen, maar bij glad spoor tijdens een roodseinnadering voelde dit niet als een keuze. Ze zijn immers eindverantwoordelijk voor de veiligheid en willen zeker geen roodseinpasseage. Vandaar de aanbeveling om geen vervolgtesten uit te voeren in het herfstseizoen.

Goede samenwerking in testteam

De interactie en samenwerking met Stadler-medewerkers is als zeer positief ervaren door de machinisten. Ook de testleider op de post en de treindienstleiders van Post Groningen werkten goed mee. De samenwerking met Strukton (Beproevingstestleider) was ook goed, met een duidelijke focus op veiligheid. De machinisten vonden het prettig om steeds met dezelfde mensen samen te werken. Dit kwam het testen ten goede.

Communicatie vooraf

We raden aan om voor vervolgprouven te waarborgen dat er tijdig wordt gecommuniceerd met de testmachinisten voorafgaand aan de tests.

3.6 Vervolgonderzoek

Een aantal vraagstukken kon niet goed worden onderzocht tijdens de proef, gezien de testomstandigheden, duur en kleine aantal testmachinisten. De reacties van de machinisten kunnen wel gezien worden als een indicatie dat het om interessante onderzoeksonderwerpen gaat.

Rijden met ATO roept onder meer vragen op over:

- De kans dat aandacht van de machinist sneller verslapt
- De kans dat het beroep als saaier wordt ervaren
- Het gevoel van controle: groter bij rijden zonder ATO
- Onduidelijkheid of rijden mét ATO vermoeiender is; het wordt in ieder geval tijdens het testen niet als minder vermoeiend ervaren en rijden zonder ATO vinden de

testmachinisten relaxter. Overigens is dit voor de hand liggend gezien de fase in de ontwikkeling.

- De locatie van de DMI: de huidige locatie was acceptabel voor testritten. De ideale locatie lijkt hen recht voor de machinist is, maar dat is in dit stadium onmogelijk omdat tijdens de test gewerkt werd met een scherm dat al is ingebouwd in het besturingspaneel.
- Ingrijpen: nadat de machinist heeft moeten ingrijpen, is hij alerter. Wanneer de oorzaak bekend is van de ATO-fout, dan geeft dat rust. Het is onbekend wat de invloed is van langdurig rijden met ATO die fouten vertoont en het al dan niet het beschikbaar zijn van informatie over de oorzaak van de ATO-fout. Dit vraagt om nader onderzoek.

4 Dienstregelings simulaties

4.1 Inleiding

In deze simulatiestudies worden twee varianten voor het aansturen van treinen onderling vergeleken:

- Zonder ATO: Model van het rijgedrag van machinisten in het studiegebied gebaseerd op realisatiedata van 2018.
- Met ATO: Automatic Train Operation met Grade of Automation 2 (GoA2), ofwel automatische besturing met een machinist die nog kan ingrijpen en waarbij het sluiten van de deuren nog door de conducteur of machinist wordt gedaan. Halteer- en vertrekverstoringen wijzigen daarom niet (pas bij GoA4 gebeurt het sluiten van de deuren ook automatisch).

Deze gesimuleerde treinenlopen zijn vervolgens geanalyseerd op hun effecten en baten.

Dit hoofdstuk beschrijft achtereenvolgens de onderzoeksvraag en afbakening, de opzet, de resultaten en de conclusies van dit deel van de verkenning. Op basis daarvan volgen aanbevelingen en worden mogelijke onderwerpen voor vervolgonderzoek genoemd.

4.2 Onderzoeksvraag en afbakening

Dit onderzoek betreft een simulatiestudie naar de effecten van ATO op de lijnen rond Groningen bij de infra en dienstregeling van 2023. Onderzocht is in welke mate er beter volgens plan gereden wordt als alle treinen geautomatiseerd rijden volgens GoA2. Tevens is onderzocht welke effecten dit heeft op punctualiteit. Dit is gedaan door de resultaten te vergelijken met een model van het gedrag van machinisten in dit studiegebied in 2018.

In de praktijk wordt in de uitvoering van de treindienst een zekere variatie gerealiseerd. Deze bandbreedte ontstaat doordat niet elke trein op exact dezelfde wijze rijdt. Mogelijke oorzaken zijn o.a. wisselende omstandigheden, kleine verstoringen, verschillende machinisten. De verwachting is dat de invoering van ATO deze bandbreedte kan versmallen. ATO stuurt in dit onderzoek op de gegeven dienstregeling voor de eigen trein en kijkt dus niet naar de actuele toestand van omliggende treinen. Het resultaat van deze sturing is afhankelijk van de prestatie-indicatoren waarop geoptimaliseerd wordt. In dit onderzoek wordt gestuurd op het minimaliseren van planafwijkingen. Er wordt niet op energieverbruik gestuurd, er wordt bijvoorbeeld geen gebruik gemaakt van uitrollen. Daarvoor is een nog niet beschikbaar wegingsmechanisme tussen punctualiteit, veiligheid en energieverbruik nodig. Mogelijk is dit een onderwerp voor vervolgonderzoek. Dit betekent dat op basis van de uitgevoerde simulaties geen indicatie gegeven kan worden van het te verwachten energieverbruik van ATO. De invoering van ATO zal naar verwachting effect hebben op het rijgedrag van individuele treinen. De onderzoeksvraag is in welke mate daarmee ook de prestatie van alle treinen samen verbetert. Als treinen met ATO beter de planning kunnen waarmaken en vaker op tijd gaan rijden, betekent dat er minder hinder tussen treinen zal ontstaan. Treinen hoeven minder vaak op ongeplande locaties snelheid te verminderen of te stoppen. Beter rijgedrag zal de dagelijkse variatie verkleinen en daarmee effect hebben op de capaciteit en veiligheid van het spoorwegnet, de punctualiteit en mogelijk ook het energieverbruik. Deze hypothese wordt deels gecheckt met de uitgevoerde dienstregelings simulatie.

De effecten worden gekwantificeerd door voor beide varianten de dienstregeling bloot te stellen aan verstoringen. Een dienstregeling bevat buffers om kleine verstoringen en variaties in de dagelijkse praktijk op te kunnen vangen. In geval van grotere verstoringen schieten deze buffers te kort en zijn ingrepen in de planning vereist (bijsturing), denk aan volgorde wisselen, opheffen en omleiden van treinen. In deze studie zijn verstoringen beperkt tot een niveau waarvoor geen dienstregelingsaanpassingen nodig zijn. Onderzocht is dus hoe de normale uitvoering van de treindienst zal presteren. Dit betekent dat dit onderzoek geen uitspraken doet over de effecten bij grotere verstoringen, waarbij een treindienstleider in de praktijk zal gaan ingrijpen.

4.2.1 Toelichting punctualiteit

Punctualiteit is gedefinieerd als het percentage van de reizigers of treinen dat op tijd aankomt. Dit kan dus gaan over reizigerspunctualiteit of treinpunctualiteit. In dit onderzoek zijn treinsimulaties gedaan. Dit houdt in dat de treinpunctualiteit direct uit de simulatieresultaten is af te leiden.

Reizigerspunctualiteit wordt in de praktijk wel gemeten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om de reizigerspunctualiteit af te leiden uit de treinpunctualiteit. Daarvoor zijn aanvullende gegevens nodig over reizigersaantallen. Dit onderzoek richt zich daarom op treinpunctualiteit.

Voor de definitie van 'op tijd' zijn verschillende normen te hanteren. In dit onderzoek is aangesloten bij twee voor de sector belangrijke normen, punctualiteit op 3 minuten (aankomstvertraging ≤ 180 seconden) en punctualiteit tussen -30 en +30 seconden ($-30 \leq \text{aankomstvertraging} \leq +30$ seconden). De eerste is een belangrijke Kritische Prestatie Indicator (KPI) in de vervoersconcessies en de tweede wordt als maat gebruikt om na te gaan in hoeverre de sector klaar is voor een hoogfrequente dienstregeling.

4.2.2 Toelichting capaciteit

Waar punctualiteit goed gedefinieerd is en relatief simpel te bepalen, is dat voor capaciteit lastiger. Er is geen vastgestelde of algemeen geaccepteerde KPI die gebruikt kan worden. In 2017 is een inventarisatie uitgevoerd van hoe er binnen ProRail over capaciteit gedacht wordt.⁴ In deze studie is het effect op capaciteit op twee manieren onderzocht:

Benodigde buffergroottes.

Capaciteit wordt in het algemeen gedefinieerd als het aantal treinen dat per uur kan rijden. Dit wordt mede bepaald door de buffers die in de dienstregeling zijn opgenomen voor het opvangen van planafwijkingen. De buffergrootte bepaalt met welke planafwijking nog gereden kan worden zonder andere treinen te hinderen. In de praktijk krijgt een deel van de treinen een grotere planafwijking dan de buffergrootte en hindert daarmee andere treinen. Treinen die elkaar hinderen hebben een negatief effect op de punctualiteit. Door de buffers te vergroten zullen minder treinen elkaar hinderen. Het effect op de capaciteit hangt af van de situatie. Grotere buffers betekenen niet altijd dat er een geheel aantal treinen per uur minder kan rijden. De buffergrootte is een afweging tussen meer capaciteit en hogere punctualiteit. De in dit onderzoek gesimuleerde varianten hebben als doel om de planafwijkingen te verkleinen om daarmee het verkleinen van deze buffers mogelijk te maken. De planafwijking van de verschillende varianten is daarom vergeleken als indicatie voor hoeveel de buffers gemiddeld verlaagd zouden kunnen worden.

Dit kan echter niet één-op-één vertaald worden naar capaciteit. Per locatie in het netwerk varieert hoeveel beschikbare capaciteit al is gebruikt, hoeveel ATO de planafwijkingen verkleint en hoeveel vervolgens de capaciteit op dat punt verhoogd kan worden.

Uitvoerbaarheid van de gesimuleerde dienstregelingen.

De gesimuleerde dienstregeling voor de spits bevat een extra trein van Warffum naar Groningen en de gesimuleerde dienstregeling voor het dal bevat bijplaatsen en aftrappen van treinen en ieder half uur een brugopening van 6 minuten van de brug over het Noord-Willemskanaal. Onderzocht is wat het effect op de KPI's is voor de verschillende varianten.

4.2.3 Toelichting veiligheid

In dit onderzoek is gekeken naar het aantal ongeplande roodseinnaderingen als maat voor veiligheid. Onder ERTMS-beveiliging is een ongeplande rood sein nadering geen veiligheidsrisico omdat de beveiliging het oprijden van spoor zonder autorisatie voorkomt. Onder NS'54-beveiliging komen stoptonend-seinpassages voor en is een ongeplande roodseinnadering een veiligheidsrisico.

⁴ Netwerkcaciteit op het spoor, B. van Eeken, 2018

4.3 Opzet simulaties

Deze paragraaf beschrijft de opzet van de simulaties. Er is gebruik gemaakt van algemeen geaccepteerde bronnen en methodes binnen ProRail.

De gebruikte software, modellen en hun instellingen worden beschreven en er wordt beoordeeld hoe goed deze de werkelijkheid benaderen. Vervolgens wordt een conclusie getrokken of het simulatiemodel als geheel de werkelijkheid nauwkeurig genoeg representeert om de simulatieresultaten als valide te kunnen beschouwen.

De gebruikte softwareversies worden gegeven in Bijlage 8.2. De belangrijkste verschillen met de software en modellering zoals gebruikt voor de Trein Op de Lijn studies van 2017 worden daar ook beschreven.

4.3.1 Simulatiesoftware FRISO

FRISO simuleert het rijden van treinen over de gegeven infra met het gegeven materieel en volgens de gegeven dienstregeling, waarbij rijmodellen het rijgedrag bepalen. Daarbij wordt rekening gehouden met:

- Wisselomlooptijden
- De locatie van aankondigingspunten
- Een gefaseerde rijweginstelling
- Het aantal in te stellen seinstappen per Primair ProcesLeidings Gebied (PPLG)
- Instelvoorschriften
- Een minimale halteertijd
- Materieelaansluitingen
- Beveiligingssysteem (NS'54 met seinverbetering volgens ATB of ERTMS level 2)
- Bovenleidingspanning (1500 V of Diesel)
- Hellingen

FRISO gebruikt een eenvoudig model van procesleiding. De geplande dienstregeling wordt niet aangepast en rijweginstelling wordt conform ARI (Automatische RijwegInstelling) gedaan. Dit komt overeen met de praktijk bij kleine verstoringen. FRISO kent geen treindienstleider die in het geval van grotere verstoringen bijstuurt op de geplande dienstregeling en rijweginstelling. Voor scenario's waar dit aan de orde is kan een combinatie van FRISO met een echte treindienstleider worden ingezet. Dit valt buiten de scope van dit onderzoek.

Een uitgangspunt in de simulatie is dat te vroeg vertrekken niet is toegestaan. Voor ATO wordt aangenomen dat ook in de praktijk niet te vroeg zal worden vertrokken. Uit de realisatiedata van 2018 blijkt dat ook zonder ATO nauwelijks te vroeg wordt vertrokken in het studiegebied Groningen. Slechts 5% van de treinen die daar rijden vertrok meer dan 5 seconden te vroeg en het effect daarvan is gering.

4.3.2 Rijmodellen

Een rijmodel simuleert het rijgedrag van een machinist of trein. Bij een simulatie van meerdere treinen wordt elke trein met dit rijmodel gesimuleerd. Er is een rijmodel gemaakt dat het machinistengedrag in 2018 benadert en ook van ATO is een rijmodel gemaakt. Hieronder worden de functionele eigenschappen en gekozen instellingen van deze rijmodellen toegelicht.

4.3.2.1 Zonder ATO

Dit model benadert het rijgedrag van machinisten in 2018. Voor deze studie is hiervoor niet de Agent (modellering van het rijgedrag van machinisten middels machine learning op basis van realisatiedata 2018) gebruikt omdat de ontwikkeltijd te kort was voor een juiste implementatie van het rijgedrag in het studiegebied Groningen. In plaats daarvan zijn verstoringen in aanzet en maximumsnelheid toegevoegd en zijn de uitkomsten van de simulatie vergeleken met de realisatiedata van 2018. Iteratief zijn deze verstoringen verfijnd totdat de benadering voldoende goed was. In Bijlage 8.2 wordt

een vergelijking van de simulatie met realisatiedata 2018 gegeven. Een kanttekening hierbij is dat de infra en dienstregeling in de gesimuleerde situatie van 2023 anders zijn dan die van de realisatiedata 2018. In 2023 zitten minder afhankelijkheden maar rijden er meer treinen. De benadering is op gedrag en een exacte overeenkomst tussen simulatie 2023 en realisatie 2018 is niet te verwachten.

De gebruikte verstoringen worden in de onderstaande tabel gegeven. Voor de aanzetversnelling zijn de verstoringen relatief t.o.v. de door Ricardo Rail aangeleverde materieelkarakteristieken. Voor de maximumsnelheid zijn de verstoringen relatief t.o.v. de maximumsnelheid zoals gegeven door seinbeelden en snelheidsborden.

Treintype	Proces	Verstoring (relatief t.o.v. maximum)
Intercity's	Aanzetten	$\min(1.2, \max(0.7, \text{Normal}(0.93, 0.12)))$
	Maximumsnelheid	$\min(1, \max(0.85, \text{Normal}(0.93, 0.05)))$
Stoptreinen	Aanzetten	$\min(1.2, \max(0.7, \text{Normal}(0.95, 0.12)))$
	Maximumsnelheid	$\min(1, \max(0.9, \text{Normal}(0.95, 0.04)))$
Sneltreinen	Aanzetten	$\min(1.2, \max(0.7, \text{Normal}(0.95, 0.12)))$
	Maximumsnelheid	$\min(1, \max(0.9, \text{Normal}(0.95, 0.04)))$
Sprinters	Aanzetten	$\min(1.2, \max(0.7, \text{Normal}(0.93, 0.12)))$
	Maximumsnelheid	$\min(1, \max(0.85, \text{Normal}(0.93, 0.05)))$
Leeg Materieel	Aanzetten	$\min(1.2, \max(0.7, \text{Normal}(0.95, 0.12)))$
	Maximumsnelheid	$\min(1, \max(0.9, \text{Normal}(0.95, 0.04)))$

Deze verstoringen zijn onafhankelijk van of het spits of dal is en onafhankelijk van de mate van vertraging. Het rijgedrag verandert dus niet als een trein te vroeg of te laat is. Voor iedere trein wordt een loting gedaan uit de genoemde verdeling. Het rijgedrag van iedere trein is dus anders.

4.3.2.2 Met ATO

ATO met GoA2 is gemodelleerd. GoA2 betekent automatische besturing van tractie en rem waarbij de machinist verantwoordelijk blijft en kan ingrijpen. Het sluiten van de deuren wordt nog door de conducteur of machinist gedaan. Het ATO-rijmodel is voor dit onderzoek toegevoegd.

Deze variant beschikt alleen over het originele rijplan en probeert dat altijd zo goed mogelijk te volgen. Het model heeft verder de volgende eigenschappen:

- De door ATO berekende snelheid is dynamisch. Afhankelijk van de actuele positie van de trein ten opzichte van de dienstregeling zal ATO proberen op schema te blijven, vertraging in te halen of voorsprong op de dienstregeling terug te brengen. De dienstregeling is hierbij de vooraf gegeven dienstregeling en is dus statisch.
- ATO berekent bij iedere acceleratie of deceleratie en bij iedere seinpassage opnieuw de gewenste snelheid (vaker hoeft niet omdat de situatie dan niet wezenlijk anders wordt). Dit gebeurt lokaal en is dus zeer snel. In de simulatie is hiervoor 0 seconden genomen.
- Vertragingen worden geminimaliseerd op aankomsten en alle doorkomsten. Een trein zal dus altijd proberen zo snel mogelijk de vertraging in te lopen en niet pas op het volgende voor de dienstregeling kritische punt (bijv. knooppunten).
- Er wordt niet op energieverbruik geoptimaliseerd.
- Er wordt gebruik gemaakt van cruisen gevolgd door remmen en niet van uitrollen (coasting). In de praktijk wordt verwacht dat een combinatie van uitrollen en cruisen gebruikt gaat worden. Met beide rijstrategieën kan evengoed volgens plan gereden worden. Dit heeft nauwelijks invloed op de spreiding van de aankomsttijden. Dit heeft wel invloed op het energieverbruik. Met ATO zou ook gebruik kunnen worden gemaakt van uitgesteld remmen en remmen met een hogere remvertraging om vertragingen in te lopen of geplande rijtijden te verkleinen. Dit is in deze studie niet uitgevoerd.
- Gewenste snelheden worden afgerond op 1 km/h.

- Er wordt aangezet volgens de door Ricardo Rail geleverde materieelkarakteristieken. Voor ATO is de aanzetversnelling niet beperkt tot een bepaald percentage hiervan.
- Omdat GoA2 gemodelleerd is (het sluiten van de deuren gebeurt nog niet automatisch) zijn halteer- en vertrekverstoringen hetzelfde als voor de variant zonder ATO.

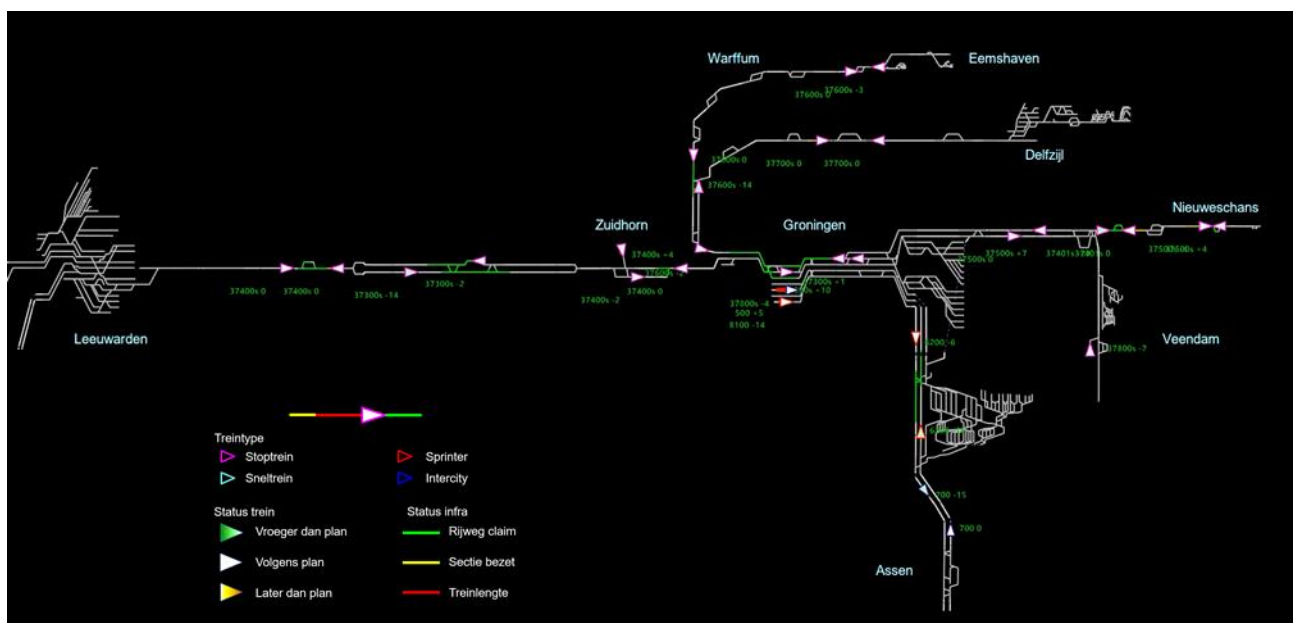
4.3.2.3 Gemeenschappelijke kenmerken Zonder ATO en Met ATO

De varianten zonder en met ATO hebben de volgende gemeenschappelijke kenmerken:

- Alle treinen rijden zonder ATO of alle treinen rijden met ATO.
- Indien de beveiliging een lagere snelheid afdwingt wordt eenparig geremd zodanig dat de aangegeven snelheid 50 meter voor het vereiste punt wordt bereikt.
- Treinen mogen op Geel seinbeeld vertrekken en hoeven niet te wachten op Groen of het beste seinbeeld. Voor ATO is dit toegestaan en in de huidige praktijk zonder ATO komt vertrekken op Geel door machinisten ook voor.
- Vertrek vóór de geplande vertrektijd is niet toegestaan.
- Minimale halteertijden moeten in acht worden genomen. Bij aankomst-vertrek is dit 60 seconden. Bij een korte stop is dit 30 seconden voor Sneltreinen en Stoptreinen (éénmansbediening), 42 seconden voor Sprinters en 48 seconden voor Intercity's (in Assen).
- In de spits rijden Sneltreinen en Stoptreinen met GTW 6 (3+3) behalve de Zuidhornpendel en de spitstoevoeger van Warffum naar Groningen die met GTW 3 rijden. In het dal rijden Sneltreinen en Stoptreinen met GTW 3, na bijplaatsen met GTW 6 (3+3) en na aftrappen weer met GTW 3. Intercity's rijden met DDZ 10 en Sprinters met SLT 6 in zowel de spits als het dal.

4.3.3 Geografie

Het studiegebied bevat de trajecten van Groningen naar Leeuwarden, Eemshaven, Delfzijl, Bad Nieuweschans, Veendam en Assen plus de opstelsterreinen in Groningen. Dit gebied is gekozen omdat de live test met ATO op het traject Groningen-Zuidhorn-Buitenpost plaatsvindt. De overige trajecten zijn meegenomen om het effect van ATO in dit grotere gebied te onderzoeken.



Figuur 4.1: Overzicht van het studiegebied

4.3.4 Infrastructuur

De infra-gegevens 2023 zijn aangeleverd vanuit Infra Atlas. Deze data bevat alle snelheidsborden, wissels, lassen, seinen en seinbeeldrelaties.

De infra 2023 bevat 3 doorgaande perronsporen voor reizigerstreinen in Groningen, 4 sporen tussen Groningen Losplaats en Groningen, de ESGL (Extra Snelrein Groningen – Leeuwarden) aanpassingen tussen Groningen en Leeuwarden (snelheidsverhogingen en dubbelspoor tussen Hoogkerk en Zuidhorn), aanpassingen op Sappemeer Oost – Zuidbroek in het kader van introductie sneltreinen Groningen – Winschoten vv, en het nieuwe opstel terrein van Arriva in de vork.

4.3.5 Dienstregeling

Gesimuleerd is het BUP (Basis Uur Patroon) van 2023 voor de spits en voor het dal. Deze is gemaakt door Martin van den Berg van de afdeling VACO van ProRail, volgens de inzichten van dat moment.

De dienstregeling voor de spits bevat een extra trein van Warffum naar Groningen.

De dienstregeling voor het dal bevat bijplaatsen en aftrappen van Arrivatreinen en ieder half uur een brugopening van 6 minuten (van .27 tot .33 en van .57 tot .03) van de brug over het Noord-Willemskanaal. Voor bijplaatsen en aftrappen van Arriva treinen is een schema van 6 uur gesimuleerd. De simulatie start met korte treinen. In het derde uur wordt bijgeplaatst. Alle treinen van Arriva worden in dat uur in Groningen Losplaats (treinen Groningen Losplaats – Leeuwarden) of Groningen (overige treinen) aangevuld met een extra deel. Deze extra delen komen vanaf het opstel terrein van Arriva in Groningen, of voor de treinen naar Veendam vanaf spoor 50 in Groningen. De extra delen vanaf spoor 50 zijn in het tweede uur vanaf het opstel terrein van Arriva naar spoor 50 gereden. Vervolgens rijden de langere treinen naar hun eindpunt en weer terug naar Groningen en wordt het extra deel weer afgetrapt naar het opstel terrein van Arriva.

Voor het dal bevat de planning van de brugopeningen van de brug over het Noord-Willemskanaal en van bijplaatsen en aftrappen kraptes, waardoor de planning al 'ongeplande' (niet voor een geplande haltering) veel seint passages bevat. Deze kraptes zijn misschien acceptabel, met name bij gebruik van ATO. Onderzocht is hoe dit uitwerkt zonder en met ATO.

Er zijn voor iedere variant voldoende replicaties van 6 uur met steeds andere gelote verstoringen gesimuleerd om statistisch betrouwbare uitspraken te kunnen doen (60 replicaties).

Het eerste uur is gebruikt om het model te vullen ('opstarten' van dienstregeling) en is niet meegenomen in de analyse van resultaten.

4.3.6 Rijweginstelling

Rijweginstelling is conform ARI en de Post Beheer Gegevens van VL-posten voor de Agent en ATO-variant. Hierbij wordt de geplande volgorde van treinen gehandhaafd als deze een gelijk eindspoor hebben. Dit komt overeen met de praktijk bij kleine verstoringen.

4.3.7 Gebruikte realisatiedata

Voor dit onderzoek is een set realisatiedata gebruikt om de simulaties zonder ATO mee te kunnen vergelijken. Op deze data wordt een filtering toegepast om dat deel van de realisatie te verkrijgen dat vergelijkbaar is met de condities van de simulatie: zonder incidenten of grote verstoringen. De volgende stappen zijn doorlopen om een relevante set gegevens uit de realisatie te selecteren:

- De data beslaat alle werkdagen in de periode 09-12-2017 t/m 09-12-2018 (dienstregeling-jaar 2018).
- Slechte dagen zijn verwijderd (dagen met 10 % lagere punctualiteit bij aankomst dan gemiddeld en dagen met 10 % minder treinen dan gemiddeld).
- Treinen met aankomstvertragingen onder -20 of boven +20 minuten zijn verwijderd net als treinen die meer dan 5 minuten te vroeg vertrekken.
- Treinen met activiteiten vóór 06:00 uur of na 11:00 uur zijn verwijderd voor de spits, en treinen met activiteiten vóór 10:00 uur of na 16:00 uur zijn verwijderd voor het dal.
- Ook treinen met entreevertraging kleiner dan -6 of groter dan 6 minuten zijn verwijderd (de simulatie heeft geen entreevertragingen buiten dit interval), en treinen met kleinere of grotere vertragingen onderweg dan in de simulatie voorkomen.

4.3.8 Verstoringen

De simulaties worden gevoed met verstoringen bij entree en bij ieder vertrek. Dit zijn stochastische verstoringen die worden getrokken uit kansverdelingen. Deze kansverdelingen verschillen per treinserie, dienstregelpunt en activiteit (eerste doorkomst, ieder vertrek). De kansverdelingen zijn gefit op de realisatiedata zoals beschreven in paragraaf 4.3.7 stap 1 t/m 4. Alle kansverdelingen zijn daarna afgekapt zodat verstoringen tussen de -6 en +6 minuten liggen omdat om 'normaal bedrijf' gevraagd wordt.

Verstoringen zijn hetzelfde voor alle varianten. Voor ATO zijn verstoringen bij vertrek niet aangepast omdat ATO GoA2 is gesimuleerd waarbij het sluiten van de deuren nog steeds door de bemanning wordt gedaan. Pas bij ATO GoA4 gebeurt het sluiten van de deuren automatisch en zullen verstoringen bij vertrek mogelijk kleiner worden.

Voor iedere gesimuleerde variant worden exact dezelfde verstoringen toegepast (naast dezelfde verdeling ook exact dezelfde waarden).

4.3.9 Inschatting validiteit simulaties

In een algemene validatie van verschillende simulatietools zijn ongehinderde rijtijden in FRISO (waarbij wordt aangezet volgens de door Ricardo Rail geleverde materieelkarakteristieken, de maximaal toegestane snelheid wordt gereden en met dienstremming wordt geremd) door het prestatieanalyse bureau vergeleken met de snelste 10^e percentiel van de realisatie voor een aantal treinen en aantal trajecten in Nederland. Rijtijden komen redelijk overeen, vergelijkbaar met Open Track en RailSys, waarbij de kwaliteit van het model belangrijker blijkt dan het gebruikte tool. Ook zijn veel FRISO-simulaties op VL-posten getoond. Simulaties werden als herkenbaar gezien en vooraf gesignaleerde conflicten bleken ook in werkelijkheid op te treden.

Het FRISO-model voor Groningen is van voldoende kwaliteit voor een onderlinge vergelijking van de gesimuleerde varianten. Het model is zorgvuldig gemaakt en uitgebreid gecontroleerd, bijvoorbeeld door te testen of treinen op tijd rijden zonder verstoringen en te testen of geen onverwacht grote vertragingen optreden met verstoringen.

De simulatie zonder ATO is voor de spits en het dal vergeleken met de realisatiedata 2018, zie Bijlage 8.2. Dit laat zien dat de simulatie zonder ATO een voldoende mate van overeenkomst heeft met de realisatie voor een eerste inschatting van te verwachten effecten. De simulatie zonder ATO is gebruikt als referentie-variant.

De simulaties zijn nauwkeurig genoeg voor een vergelijking van gesimuleerde varianten, waarmee een indicatie van het relatieve verschil tussen de situatie zonder en met ATO bepaald kan worden. De simulaties zijn echter niet nauwkeurig genoeg om de uitkomsten als absoluut aan te nemen. De werkelijkheid is complexer dan een model, vooral door het gedrag van machinisten en treindienstleiders en door de verstoringen en incidenten die optreden.

4.4 Resultaten simulaties

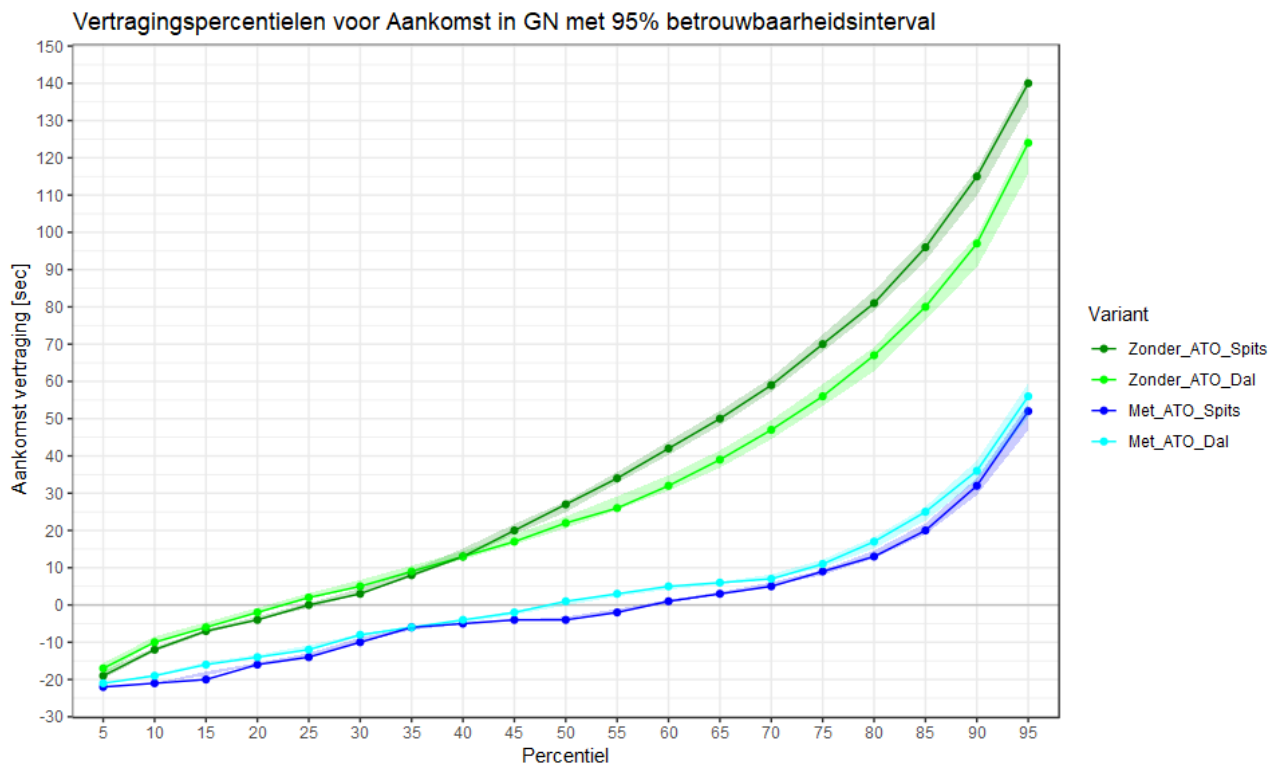
In deze paragraaf worden de resultaten van de uitgevoerde simulaties beschreven. De aankomstvertragingen van ATO worden vergeleken met de situatie zonder ATO. Vervolgens worden de prestaties op de gekozen KPI's beschreven.

Om de potentiële baten in te schatten voor de infra en dienstregeling 2023 voor het studiegebied Groningen zijn de simulaties met ATO vergeleken met de simulaties zonder ATO en niet met realisatiedata van 2018. De simulaties met ATO zijn met dezelfde infra, verstoringen, dienstregeling en treinsamenstelling gesimuleerd als de simulaties zonder ATO, en zijn daarmee beter vergelijkbaar met de simulatie zonder ATO dan met de realisatiedata van 2018 waarin de condities verschillen (andere infra en dienstregeling).

De vergelijking is uitgevoerd voor de spitsdienstregeling inclusief de extra trein van Warffum naar Groningen, en voor de daldienstregeling inclusief bijplaatsen en aftrappen en brugopeningen van de brug over het Noord-Willemskanaal.

4.4.1 Vergelijking aankomstvertragingen

Als eerste zijn de varianten vergeleken op vertragspercentielen bij aankomst in Groningen omdat dit een genuanceerder beeld geeft en meer inzicht dan alleen een vergelijking op enkele KPI's. De vertragspercentielen bij aankomst zonder ATO en met ATO worden voor de spits en het dal gegeven in figuur 4.2. De aankomstvertraging bij een percentielwaarde kan gezien worden als de maximale vertraging waar dat percentage treinen onder blijft. Bijvoorbeeld, bij het 90^e percentiel van de situatie zonder ATO staat 115 seconden voor de spits. Dit betekent dat 90% van de treinen een vertraging heeft kleiner dan 115 seconden.



Figuur 4.2: Vertragspercentielen met en zonder ATO

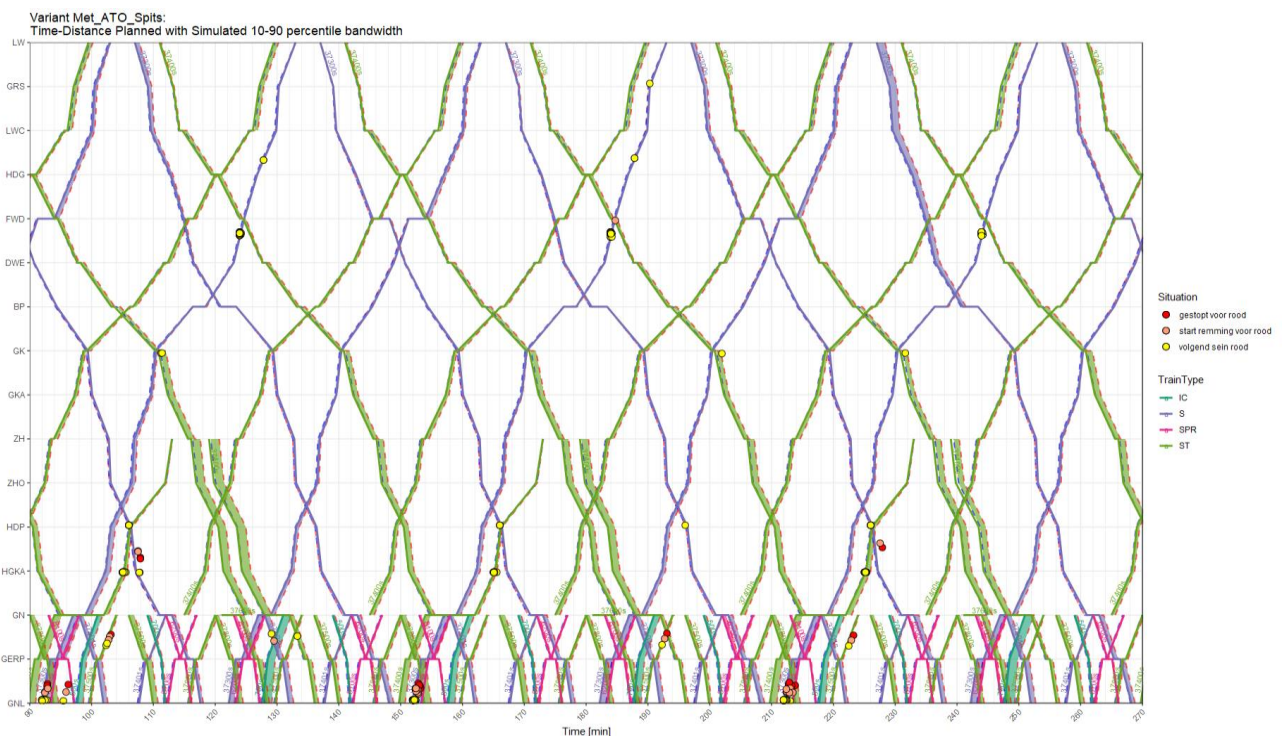
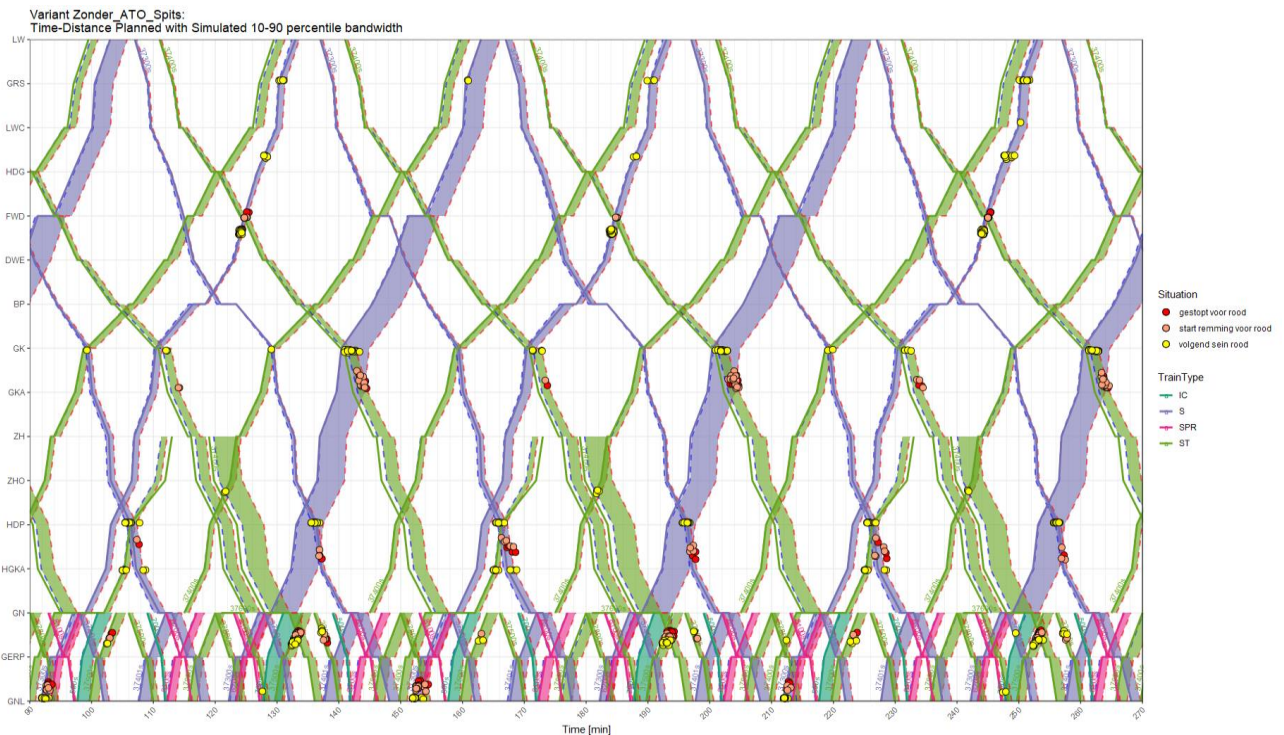
Te zien is dat afwijkingen van het plan bij aankomst in Groningen met ATO veel kleiner zijn dan zonder ATO. Ook is de spreiding met ATO veel kleiner:

- Met ATO komt ruim 85% van de treinen met een afwijking kleiner dan 30 seconden aan terwijl dit zonder ATO minder dan 55% is voor de spits en minder dan 60% voor het dal.
- Met ATO is de bandbreedte van het 5^e tot het 95^{ste} percentiel 75 seconden terwijl dit zonder ATO 160 seconden is voor de spits en 145 seconden voor het dal.
- Met ATO is het 95^{ste} percentiel van de vertragingen 55 seconden terwijl dit zonder ATO 140 seconden is voor de spits en 125 seconden voor het dal.
- Met ATO zijn de vertragingen in de spits nauwelijks hoger dan in het dal terwijl zonder ATO de vertragingen in de spits groter zijn dan in het dal. In de spits rijden 19 treinen, in het dal (exclusief bijplaatsen en aftrappen) 16 treinen. De situatie met ATO is dus beter bestand tegen een verhoging van het aantal treinen dan de situatie zonder ATO.

De aankomstvertragingen met ATO zijn veel meer om het nulpunt geconcentreerd. Een grote verbetering ten opzichte van de situatie zonder ATO.

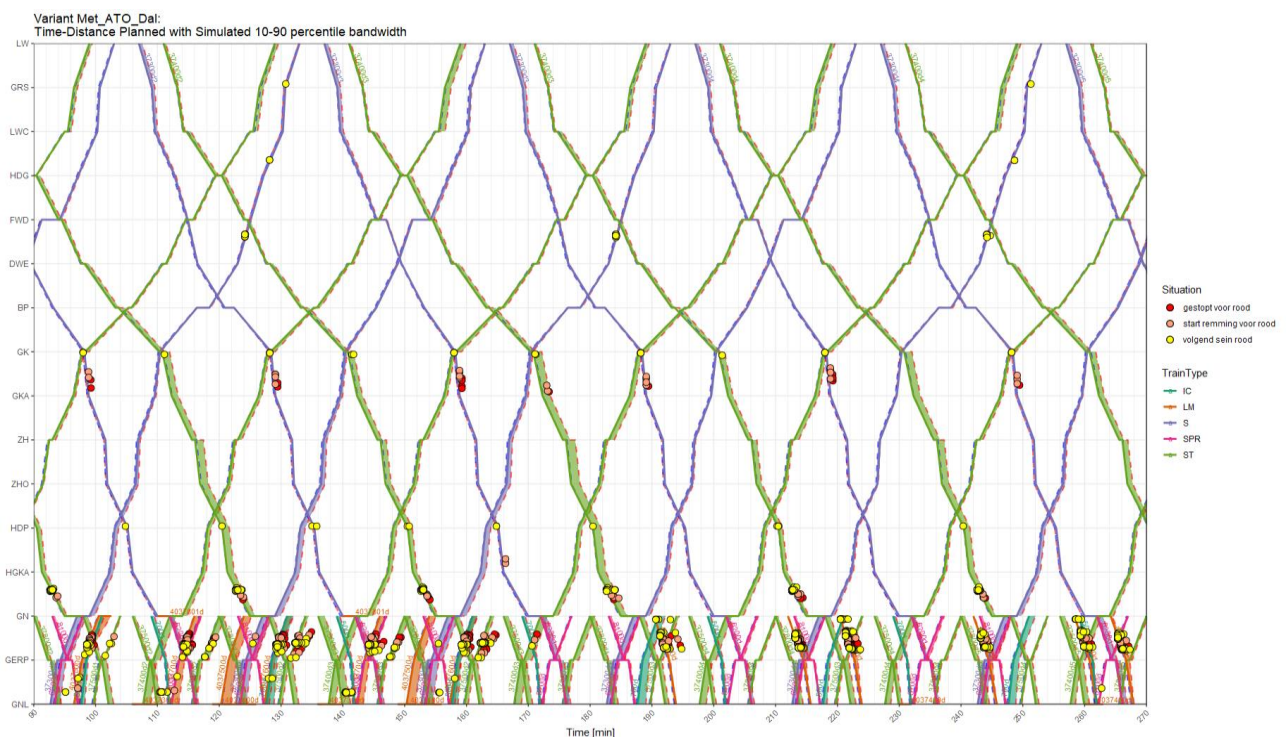
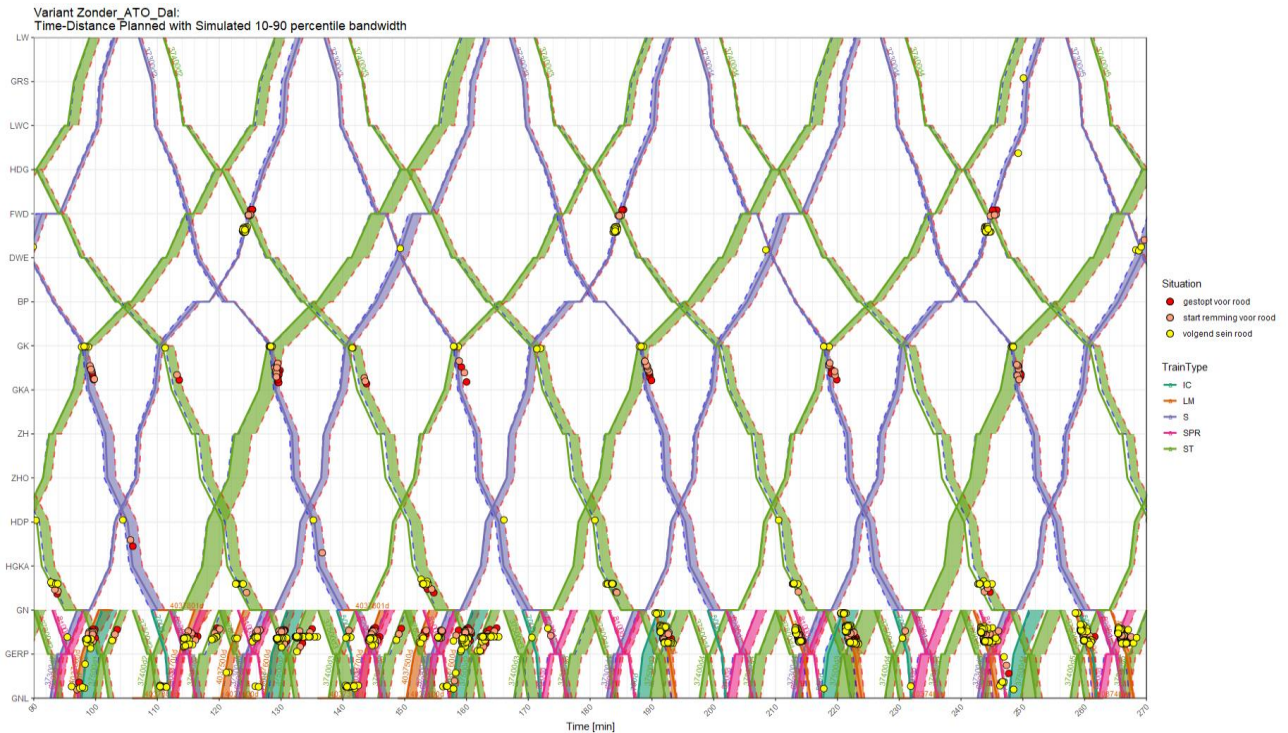
De extra trein van Warffum naar Groningen in de spits is overigens ook zonder ATO goed uitvoerbaar. Tevens leiden de krptes in het dal niet tot bijzondere problemen zonder ATO. Met ATO zijn de prestaties voor de spits en het dal wel duidelijk beter.

Bovenstaande verschillen blijken ook uit de twee onderstaande tijd-wegdiagrammen voor het traject Groningen Losplaats – Leeuwarden waarin de 10-90 percentiel bandbreedte is gegeven (80% van de treinen rijdt dus binnen deze bandbreedte).

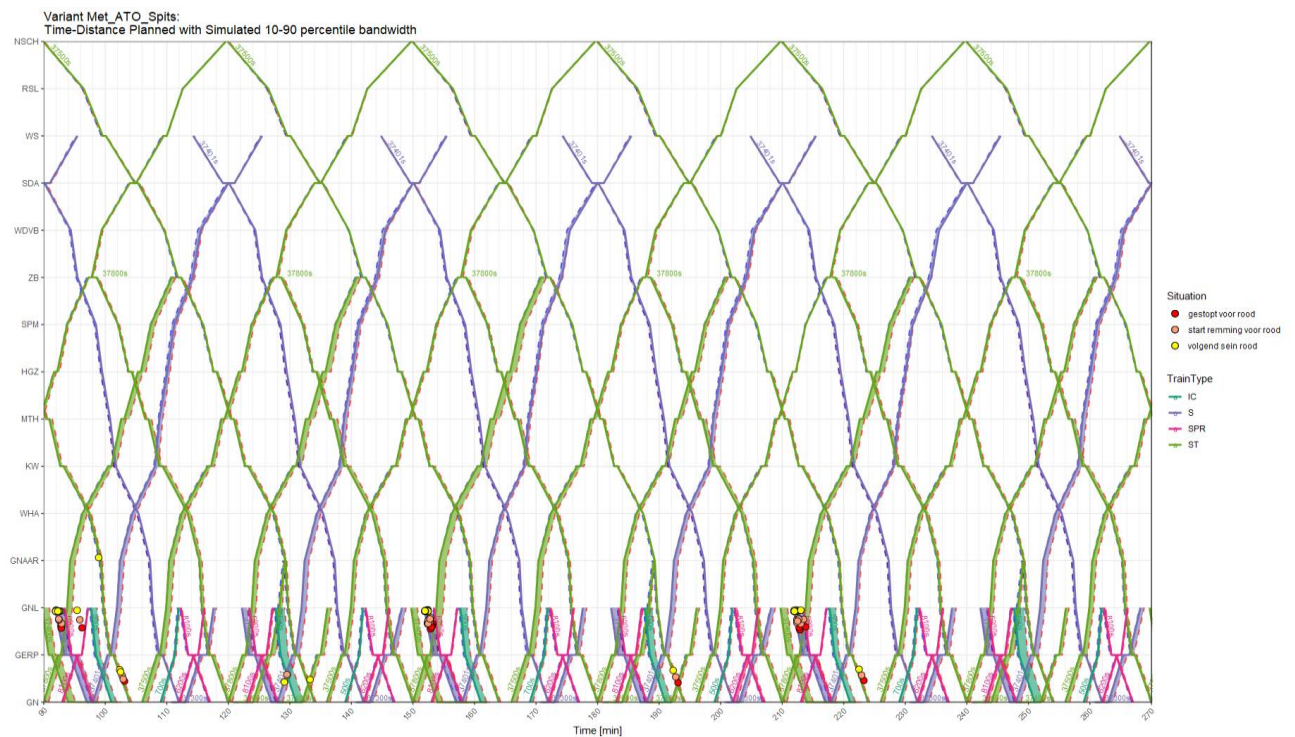
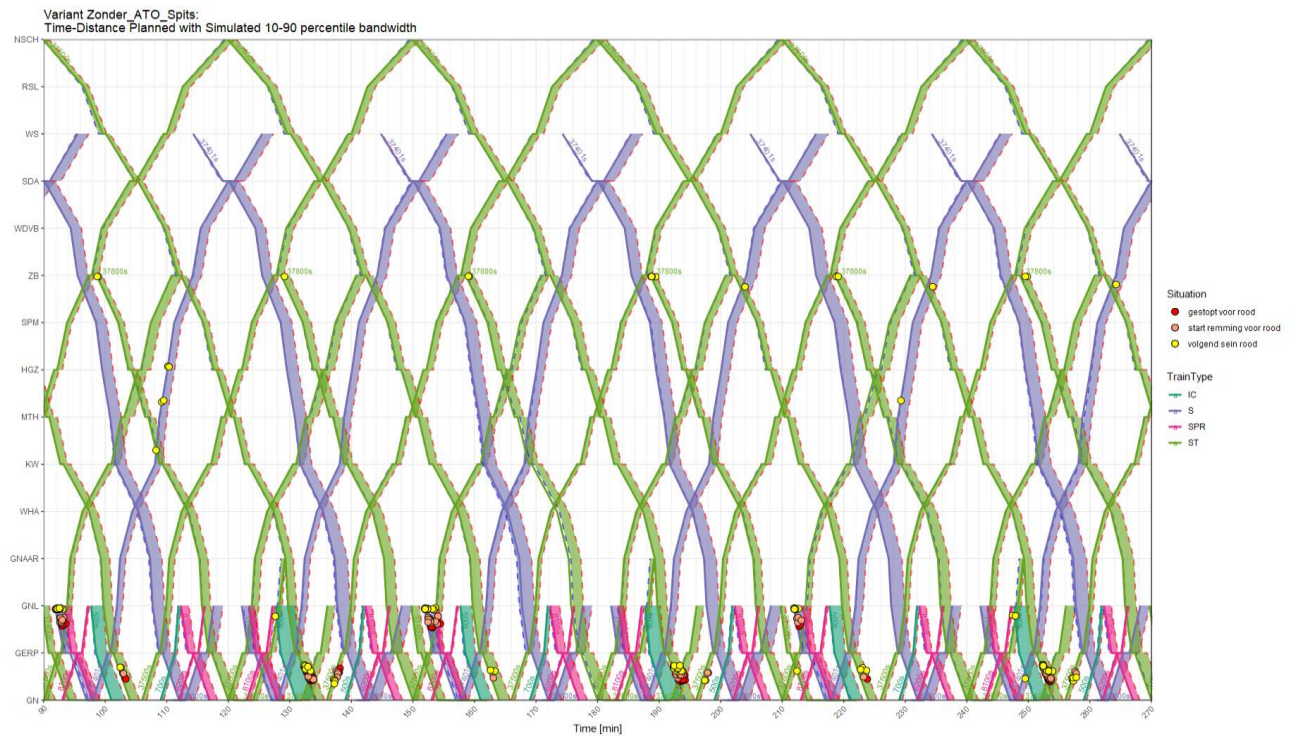


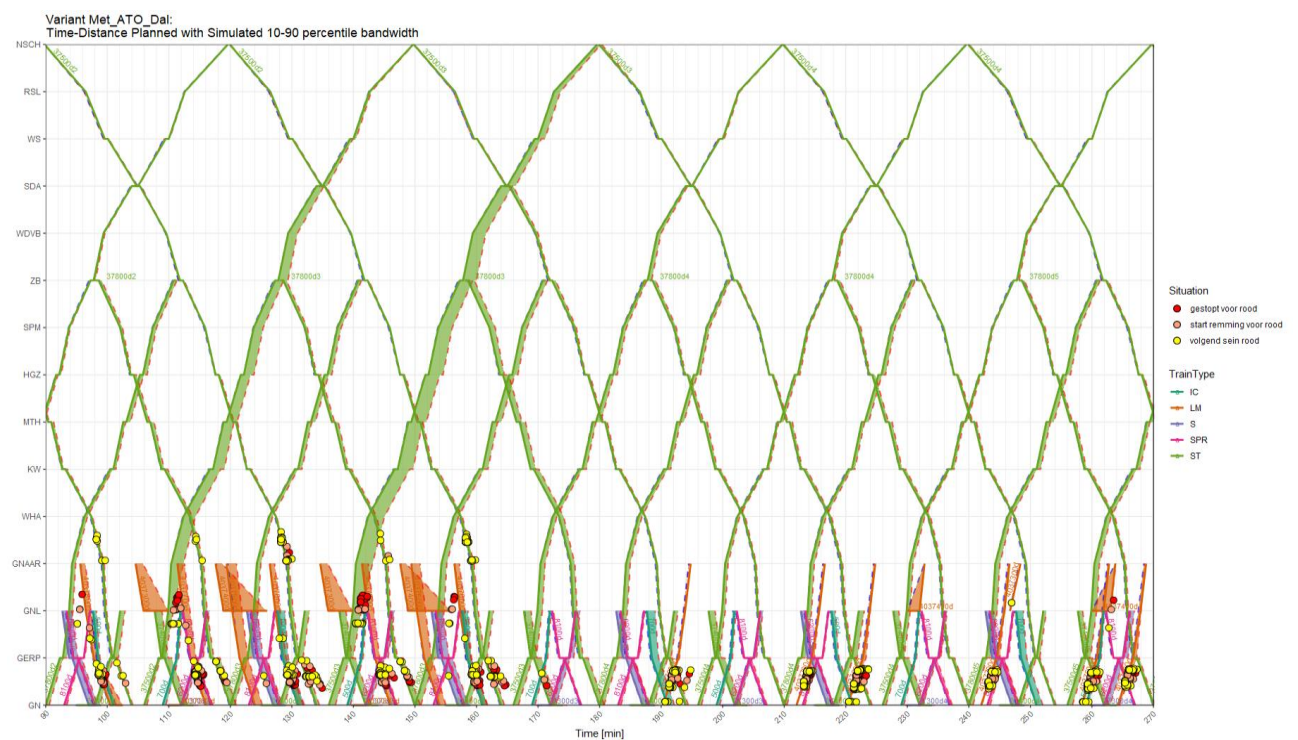
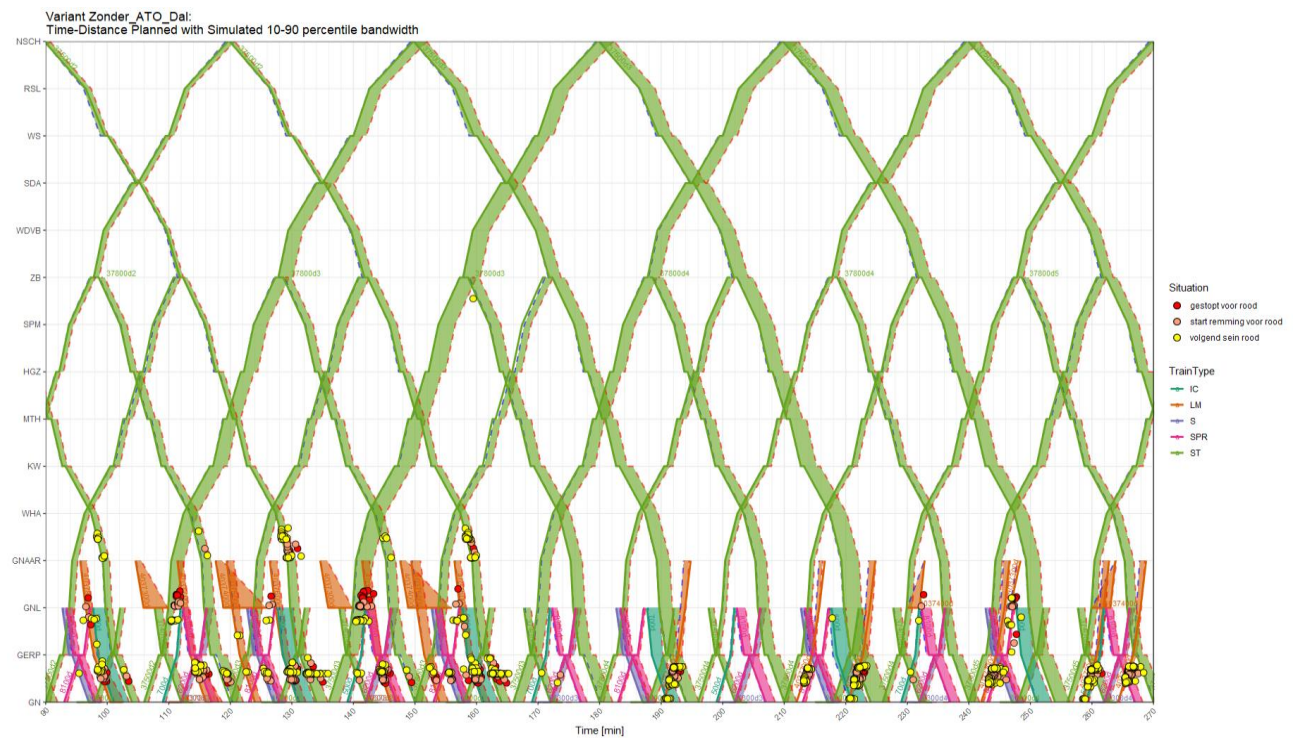
In de twee onderstaande tijd-wegdiagrammen is duidelijk te zien dat met ATO aanzienlijk kleinere bandbreedtes optreden dan zonder ATO. Ook is te zien dat het openen van de brug over het Noord-Willemskanaal rond het halve en hele uur (van .27 tot .33 en van .57 tot .03) minder problemen geeft met ATO dan zonder ATO.

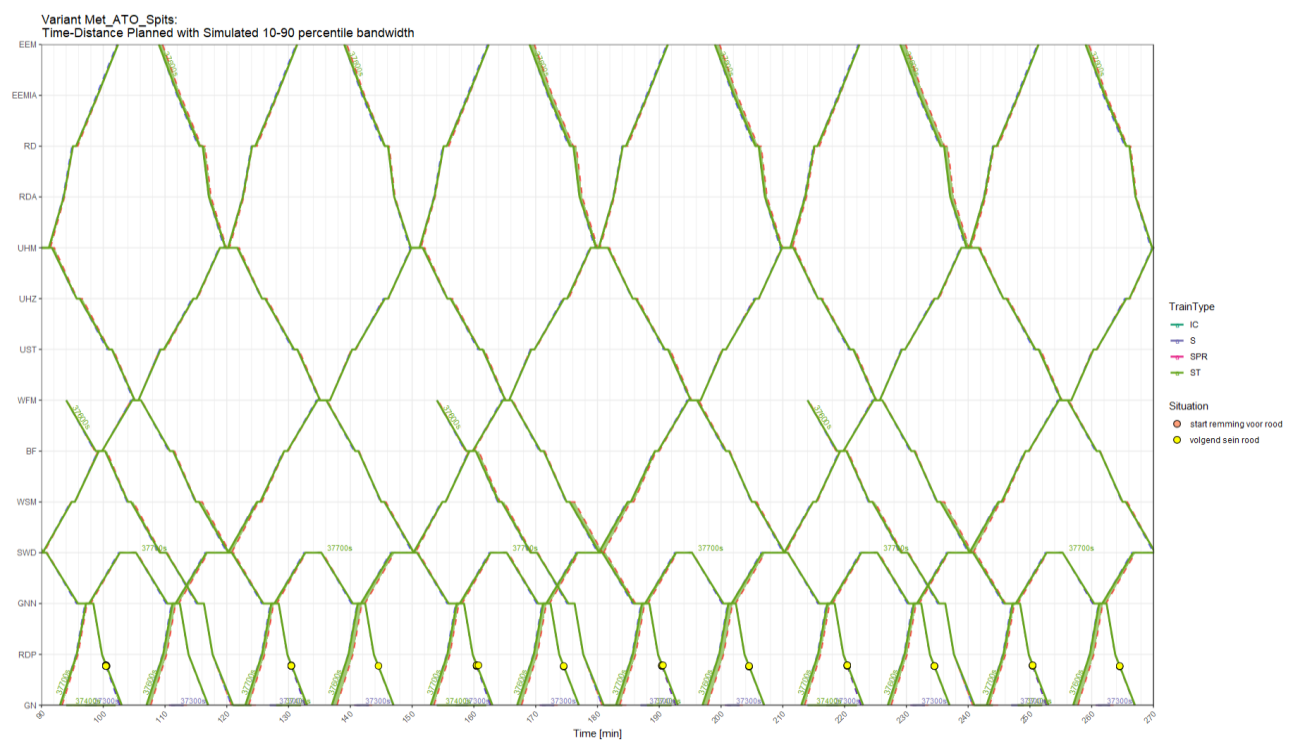
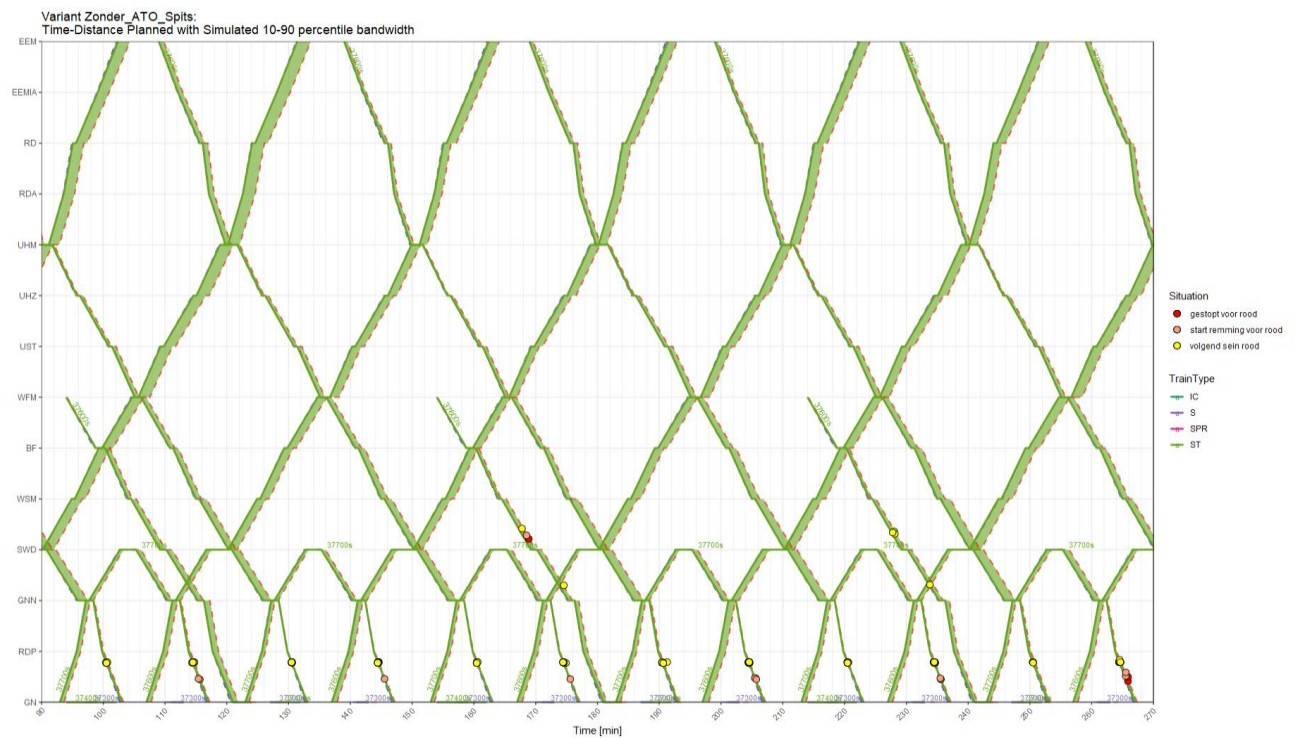
Merk op dat indien een trein zijn rijweg al heeft ingesteld over de brug dat de brug dan pas opent nadat de trein er overheen is gereden. De openingstijd blijft wel 6 minuten. Treinen uit Groningen richting Leeuwarden of Groningen Noord moeten dan wachten totdat de brug weer gesloten is voordat ze kunnen vertrekken.

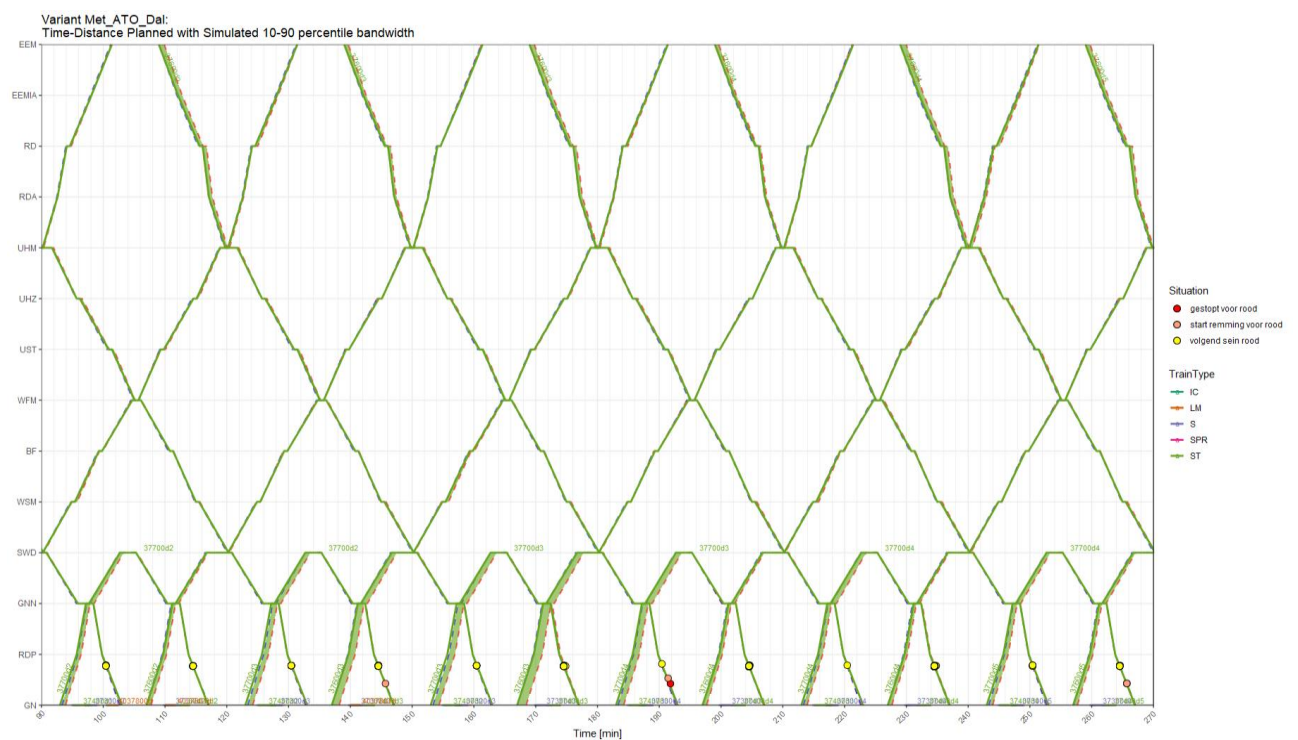
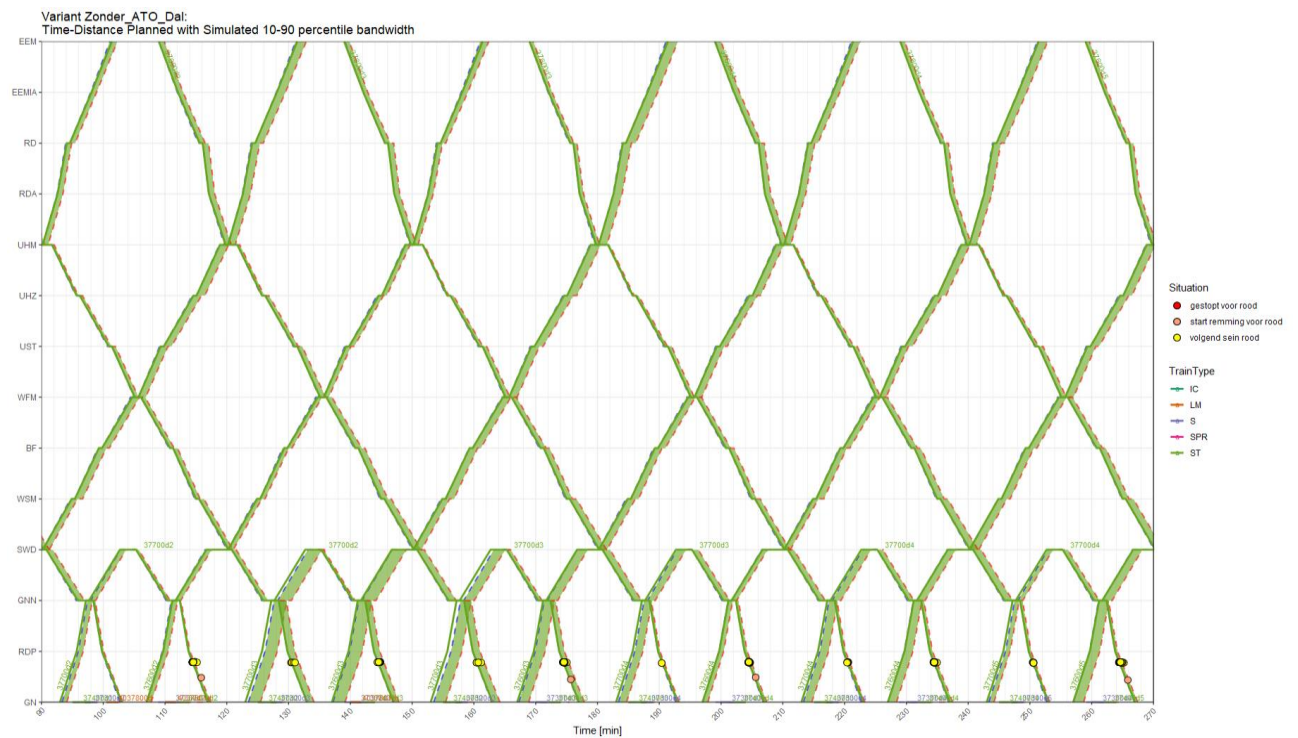


Eenzelfde beeld is te zien in de acht onderstaande tijd-wegdiagrammen voor de trajecten Groningen – Bad Nieuweschans en Groningen – Eemshaven.





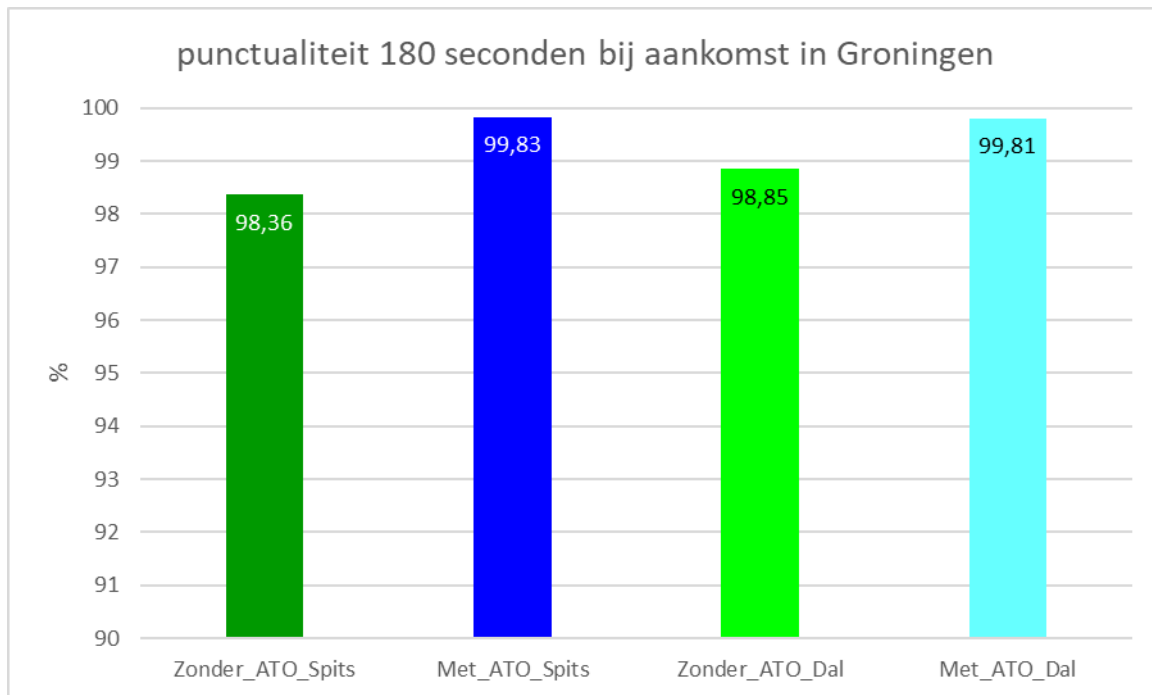




4.4.2 Vergelijking punctualiteit

Naast de percentielgrafieken voor aankomstvertraging zijn voor specifieke KPI's de effecten bepaald. Deze KPI's worden hieronder weergegeven.

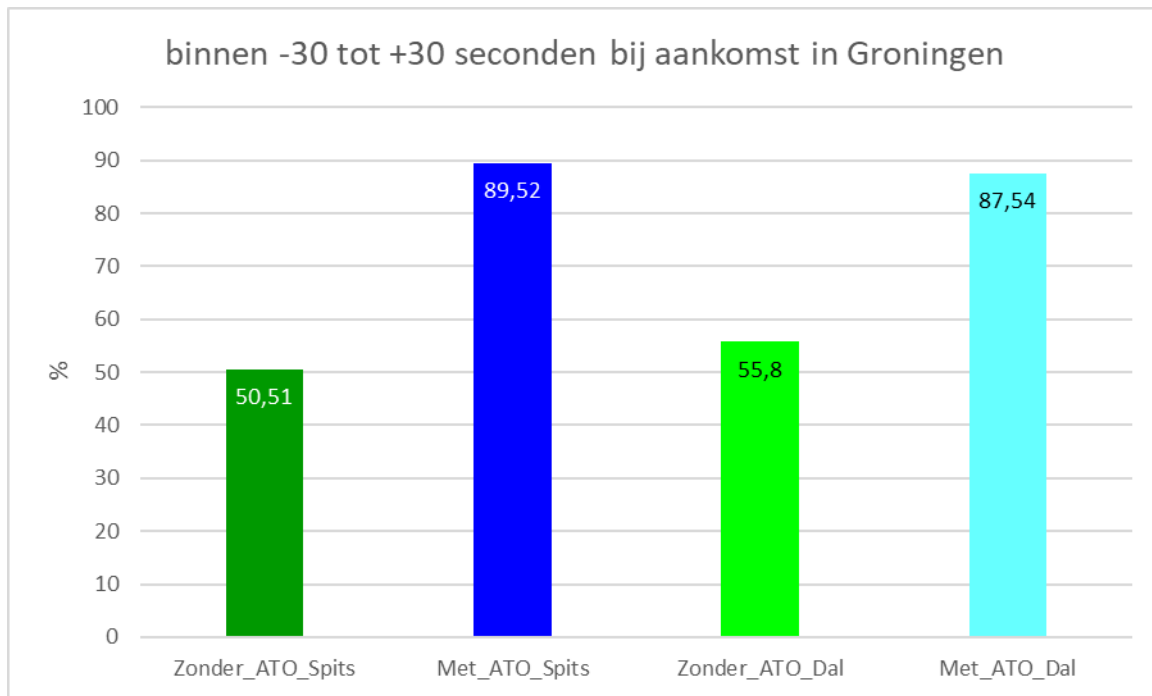
Een belangrijke waarde is de treinpunctualiteit op 180 seconden (het percentage treinen met een aankomstvertraging ≤ 180 seconden), een voor zowel ProRail als een vervoerder belangrijke KPI. Deze wordt in de onderstaande grafiek gegeven.



Figuur 4.3: Punctualiteit met en zonder ATO

Duidelijk is te zien dat de punctualiteit met ATO hoger is dan zonder ATO. Het verschil is echter niet groot. De punctualiteit zonder ATO is al hoog is waardoor de ruimte voor verbetering klein is.

Een andere belangrijke maat die veel gebruikt wordt is het percentage treinen dat binnen -30 tot +30 seconden vertraging aankomt ($-30 \leq \text{aankomstvertraging} \leq +30$ seconden). De KPI OTR (Op Tijd Rijden) van NS is ongeveer te omschrijven als de door het treinpersoneel beïnvloedbare afwijking op 30 seconden. Hier wordt dezelfde 30 seconden gebruikt, maar dan wel de gehele punctualiteit en niet alleen de door het treinpersoneel beïnvloedbare punctualiteit.



Figuur 4.4: Punctualiteit + en -30sec met en zonder ATO

Ook hier is duidelijk te zien dat de prestaties met ATO beter zijn dan zonder ATO en voor deze KPI is het verschil wel aanzienlijk.

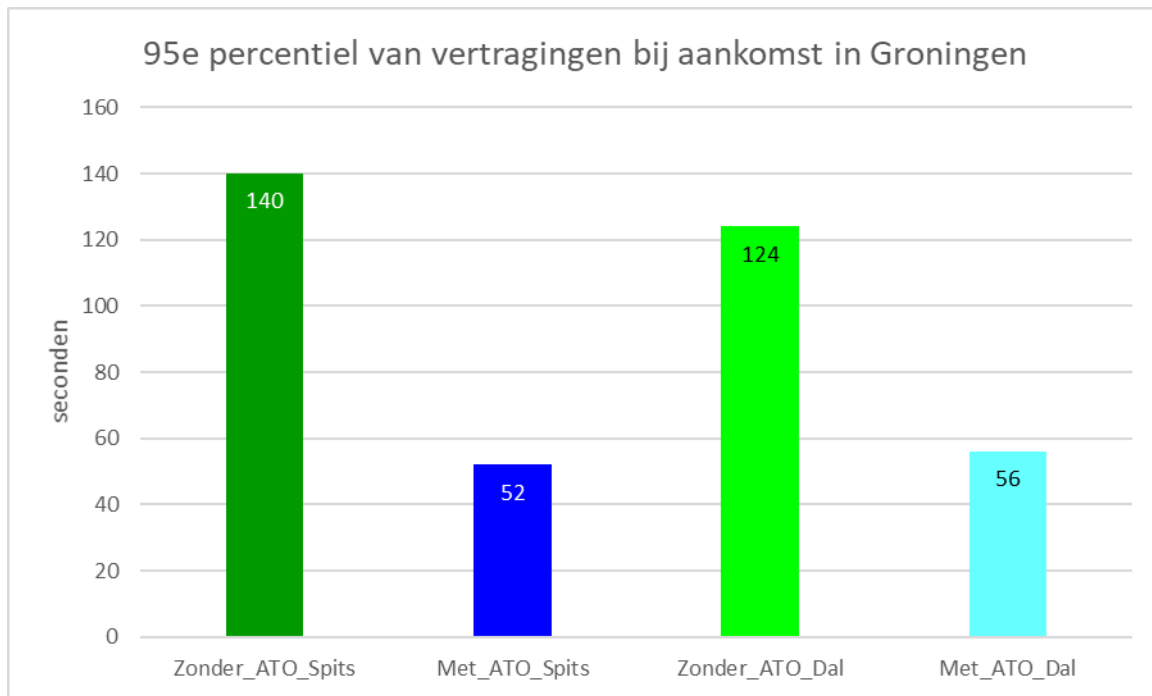
4.4.3 Vergelijking planafwijking

Eenzelfde beeld volgt als gekeken wordt naar de buffers. Een buffer is nodig om te zorgen dat de meeste planafwijkingen van treinen niet tot treinhinder leiden. De planafwijking van de verschillende varianten is vergeleken als indicatie voor hoeveel de buffers gemiddeld verlaagd zouden kunnen worden.

De vergelijking is gedaan op een percentielwaarde. De planafwijking op een percentielwaarde geeft aan welk percentage van de treinen binnen die planafwijking blijft.

De gebruikte percentielwaarde zou overeen moeten komen met het afgesproken percentage treinen waarvan de planafwijking binnen de buffer moet vallen. Vanzelfsprekend moet dit een hoge waarde zijn om de dienstregeling punctueel en stabiel te kunnen houden. Er is geen algemeen geaccepteerde waarde. In het theoretische kader van Plannen – Meten – Sturen (PMS) is 95% gebruikt.⁵ Deze waarde zal hier ook worden gebruikt.

⁵ Trein Op Lijn (TOL); contextinformatie en snelheidsadvies aan machinist, J. Knijff & J. van Luipen, 2014



Figuur 4.5: Vertraging met en zonder ATO

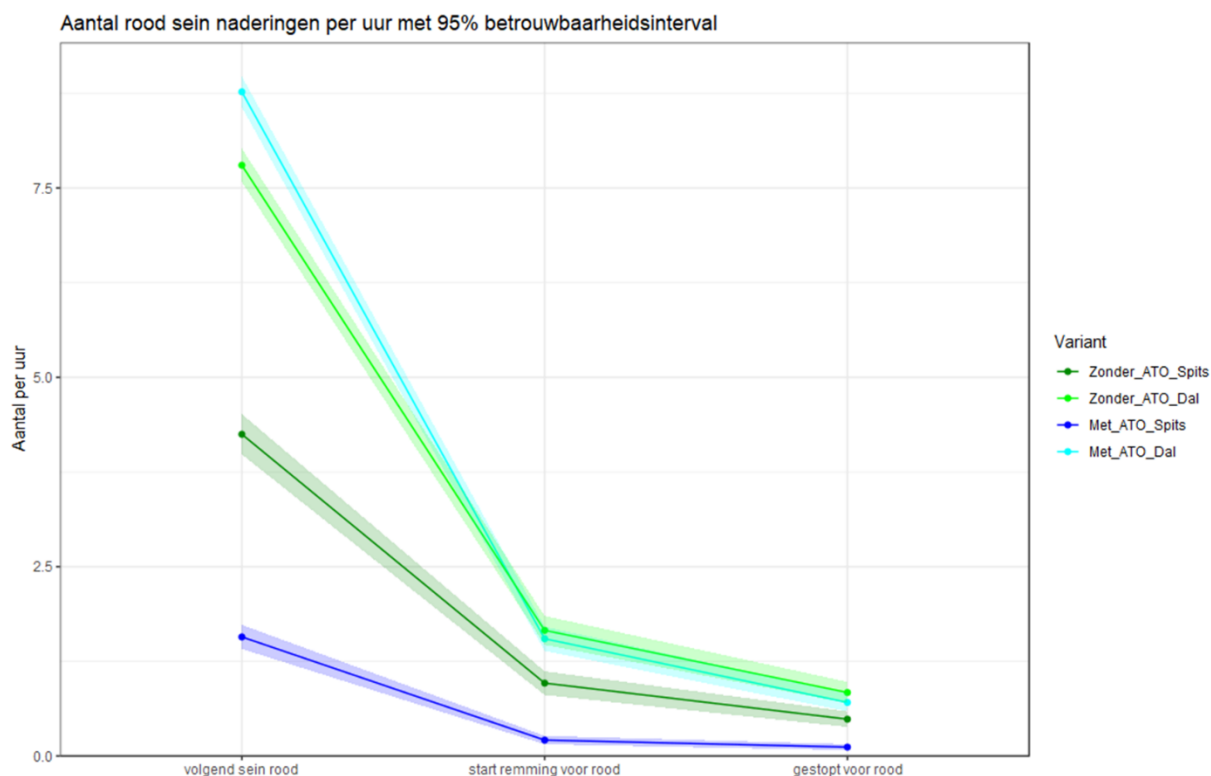
De grafiek laat zien dat met ATO aanzienlijk kleinere buffers nodig zijn dan zonder ATO.

4.4.4 Vergelijking ongeplande stops

In de onderstaande grafiek wordt het aantal ongeplande roodseinnaderingen gegeven.

Met name ongeplande stops zijn met het oog op veiligheid ongewenst; de trein moet onverwacht stoppen voor een rood sein. Als de trein door dit rode sein heen rijdt dan kan een botsing met een andere trein optreden. Bij ETCS- en ATB-NG-beveiliging kan dit niet optreden. Bij ATB-VV is het voorkomen van stoptonend-seinpassage niet gegarandeerd. De kans hierop is wel erg klein. ATB-EG voorkomt geen stoptonend-seinpassages. Landelijk zijn in de afgelopen 12 maanden 142 stoptonend-seinpassages voorgekomen waarbij in 32 gevallen het gevaarpunt werd bereikt (zie <https://prestaties.prorail.nl/>). In het studiegebied Groningen zijn alle trajecten uitgerust met ATB-NG, behalve het traject naar Assen. Op deze trajecten speelt deze KPI voor veiligheid dus geen rol. Bij een bredere uitrol van ATO kan deze KPI wel een rol spelen voor veiligheid.

Roodseinnaderingen zijn ongewenst mede met het oog op energieverbruik en het comfort van reizigers.



Figuur 4.6: Roodseinnaderingen met en zonder ATO

De grafiek laat zien dat het aantal ongeplande roodseinnaderingen in de spits met ATO aanzienlijk kleiner is dan zonder ATO.

In het dal is het verschil klein. Een reden hiervoor is het bijplaatsen en aftrappen. De planning hiervan is krap en levert ook al geel-seinpassages (volgend sein rood) als treinen volgens plan rijden. Een andere reden hiervoor zijn de brugopeningen van de brug over het Noord-Willemskanaal. Deze is zo gepland dat als de stoptrein van Leeuwarden naar Groningen volgens plan rijdt, deze een geelseinpassage krijgt. Dus juist als deze trein beter op tijd rijdt geeft dit een geelseinpassage terwijl als de trein enige vertraging heeft dit niet gebeurt. In de spits treden geen roodseinnaderingen op als treinen volgens plan rijden.

Dat het verschil in roodseinnaderingen in het dal klein is komt dus door kraptes die al in de planning aanwezig zijn. Deze kunnen acceptabel zijn, met name bij gebruik van ATO. Bijplaatsen lukt in hetzelfde uur voor alle treinen van Arriva, aftrappen lukt voor alle treinen bij terugkomst, en de brugopeningen worden gerealiseerd (zie sectie 4.3.5 voor een beschrijving van de gesimuleerde dienstregeling).

4.4.5 Toepasbaarheid simulatie

De gevonden effecten gelden onder normaal bedrijf, dus zonder grote verstoringen of incidenten. Het prestatie-dashboard van ProRail (prestaties.prorail.nl) geeft over de afgelopen 12 maanden op 21-03-2019 de volgende landelijke prestaties:

- Treinpunctualiteit reizigersvervoerders: hoofdrailnet 91.4%, decentrale lijnen 94.7%. Dit is het percentage treinaankomsten waarbij het verschil tussen de oorspronkelijk geplande tijd en de vastgestelde realisatietijd kleiner is dan 3 minuten.
- Treinpunctualiteit goederenvervoer: 69.2%. Dit is het percentage goederentreinen waarbij de vertraging op het eindpunt minus de vertraging op het vertrekpunt kleiner is dan 3 minuten.

Indien deze getallen als indicatie van normaal bedrijf worden gezien dan gelden de gevonden effecten voor circa 90% van de reizigerstreinen op het hoofdrailnet en 95% van de reizigerstreinen op decentrale lijnen, en voor circa 70% van de goederentreinen.

Normaal bedrijf kan ook gedefinieerd worden als bedrijf met verstoringen tussen de -6 en +6 minuten. Dit komt beter overeen met de condities van de in dit onderzoek uitgevoerde simulaties waarin toegevoegde verstoringen bij entree met activiteit doorkomst en bij vertrek zijn afgekapt zodat deze tussen -6 en +6 respectievelijk 0 en +6 minuten liggen. Voor de realisatiedata 2018 geldt landelijk zonder enige filtering:

- Treinentrees, aankomsten of vertrekken reizigersvervoerders tussen de -6 en +6 minuten: 97.3%.
- Treinentrees, aankomsten of vertrekken goederenvervoer tussen de -6 en +6 minuten: 71.7%.

4.5 Conclusies

4.5.1 Validiteit simulaties

In de simulaties is zo goed mogelijk de werkelijkheid nagebootst. Noodzakelijkerwijs zijn daarbij een aantal aannames gedaan, waarvan is ingeschat dat deze niet te veel afwijken van de praktijk of het resultaat niet te veel beïnvloeden. Ter verificatie is het machinistengedrag in 2018 benaderd en is de simulatie hiervan vergeleken met de gefilterde realisatiedata van 2018. Hieruit blijkt dat de simulatie de werkelijkheid voldoende nauwkeurig benadert voor een eerste indicatie van te verwachten effecten.

4.5.2 Effecten van varianten

De effecten van ATO GoA2 zijn bepaald ten opzichte van het model van het machinistengedrag in 2018 waarin treinen zonder ATO rijden. Dit is gedaan voor de normale uitvoering van de treindienst zonder grote verstoringen. Effecten bij grotere verstoringen vallen buiten de scope van dit onderzoek. ATO optimaliseert hierbij op het minimaliseren van planafwijkingen en houdt geen rekening met energieverbruik.

Op de 3 minuten punctualiteit in Groningen realiseert ATO een verbetering van 1.5 procentpunt in de spits en 1 procentpunt in het dal. De 3 minuten punctualiteit zonder ATO is al hoog is waardoor de ruimte voor verbetering klein is.

De punctualiteit op -30 tot +30 seconden in Groningen verbetert 39 procentpunt in de spits en 32 procentpunt in het dal.

De planafwijking op het 95^e percentiel van aankomstvertragingen in Groningen daalt van 140 naar 52 seconden in de spits en van 124 naar 56 seconden in het dal.

Het aantal ongeplande stops per uur daalt van 0.49 naar 0.12 in de spits en van 0.84 naar 0.71 in het dal. Het geringe verschil in het dal komt door kraptes bij bijplaatsen en aftrappen en de brugopeningen van de brug over het Noord-Willemskanaal die al in de planning aanwezig zijn.

4.5.3 Conclusies

De conclusie is dat, op het baanvak Groningen – Leeuwarden, een verbetering te zien is met ATO GoA2 ten opzichte van de situatie zonder ATO als referentie op capaciteit, punctualiteit en veiligheid (rood sein naderingen en ongeplande stops). Met name de punctualiteit op -30 tot +30 seconden kan in belangrijke mate verhoogd worden. De verbeterde sturing kan gebruikt worden om buffers te verkleinen om daarmee de capaciteit te verhogen. Daarnaast is een hogere punctualiteit juist ook op enkel spoor belangrijk. Ook wordt verwacht dat met ATO de stiptheid toeneemt en reizigers minder overstappen missen.

4.6 Aanbevelingen

Dit onderzoek heeft de grote potentiële punctualiteits- en capaciteitsbaten van ATO aangetoond. Op basis hiervan wordt aanbevolen vergelijkbaar onderzoek naar de potentie van ATO op landelijk niveau en voor knelpunten in het Nederlandse spoornetwerk uit te voeren.

Voor de keuze voor ATO of een combinatie van een Traffic Management Systeem met ATO is meer nodig dan alleen dit onderzoek. Aanbevolen wordt om mee te wegen hoe de varianten scoren op:

- De kans dat een trein stuurt op niet-opvolgbare doelen, wat impact op de veiligheid en de acceptatiegraad heeft.
- De mogelijkheid om planwijzigingen direct aan de betreffende machinisten en treinen op te kunnen sturen.
- Het functioneren tijdens verstoringen/grotere vertragingen en hun effecten op de prestatie indicatoren.
- De mogelijkheden om de machinist en trein van actuele informatie te voorzien (spoorlopers, incidenten), wat het vertrouwen in en de acceptatie van ATO kan bevorderen.
- De mogelijkheden om verkeersleiding te voorzien van actuele informatie over positie, snelheid en verwachte doorkomsttijd van treinen.
- De doorgroeimogelijkheden voor procesleiding.

4.7 Mogelijk vervolgonderzoek

Op enkele punten kan dit simulatieonderzoek verder worden uitgewerkt:

- Meewegen van energieverbruik in de optimalisatie van het snelheidsprofiel bij ATO. Er kan bijvoorbeeld primair op vertragingenreductie geoptimaliseerd worden en secundair op energieverbruik (dus waar dat kan zonder de punctualiteit te verslechteren) of er kan een gewogen optimalisatie op beide gedaan worden (waarbij de afweging kan verschillen per vervoerder, traject en tijd op de dag).
- Gebruik van uitgesteld remmen en remmen met een hogere remvertraging bij ATO om vertragingen in te lopen of geplande rijtijden te verkleinen.
- Uitbreiden van de Agent zodat deze het gedrag van machinisten zonder ATO in het studiegebied Groningen en andere decentrale lijnen kan modelleren.
- Verder uitwerken van beslissingsondersteunende besturingsvarianten binnen procesleidingsmodellen (bijv. FRISO in combinatie met Trinity, TMS, e.a.) zodat ook grotere verstoringen gesimuleerd kunnen worden. Opties zijn o.a.:
 - Agent-model van treindienstleiders,
 - Gebruik van automatisch gegenereerde Trein Afhandelings Documenten (TAD's),
 - Dynamisch Traffic Management Systeem, optimalisatie treinverkeer,
 - Interactieve simulaties met machinist en/of treindienstleiders.
- Opnemen van reizigersaantallen in FRISO zodat ook de reizigerspunctualiteit bepaald kan worden.
- Toepassen van ATO op toekomstige treinbeveiligingssystemen (ERTMS level 2 en Hybrid level 3).

5 Reizigersonderzoek

5.1 Inleiding

Bij automatisch rijden komt veel kijken. Het is niet alleen de vraag of we meer treinen kunnen laten rijden met behulp van ATO, maar ook of we het reizen voor de passagiers nog beter en comfortabeler kunnen maken?

Bij deze belangrijke veranderingen zijn veel mensen betrokken, zoals de reizigers, machinisten, omwonenden, specifieke belangengroepen en nog veel meer. De veranderingen kunnen effect hebben op zichtbare en minder zichtbare rollen. Zo vervult de machinist bijvoorbeeld een belangrijke rol in het toezicht houden.

Bij de ontwikkeling van automatische treinen is het daarmee vanzelfsprekend van belang om juist de reiziger erbij te betrekken.

Voor dit onderdeel van het ATO-Groningenproject is door TNO een eerste verkenning gedaan naar de ervaring van reizigers bij het reizen met een automatische trein, op gebied van comfort en reisbeleving. Daarvoor zijn verschillende testritten georganiseerd, waarbij passagiers konden meerijden. Deze eerste verkenning werd uitgevoerd met een ATO-systeem dat zich in de ontwikkelfase bevindt en momenteel nog niet wordt ingezet voor commercieel gebruik. Het ging hierbij om de ervaring van de reizigers, waarmee een eerste beeld van de reizigersbeleving is opgebouwd. In dit hoofdstuk worden de opzet en resultaten van dit onderzoek beschreven.

5.2 Doel en opbouw van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek was om een eerste beeld te krijgen van de effecten van automatisch rijdende treinen op de reiziger, ten aanzien van reiservaring, beleving en comfort. Dit beeld is opgebouwd op basis van verschillende testritten. Dit onderzoek was specifiek gericht op de ervaring, de beleving en het comfort voor de reiziger. Daarbij werkten ProRail, Arriva, Stadler, de Provincie Groningen en TNO samen.

Het onderzoek bestond uit een literatuurscan, reizigersonderzoek en G-krachtenonderzoek.

5.2.1 Literatuurscan

Het TNO-projectteam is gestart met de literatuurscan (zie paragraaf 5.3), waarbij 'lean and mean' is gekeken naar wat al eerder is gedaan op dit vlak. In de literatuurscan lag de focus specifiek op de effecten op treinreizigers, maar is ook aandacht besteed aan andere 'Human Factors' effecten, zoals de impact van automatisering op de rol van de machinist. Ook werd gekeken naar algemene effecten van automatisch vervoer.

5.2.2 De reizigerservaring

Om de reizigerservaring te kunnen testen, zijn voor, tijdens en na de testritten enquêtes uitgezet onder de deelnemers. Op deze manier is de ervaring van de deelnemers gemeten.

In een analyse van de enquêtes zijn de ervaringen met en zonder ATO met elkaar vergeleken. Er is getoetst of er verschillen zijn in verwachtingen vooraf, de beleving tijdens de testritten (comfort, treinbewegingen, etc.) van de respondenten tussen ATO-ritten en reguliere ritten en algehele beleving na de testritten. Daarnaast werd getoetst of er een gewenning optrad en of er een verschil is tussen de eerste ATO-rit die mensen beleefden en de tweede ATO-rit. De resultaten zijn opgenomen in paragraaf 5.4 Reizigersonderzoek.

5.2.3 G-krachtenmetingen

Tijdens de testritten zijn de treinbewegingen gemeten met een versnellingsopnemer. Het zijn vooral de lineaire versnellingen ('G-krachten') en de veranderingen daarin, die het rijcomfort bepalen. Door de gemeten versnellingen tussen de ATO en manuele ritten met elkaar te vergelijken, is op een objectieve manier iets te zeggen over de verschillen tussen rijden met en zonder ATO.

Voor het meten van de versnellingen zijn twee kleine versnellingsopnemers geplaatst in de trein, zoals weergegeven in figuur 5.1. Daarnaast is een GPS-meter ingesteld, zodat opvallende zaken kunnen worden gekoppeld aan een locatie op het traject.



Figuur 5.1: De twee kleine versnellingsopnemers

De verzamelde data bestaat uit de gemeten lineaire versnellingen in de drie hoofdrichtingen: x (voor-achterwaarts), y (zijwaarts) en z (verticaal). Deze zijn uitgelezen en weergegeven als functie van de tijd, in grafieken. Er is gekeken of en op welke manier de bewegingsprofielen tussen de ATO en manuele ritten van elkaar verschillen. Hierbij is er naast de versnelling ook naar de ruk (de verandering in versnelling) gekeken. Per rit zijn de minimale en maximale waarden voor ruk en versnelling bepaald, om het effect van ATO te kwantificeren. De resultaten zijn opgenomen in paragraaf 5.5 G-krachten onderzoek.

5.3 Literatuurscan

Dit hoofdstuk bevat een overzicht van de wetenschappelijke literatuur over automatisering op het spoor vanuit een Human Factors perspectief. Een overzicht van de geraadpleegde literatuur is te vinden in Bijlage 8.3.

5.3.1 Introductie

In meerdere transportsectoren is er al een lange geschiedenis van automatisering. De luchtvaart heeft lang vooropgelopen bij de automatisering van een groot deel van het vliegen (vandaar ook de term 'autopilot') (Billings, 1996). In het automotive-domein zijn delen van de besturing van het voertuig geautomatiseerd middels assistentiesystemen, zoals adaptive cruise control en automatische noodstopassistent. Deze systemen worden gezien als tussenstappen richting volledig zelfrijdende auto's (Akamatsu et al., 2013). Daarnaast voeren bedrijven als Tesla en Waymo testen uit met volledig zelfrijdende auto's. In de spoorsector is automatisering tot nu toe grotendeels beperkt tot

stadsvervoer. Zelfrijdende metrotreinen bestaan al sinds de zestiger jaren van de 20^e eeuw (Wang et al., 2016).

In deze literatuurscan wordt de wetenschappelijke literatuur met betrekking tot de impact van treinautomatisering op reizigers kort samengevat. Het is zeker niet bedoeld als een volledig overzicht van de literatuur, maar als een eerste indruk van wat er bekend is met betrekking tot de effecten van automatisering op het spoor, met de nadruk op de verwachtingen en ervaringen van reizigers.

5.3.2 Methode

Het literatuuronderzoek verliep via twee sporen. In de eerste plaats werd literatuur gezocht via een zoekopdracht in Google Scholar met trefwoorden zoals 'rail', 'train', 'automation' en 'passenger'. In de tweede plaats werden reeds geïdentificeerde artikelen gebruikt om hun referenties te vinden en om na te gaan door welke meer recente artikelen ze werden geciteerd.

5.3.3 Resultaten

Er zijn achttien artikelen gevonden die relevant waren voor de onderzoeksvragen. Van deze achttien artikelen betroffen slechts drie onderzoeksvragen in relatie tot treinpassagiers. De meerderheid van de artikelen keek naar de effecten van automatisering op de machinist. Een korte samenvatting van beide groepen van artikelen volgt hieronder. Wang en collega's (2016) geven een algemeen overzicht van de potentiële voordelen en uitdagingen van treinautomatisering, met een focus op stadstransport. Als het voornaamste voordeel van zelfrijdende treinen noemen zij: lagere operationele kosten, verhoogde netwerkcapaciteit en -betrouwbaarheid, verhoogde netwerkflexibiliteit, hogere energie-efficiëntie en verhoogde veiligheid. Tegelijk noemen ze verschillende uitdagingen die aangepakt moeten worden om treinautomatisering succesvol te laten verlopen. Deze betreffen de vraag hoe veiligheid gegarandeerd kan worden als er geen machinist is, de ontwikkeling van geavanceerde treincontroletechnologie die nodig is voor zelfrijdende treinen, de communicatie met passagiers, de veiligheid van passagiers tijdens in- en uitstappen, nieuwe vereisten voor stations en de detectie en afhandeling van noodsituaties zonder de aanwezigheid van personeel op de trein.

5.3.3.1 Automatisering en passagiers

Er werden geen studies gevonden waarin de ervaringen van reizigers met zelfrijdende treinen werden gemeten. Eén studie (Oliveira et al., 2019) onderzocht wat passagiers (mensen die tenminste één keer in het jaar ervoor met de trein hadden gereisd) als belangrijke innovaties of verbeteringen in het Britse treintransport zagen

In een tweede studie door Fraszczyk en Mulley (2017) werd een survey gehouden onder 219 participanten met betrekking tot een geplande nieuwe volautomatische metrolijn in Sydney, Australië. In het algemeen noemden respondenten veiligheid en prijs als de belangrijkste factoren waarop ze spoortransport beoordeelden en comfort, toegankelijkheid en duurzaamheid als de minst belangrijke. Attitudes ten opzichte van onbemande treinen waren grotendeels neutraal, met een klein deel van de respondenten voor en een ander klein deel tegen.

Regelmatige treinreizigers hadden een meer positieve mening over zelfrijdende treinen dan mensen die minder vaak gebruik maakten van de trein. De meeste participanten vonden de aanwezigheid van een machinist zeer belangrijk en ruim de helft van de participanten wilde graag dat de machinistcabine blijft bestaan op de zelfrijdende treinen. Bijna de helft verwachtte niet dat zelfrijdende treinen een invloed zou hebben op het voorkomen van menselijke fouten.

Als voornaamste voordelen van treinautomatisering werden lagere prijs voor treinkaartjes en hogere treinfrequentie genoemd. Reductie van menselijke fouten en energiebesparing/duurzaamheid werden het minst vaak genoemd. Ongeveer de helft van de respondenten die regelmatig met de trein reisden gaven aan dat ze een onbemande trein zouden gebruiken. Onder mensen die zelden de trein namen was dit slechts 14%, waarbij 40% van hen zei dat ze niet in een onbemande trein zouden stappen.

5.3.3.2 Automatisering en machinisten

De impact van treinautomatisering op de rol van de machinist krijgt in de literatuur veel meer aandacht dan die op de passagier. Zoals boven al genoemd omvatten de verwachte voordelen van onbemande treinen verhoogde veiligheid door het uitsluiten van menselijke fouten en verhoogde operationele efficiëntie (Wang et al., 2016). Echter, tussenliggende fasen van automatisering, waarbij de machinist nog aanwezig is maar sommige taken zijn geautomatiseerd, veranderen de rol van de machinist van een actieve bestuurder tot een passieve toezichthouder. In dat geval is de hoofdtaak van de machinist de geautomatiseerde systemen in de gaten te houden en alleen in te grijpen als de trein buiten het operationele domein van de geautomatiseerde systemen komt of wanneer deze systemen falen (Brandenburger et al., 2017; Niels Brandenburger & Jipp, 2017). Dit verhoogt de monotonie in het werk van de machinist en kan leiden tot verveling, gepaard gaand met afgenomen waakzaamheid (Dunn & Williamson, 2011).

Paradoxaal genoeg kan dit leiden tot toegenomen werklast en benodigde inspanning om het waakzaamheidsniveau dat nodig is om toezicht te blijven houden op de geautom

hand liggende rollen van de machinist omvatten het besturen van de trein, zorg voor de passagiers (inclusief zorgen voor een veilige en comfortabele rit en voor adequate informatie), het waarnemen van gebeurtenissen buiten de trein en het optreden in uitzonderlijke situaties. Echter, Karvonen vond dat machinisten ook een belangrijke rol spelen in veel andere, minder voor de hand liggende aspecten van het spoortransport en zijn veiligheid, zoals het evalueren van de potentiële consequenties van gebeurtenissen op en om het spoor (bijvoorbeeld mensen of dieren langs het spoor, de weersomstandigheden), het oplossen van kleine problemen, het detecteren van problemen bij stations, het aanpassen van de treinsnelheid om vertragingen te compenseren, het faciliteren van de evacuatie van passagiers in noodgevallen en de communicatie met andere partijen die betrokken zijn bij het spoortransport (zoals passagiers, verkeersleiding, andere machinisten). Met al deze rollen moet rekening gehouden worden wanneer een trein geautomatiseerd wordt.

5.3.4 Conclusies naar aanleiding van het literatuuronderzoek

Hoewel er een toenemende hoeveelheid literatuur is over de consequenties van treinautomatisering op de interactie tussen mens en trein, betreft deze met name de rol van de machinist. Veel minder aandacht is er voor de verwachtingen van de passagiers en er zijn al helemaal geen studies uitgevoerd waarin de ervaringen van reizigers in volautomatische treinen gemeten zijn. Ook onderzoeken over passagierservaringen in zelfrijdende metro's zijn in deze scan niet gevonden.

Passagiers lijken prijs, veiligheid en operationele efficiëntie het belangrijkste te vinden wanneer ze spoortransport beoordelen en hechten weinig waarde aan automatisering van treinen op zich. Die meningen verschillen enigszins tussen mensen die regelmatig met de trein reizen en zij die dat niet doen. De eerste groep heeft over het algemeen een meer positieve houding ten opzichte van treinautomatisering. De literatuur met betrekking tot de impact van automatisering op de rol van de machinist wordt hier ook samengevat. De effecten op de waakzaamheid en visuele aandachtsverdeling van de machinist worden geïdentificeerd als potentiële uitdagingen voor treinautomatisering. Bovendien vervullen machinisten mogelijk verscheidene meer verborgen rollen, waarmee ook rekening moet worden gehouden bij automatisering van treinen.

Op basis van het onderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

Met betrekking tot de verwachtingen en ervaringen van passagiers:

- Er werden geen studies gevonden die gaan over de ervaringen van passagiers met zelfrijdende treinen.
- Mensen die regelmatig met de trein reizen hebben positievere verwachtingen ten aanzien van treinautomatisering dan mensen die dat niet

5.4 Reizigersonderzoek

5.4.1 De testritten

Om de ervaringen van reizigers te onderzoeken zijn hiervoor speciale testritten georganiseerd. De testritten vonden plaats tussen station Groningen (Vierverlaten) en station Buitenpost. In de testritten hebben maximaal 50 proefpersonen per keer meegereden. Het betrof een eerste beeld van de ervaring. Daarbij was de groep nog niet volledig representatief, onder andere omdat in de testfase nog niet iedereen aan de test mee kon doen. Zo moest men minimaal 18 jaar oud zijn en goed ter been zijn om te kunnen deelnemen.

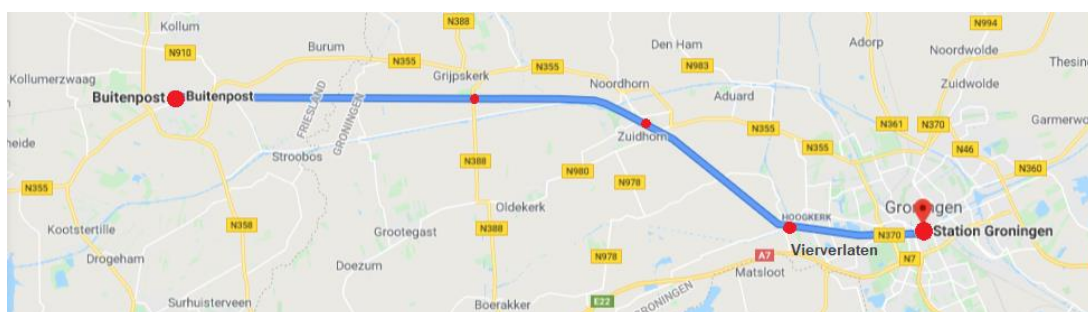




Foto: ProRail / Stefan Verkerk

5.4.2 De deelnemers

De deelnemers zijn vooral online (o.a. via eigen websites en social media) geworven. De testritten zijn door reizigers met veel enthousiasme ontvangen en zaten binnen 24 uur vol. De werving is opgezet door ProRail, Arriva en de Provincie Groningen. Via de kanalen van ProRail en Arriva is de werving uitgezet en is geselecteerd. In het stadium van het onderzoek was het vooral belangrijk om van een voldoende grote groep een beeld te krijgen van de ervaringen van passagiers.

Vooraf is getoetst of aan de AVG-voorwaarden werd voldaan. De reizigers zijn vooraf geïnformeerd en er is toestemming gevraagd voor het vrijwillig meedoen aan dit onderzoek. De resultaten zijn niet persoonsgebonden uitgevraagd en opgeslagen. Om de resultaten per proefpersoon te kunnen vergelijken is gewerkt met referentienummers, waarmee de enquête vooraf, tijdens en na de ritten gekoppeld konden worden.

5.4.3 De reizigersenquête

Om de reizigerservaring te kunnen testen, zijn enquêtes uitgezet onder de deelnemers. Dit gebeurde veelal digitaal. Als digitale omgeving is Survalyzer gebruikt. Daarnaast was er een papieren versie van de enquête aanwezig voor mensen waarvoor digitale invulling niet mogelijk was. Mensen hebben vooraf de instructie gekregen om zich te gedragen 'zoals ze normaal doen in de trein', maar wel te blijven zitten, in verband met de veiligheid. Verder werd gevraagd zich zo min mogelijk te laten beïnvloeden, het ging om hun eigen gevoel.

Er waren drie invulmomenten:

1. Voorafgaand aan de ritten werd aan de proefpersonen een eerste enquête aangeboden om in te vullen. Dit betrof algemene gegevens en verwachtingen vooraf (attitudeonderzoek).
2. Tijdens de proefritten is na iedere rit een enquête afgenomen. Hierin werden de ervaringen van de desbetreffende rit uitgevraagd.
3. Na afloop van de proefritten zijn nog enkele afsluitende vragen gesteld.

De vragenlijsten zijn online of schriftelijk ingevuld. De enquête is opgenomen in Bijlage 8.3 van

5.4.4.1 Leeftijd en geslacht van de deelnemers

De deelnemersgroep bestond uit 127 mannen, 34 vrouwen en 1 geen keuze.

De gemiddelde leeftijd van de deelnemers is 40 jaar, met een standaarddeviatie (SD) van 17 jaar. Er is in de vragenlijst gevraagd naar geboortjaar, op basis daarvan is de leeftijd berekend op behaalde leeftijd eind 2020.) De jongste deelnemer is 18 jaar en de oudste 76 jaar.

Noot: de standaarddeviatie is een maat voor de spreiding van de getallen rondom het gemiddelde en wordt gedefinieerd als 'de gemiddelde afwijking van het gemiddelde'. In dit document wordt de standaarddeviatie afgekort tot SD.

5.4.4.2 Frequentie van treinreizen

31% van de deelnemers geeft aan 0 – 12x per jaar met de trein te reizen, de overigen reizen meerdere keren per maand (35%) of meerdere keren per week (34%) met de trein.

5.4.4.3 Bekendheid van ATO onder de deelnemers

Op de vraag of men al eerder iets van ATO heeft vernomen geeft 70% aan via de media al eens iets vernomen te hebben. *NB dit was een meerkeuzevraag, men kon meerdere antwoorden aanvinken.*

Heeft u al eerder iets van ATO vernomen?	N	%
Via media	113	70%
Ervaring van u zelf	23	14%
Ervaring van anderen	21	13%
Andere of geen ervaringen	35	22%

Er is gevraagd wat men vernomen had. Hierop werd bijvoorbeeld geantwoord: 'Dat er een pilot is gestart', 'Dat er dit weekend testritten zijn', 'Wat het is, hoe het werkt en wat de voordelen zijn', 'Dat het waarschijnlijk geen verschil maakt in beleving, zal wel voordeliger zijn qua verbruik', 'Nieuws over deze testritten en via het nieuws een poos geleden dat het treinpersoneel bang is voor verlies arbeidsplaatsen', 'Wijze van rijden aanzetten en remmen in vergelijking met de bediening door de meester. Uitgesteld remmen etc.', 'Ik heb erover geleerd tijdens mijn studie Spatial Planning & Design. Ik weet af van de verschillende degrees of automation', 'Uit het nieuws, over een testrit

5.4.6 Ervaringen tijdens de testritten

Elke deelnemer heeft 4 testritten meegemaakt, 2x een ATO-rit en 2x een reguliere rit, in wisselende volgorde. De deelnemers werden niet verteld of de rit met ATO of regulier bestuurd werd.

Voor de analyse is gebruik gemaakt van een Repeated Measures ANOVA, dat is een variant van ANOVA waarbij dezelfde groep mensen herhaaldelijk wordt gemeten en deze scores met elkaar vergeleken worden. Het design bevat 2 factoren: *type besturing* (handmatig vs ATO) en *herhaling* (rit 1 vs rit 2) en een mogelijke interactie tussen type besturing en herhaling. De volgorde waarin de 4 ritten werden aangeboden zijn zoveel mogelijk gerandomiseerd.

In deze paragraaf worden de uitkomsten gepresenteerd, waarbij in sub-paragraaf 4.6.4 specifiek wordt ingezoomd op statistische uitkomsten als significantie.

Na elke rit werd gevraagd of men vooruit of achteruitreed en wat men **hoofdzakelijk** gedaan heeft tijdens de rit (slechts 1 keuze mogelijk). De verdeling vooruit/achteruit was ongeveer gelijk. Ca. de helft van de deelnemers geeft aan gepraat te hebben tijdens de ritten, de rest geeft aan gelezen te hebben of rondgekeken. De waarden in de tabel laten geen opvallende verschillen zien in activiteiten tussen ATO en reguliere (REG) ritten.

	Activiteiten Gelezen (boek, tablet, telefoon, ...)		Gepraat		Muziek geluisterd		Rondgekeken		Anders, nl:	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
ATO rit 1	33	20,4%	79	48,8%	3	1,9%	40	24,7%	7	4,3%
ATO rit 2	42	25,9%	75	46,3%	5	3,1%	34	21,0%	6	3,7%
REG rit 1	28	17,3%	81	50,0%	7	4,3%	37	22,8%	9	5,6%
REG rit 2	38	23,5%	77	47,5%	8	4,9%	32	19,8%	7	4,3%

5.4.6.1 Rapportcijfer voor de rit

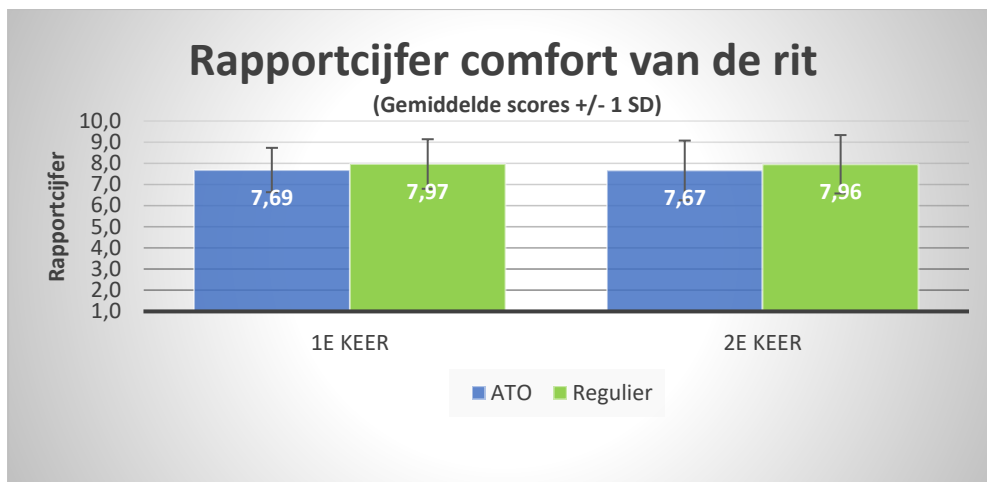
‘Als u een rapportcijfer over het comfort van de rit zou geven, met betrekking tot de treinbewegingen, welk cijfer zou u dan geven?’

Na elke treinrit werd onder andere gevraagd een rapportcijfer (1 = zeer laag comfort – 10 = zeer hoog comfort) te geven over het comfort van de rit. De gegeven rapportcijfers voor het comfort van de rit liggen gemiddeld op 7,82 (SD 0,9). Een score rond de 7 wordt vaak gezien als ‘ruim voldoende’, en een score rond de 8 als ‘goed’. Met een repeated measures ANOVA is getoetst of er statistisch significante verschillen zijn tussen de ritten. Dit is gedaan op verschillende vlakken: Is er verschil tussen ATO ritten versus de reguliere ritten; verschilt de 1^e keer van de 2^e keer; en is er sprake van een eventuele interactie tussen ATO/REG en de herhaling. Zie figuur 5.5.

Er is een statistisch significant verschil gevonden tussen de ritten met ATO en de reguliere ritten ($F(1,161)=10,969$; $p=.001$; $\eta^2=.062$). De reguliere ritten krijgen gemiddeld een iets hoger rapportcijfer voor het comfort met betrekking tot de treinbeweging (ATO: gemiddeld 7,68 (SD 1,05); Regulier: gemiddeld 7,96 (SD 1,09)); maar voor zowel de ATO-ritten als de reguliere ritten geldt dat het comfort tussen ruim voldoende tot goed beoordeeld werd.

Er is ook gekeken naar mogelijke verschillen tussen de ritten met dezelfde type besturing (dus tussen de ritten met ATO en tussen de ritten regulier). Hierbij is geen significant verschil gevonden tussen de 1e en de 2e ritten (de herhaling) van dezelfde type besturing en is ook geen significante interactie gevonden. Per rit is ook getoetst (t-test) of het vooruit- of achteruitrijden invloed had op het rapportcijfer over het comfort. Ook hier zijn geen significante verschillen gevonden.

Noot: voor uitleg van significantie en de statistische waarden p en η^2 , zie paragraaf 5.4.6.4.



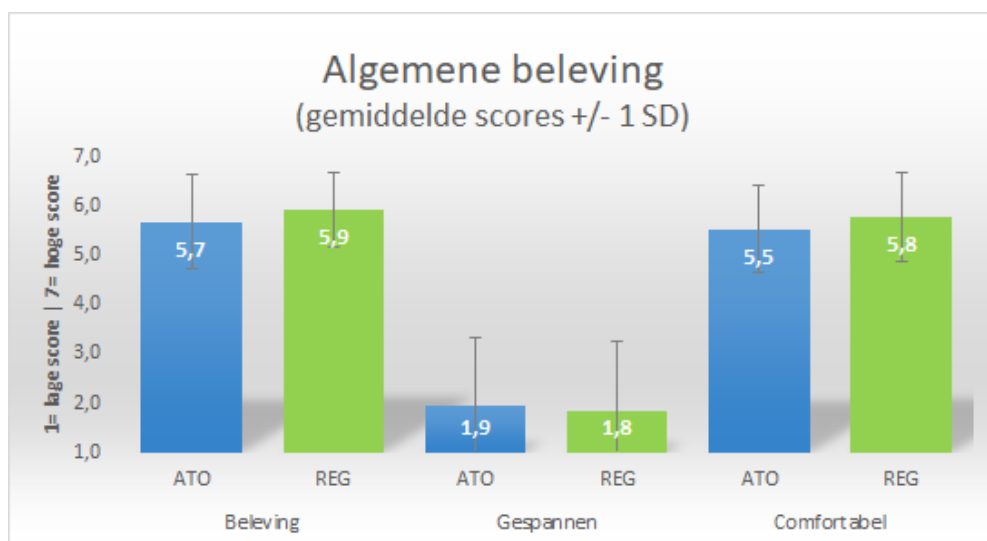
Figuur 5.5: Rapportcijfers van de verschillende ritten

5.4.6.2 De algemene beleving tijdens de ritten

Voor de beoordeling van de algemene beleving zijn na iedere rit de volgende vragen gesteld:

- Wat was uw algehele beleving van deze rit? (1=zeer onprettig | 7=zeer prettig)
- Voelde u zich gespannen tijdens de rit? (1=niet gespannen | 7=zeer gespannen)
- Vond u de rit comfortabel? (1=zeer oncomfortabel | 7=zeer comfortabel)

Over het algemeen werd de algemene beleving goed beoordeeld. De scores zijn verwerkt in figuur 5.6.



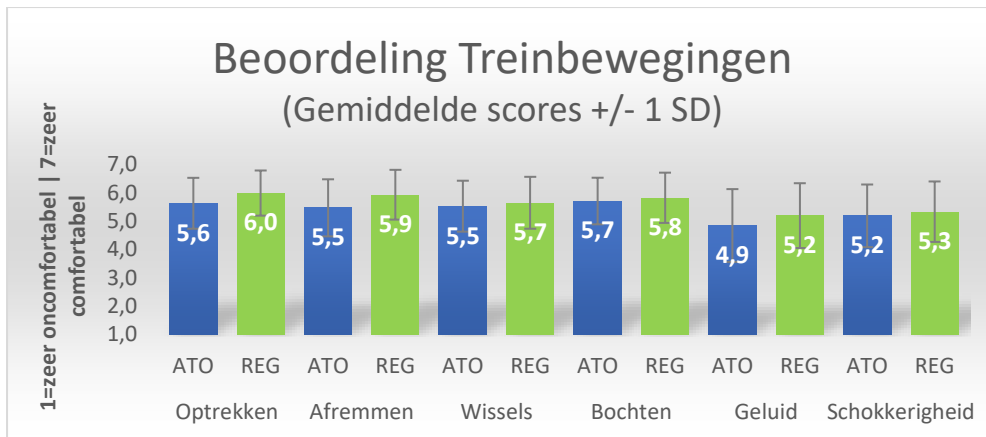
Figuur 5.6: De algemene beleving tijdens de verschillende ritten.

5.4.6.3 Beoordeling van de treinbewegingen

Ten aanzien van treinbewegingen zijn de volgende vragen gesteld:

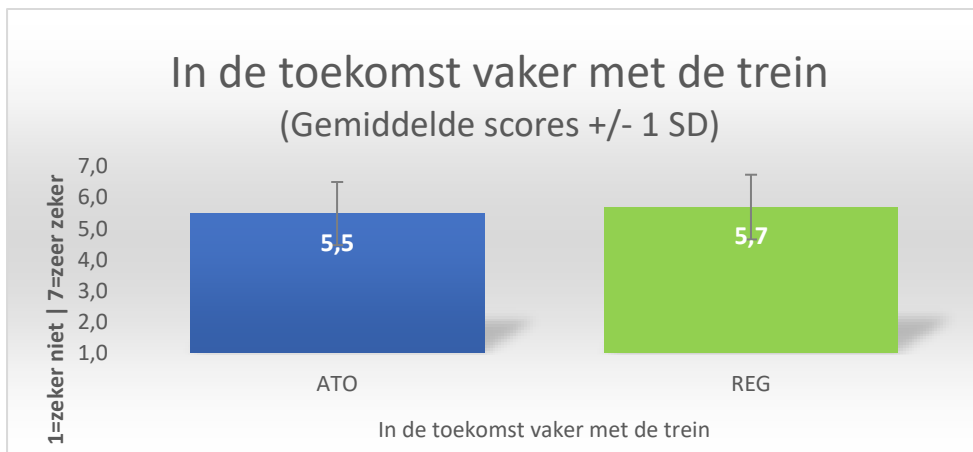
- Hoe beoordeelt u het optrekken van de trein?
- Hoe beoordeelt u het afremmen van de trein?
- Hoe beoordeelt u het rijden over wissels?
- Hoe beoordeelt u het rijden in bochten?
- Hoe beoordeelt u het geluid van het rijden?
- Hoe beoordeelt u de schokkerigheid van het rijden?

De beoordeling van de proefpersonen is verwerkt in figuur 5.7. Bij alle beoordelingen geldt: 1=zeer oncomfortabel | 7=zeer comfortabel.



Figuur 5.7: Ervaring van de treinbewegingen

Ten slotte werd de vraag gesteld: Met een rit als deze zou ik in de toekomst vaker met de trein willen reizen (1=zeker niet | 7=zeer zeker). Zowel met als zonder ATO blijft men in de toekomst graag met de trein reizen. Dit is ook te zien in figuur 5.8.



Figuur 5.8: Met een rit als deze zou ik in de toekomst vaker met de trein willen reizen

5.4.6.4 Significante verschillen tussen ATO en regulier in de ervaring tijdens de ritten

Om inzicht te geven in de significante verschillen tussen ATO en reguliere ritten, zijn de verschillende vragen samengevat in een tabel, zie tabel 4.3. Daarin zijn de volgende parameters, horende bij de toets, opgenomen:

- Df (vrijheidsgraden);
- F (toetsingsgrootte);
- p-waarde (kans dat het gevonden verschil op toeval berust);
- η^2 (maat voor grootte van het effect, zie voor uitleg ook par 4.5.1)

	df	F	p	η^2	ATO Gem (SD)	REG Gem (SD)
Algemeen						
Beleving	(1,161)	10.367	0.002	.060	5.7 (0.9)	5.9 (0.8)
Gespannen	(1,161)	0.587	0.445	.004	1.9 (1.4)	1.8 (1.4)
Comfortabel	(1,161)	10.329	0.002	.060	5.5 (0.9)	5.8 (0.9)
Treinbewegingen						
Optrekken	(1,161)	22.431	0.000	.122	5.6 (0.9)	6.0 (0.8)
Afremmen	(1,161)	25.611	0.000	.137	5.5 (1.0)	5.9 (0.9)
Wissels	(1,161)	3.745	0.055	.023	5.5 (0.9)	5.7 (0.9)
Bochten	(1,161)	3.795	0.053	.023	5.7 (0.8)	5.8 (0.9)
Geluid	(1,161)	15.899	0.000	.090	4.9 (1.3)	5.2 (1.1)
Schokkerigheid	(1,161)	2.666	0.104	.016	5.2 (1.1)	5.3 (1.1)
In de toekomst vaker met de trein	(1,161)	7.232	0.008	.043	5.5 (1.0)	5.7 (1.0)

Vrijheidsgraden, toetsingsgroottes, p-waardes (kans dat verschil op toeval berust), effectgrootte en gemiddelde scores en standaarddeviaties.

Toelichting: betekenis van de statistische termen

- *Statistische significantie is een maat om aan te geven of een gevonden verschil in een onderzoek met grote waarschijnlijkheid een werkelijk verschil betreft. In dit onderzoek werd daarvoor de F-toets gebruikt, een statistische toets waarmee het verschil tussen twee varianties kan worden vastgesteld. Het aantal vrijheidsgraden (df) geeft het aantal onafhankelijke waarnemingen weer waarop de berekening is gebaseerd.*
- *p-waarde: voor de p-waarde wordt normaliter de grens van 0,05 aangehouden. Is er een p-waarde kleiner dan 0,05, dan spreken we van 'statistisch significant'. Dat betekent dat er een kans van ten hoogste 5% is dat het gevonden verschil op toeval berust.*
- *η^2 : niet elk gevonden statistisch significant verschil is relevant voor het handelen. η^2 is een maat die de grootte van het effect aangeeft. Deze maat loopt van 0 tot 1 waarbij waarden rond .01 een klein effect aangeven, .03 een middelgroot effect en > .14 een groot.*

Op de vraag over Beleving en de vraag over het Comfort zijn statistisch significante hoofdeffecten gevonden voor wat betreft *type besturing* (ATO vs regulier). Reguliere ritten scoren net iets beter dan de ATO-ritten. Zoals de grafieken laten zien zijn de verschillen niet groot. De vraag 'Voelde u zich gespannen tijdens de rit' liet geen significante verschillen zien.

De vragen over de treinbewegingen laten een statistisch significant verschil zien voor *type besturing* op de scores voor Optrekken, Afremmen en Geluid. Reguliere ritten scoren op deze vragen beter dan ATO ritten. Voor Wissels, Bochten en Schokkerigheid zijn er geen significante verschillen gevonden voor *type besturing*.

Ook de vraag 'Met een rit als deze zou ik in de toekomst vaker met de trein willen reizen', toont een significant verschil tussen de ATO-bestuurde en de reguliere ritten.

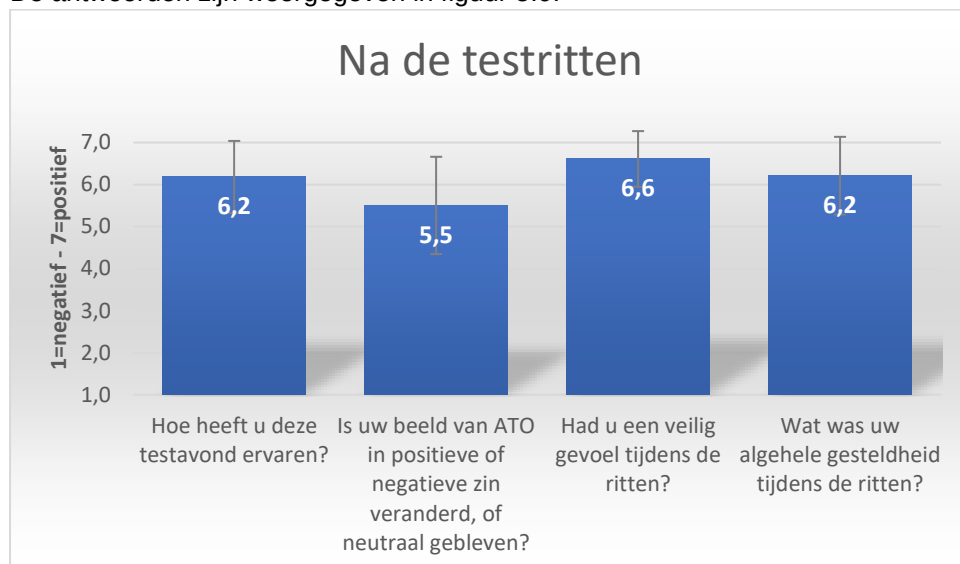
De verschillen tussen de scores op *type besturing*, *ontlopen* ATO en regulier elkaar niet veel, maar zijn wel consistent in dezelfde richting. De gevonden effectgrootte is het grootst bij Optrekken en Afremmen (middelgroot effect). Er zijn geen significante verschillen gevonden voor de factor *herhaling* (rit 1 vs rit 2), en ook geen significante interacties (*type besturing* * *herhaling*).

5.4.7 Vragen na de ritten

Na afloop van de ritten werden de volgende vragen gesteld:

- Hoe heeft u deze testavond ervaren? (1=zeer onprettig | 7=zeer prettig)
- Is uw beeld van ATO in positieve of negatieve zin veranderd, of neutraal gebleven? (1= in zeer negatieve zin | 7= in zeer positieve zin)
- Had u een veilig gevoel tijdens de ritten? (1= zeer onveilig gevoel | 7= zeer veilig gevoel)
- Wat was uw algehele gesteldheid tijdens de ritten? (1= zeer slecht | 7= zeer goed)

De antwoorden zijn weergegeven in figuur 5.9.



Figuur 5.9: De beoordelingen van de deelnemers op de vragen na de ritten

De gegeven scores op deze na de testritten gestelde vragen geven aan dat de testavond als prettig is ervaren (score 6,2 op een 7-puntschaal), men een (zeer) veilig gevoel had tijdens de ritten (score 6,6 op een 7-puntschaal) en de algehele gesteldheid goed was. Daarbij gaven 18 mensen aan dat zij zich tijdens een of meerdere ritten duizelig of misselijk te hebben gevoeld (score 4 of hoger op een 7-puntschaal). Op de vervolgvraag wanneer dit is begonnen, gaven 10 mensen aan dat dit 'niet van toepassing' is. Van de overige 8 valt op dat hiervan 7 personen komen uit de groepen die gestart zijn met een ATO rit (op verschillende dagen).

De vraag of het beeld van ATO in positieve of negatieve zin veranderd is of neutraal gebleven is scoort een 5,5 op een 7-puntschaal (1=in zeer negatieve zin, 7=in zeer positieve zin). Er is slechts 1 persoon wiens beeld in negatieve zin is veranderd.

5.4.7.1 Ervaren en minder ervaren reizigers

Omdat in de literatuur naar voren kwam dat er verschillen zouden kunnen zijn in de ervaring van ervaren en niet-ervaren reizigers ('Regelmatige treinreizigers hadden een meer positieve mening over zelfrijdende treinen dan mensen die minder vaak gebruik maakten van de trein'), is hier nog een specifieke uitsplitsing voor gemaakt.

De vraag 'Hoe vaak reist u met de trein' is gebruikt om twee groepen te maken:

Hoe vaak reist u met de trein?	N	%
Nooit	2	1,2
0 - 12x per jaar	48	29,6
Meerdere keren per maand	57	35,2
Meerdere keren per week	55	34,0
Total	162	100,0

- Deelnemers die 'nooit' of '0 – 12x per jaar' te reizen zijn ingedeeld in de groep 'minder ervaren reizigers' (N=50);
- Deelnemers die aangaven 'meerdere keren per week' te reizen zijn ingedeeld in groep 'ervaren reizigers' (N=55).

De groep 'Meerdere keren per maand' is in deze analyse buiten beschouwing gelaten.

Voor de analyse is een Repeated measures ANOVA gebruikt, een statistische toets waarmee gemiddelden van achtereenvolgende waarnemingen binnen een en dezelfde groep kunnen worden vergeleken. Daarbij waren type besturing (ATO vs. REG) en herhaling (1e rit vs. 2e rit) de factoren die binnen de proefpersonen werden vergeleken, en ervarenheid met reizen (minder ervaren reizigers vs. ervaren reizigers) de factoren die tussen de proefpersonen werden vergeleken.

5.4.7.2 Resultaten

In de vragen vooraf zijn geen significante verschillen gevonden tussen de verwachting van ervaren en die van minder ervaren reizigers.

In de rapportcijfers over het comfort is ook voor deze subgroepen een significant effect gevonden in de Type besturing ($F(1,103)=4.3$; $p=.04$; $\eta^2=.04$), waarbij de reguliere ritten iets hoger scoorden dan de ATO ritten. (ATO 7,7 (SD 1.0); REG 8,0 (SD 1.1)). Er zijn geen verschillen tussen de 1e en 2e herhaling (van dezelfde besturing) en ook geen significante interacties (type besturing * herhaling).

Ook in de subgroepen was de waardering voor Beleving, Optrekken, Afremmen, Geluid, en of men in de toekomst vaker met de trein wil reizen, bij de reguliere ritten hoger. Voor deze variabelen zijn er wederom geen significante verschillen tussen de 1e en 2e herhaling en zijn er geen significante interacties (type besturing * herhaling).

5.4.7.3 Opmerkingen van reizigers na de ritten

Na afloop van elke rit was er ruimte voor opmerkingen. In deze paragraaf is een deel van de gemaakte opmerkingen opgenomen.

ATO1: veel opmerkingen over het harde remmen, en het geluid, 'gepiep'.

- 'Volgens mij was dit een niet-ATO rit'
- 'Ik heb meer schokkerigheid ervaren dan de vorige rit.'
- 'Minder comfortabel dan de 1e rit. De stops iets schokkeriger en iets minder geleidelijk geremd.'
- 'Ik vond deze rit schokkeriger. Het remmen vond ik ook minder vloeiend gaan.'

ATO2: wisselende opmerkingen, over het (ontbreken van) comfort aan de stoelen, over het geluid (piepen, brommen).

- 'Dit was volgens mij net als de eerste rit met ATO'
- 'Lijkt erop dat remprofiel niet constant is, rem wordt eerst weer ff gelost...'
- 'moeilijk aan te geven welke rit prettiger is. Ik heb gemerkt dat de nadering van de stations rustiger verliep maar dat wil niet zeggen dat het comfortabeler is. ik denk dat dit een handmatige rit was'
- 'Dit was vermoed ik een machinistenrit. NVBS-lid hier.'
- 'zeer luide motor en schokkerige trein'

REG1: opmerkingen over geluid, sommigen vinden dat het soepeler gaat 'hij remt beter', anderen vinden juist van niet.

- 'Nogmaals ik merk niet veel verschil. Het optrekken en stoppen gaat mooi en geleidelijk. Alleen de rails zou wel wat vlakker mogen. Het is nu wel heel erg schokkerig af en toe..'
- 'Vervelende geluiden vervelende piep'
- 'Leek vloeiender te gaan, minder abrupt.'
- 'Het optrekken was behoorlijk rustig. Voor mijn gevoel veel rustiger dan gemiddeld.'

- 'Afremmen en optrekken bij Buitenpost lijkt perfect, dus geautomatiseerd...'
- 'De trein trok soepeltjes op, de rit was zeer comfortabel en eveneens vrijwel zonder schokken. De schokken die er waren zijn te wijten aan het spoor.'
- 'Tijdens het remmen bij de perrons merk je duidelijk een rem voordat hij daadwerkelijk gaat remmen voor te stoppen. Hiermee vermoed ik ook dat het ATO betreft.'

REG2:

- 'Gokje: geen ATO';
- 'Hier reed de trein duidelijk wederom op ATO. Het optrekken verliep soepel, daarnaast ging het afremmen ook lekker soepel'
- 'Ja ik vind de rails vooral tussen Grijpskerk en Buitenpost niet best daardoor wordt de reis een stuk minder comfortabel. Wanneer in de toekomst de trein sneller moet gaan rijden, dan zal het spoor behoorlijk verbeterd moeten worden.'
- 'Deze rit voelde iets anders aan dan de andere ritten. De andere ritten kon ik voor mijn gevoel duidelijk het verschil merken tussen ATO en machinist. Deze rit is voor mij een twijfelgeval. Vermoed ATO.'
- 'Geen bijzonderheden deze rit'
- 'afremmen en optrekken ging heel soepel zonder schokken. Je merkte bijna niet dat we gestopt waren. Samen met de 1e rit was dit heel comfortabel

5.4.8 Conclusies naar aanleiding van het reizigersonderzoek

Over het algemeen werden zowel ATO- als de reguliere ritten goed beoordeeld. Er zijn geen heel grote verschillen gevonden. Toch is er wel een klein verschil gevoeld, waarbij de reguliere ritten iets prettiger werden ervaren dan de ritten met ATO (*type besturing*). Tussen ritten van dezelfde type besturing werd geen verschil waargenomen. Nogmaals mag benadrukt worden dat beide manieren van aansturen een goede beoordeling hebben gekregen.

5.4.8.1 Rapportcijfers

De gegeven rapportcijfers voor het comfort van de treinbewegingen liggen overall gemiddeld op 7,8, waarbij de ritten met ATO gemiddeld werden beoordeeld met een 7,7 en de reguliere ritten gemiddeld met een 8,0 (statistisch significant verschil). Een score rond de 7 wordt vaak gezien als 'ruim voldoende', en een score rond de 8 als 'goed'.

5.4.8.2 Beleving en comfort

De gemiddelde scores voor de beleving en het comfort zijn statistisch significant verschillend voor ritten met ATO versus ritten zonder ATO. Reguliere ritten scoren net iets beter dan de ATO-ritten. (Beleving 5,7 (ATO) versus 5,9 (regulier), comfort 5,5 (ATO) versus 5,8 (regulier), beide op een schaal van 1-7).

5.4.8.3 Treinbewegingen

Bij de treinbewegingen is een statistisch significant verschil gevonden op de scores voor Optrekken, Afremmen en Geluid. Regulier scoort op deze vragen beter dan ATO. Voor Wissels, Bochten en Schokkerigheid is er geen significant verschil gevonden.

En tenslotte is op de vraag 'Met een rit als deze zou ik in de toekomst vaker met de trein willen reizen' een significant verschil gevonden tussen de ATO en de reguliere ritten. Regulier werd ook hier iets beter beoordeeld (5,5 ATO versus 5,7 regulier).

5.4.8.4 Resultaat reizigerservaring naar aanleiding van deze ritten

De reguliere ritten scoren over het algemeen en op een consistente wijze net iets beter dan de ATO-ritten. Echter, de verschillen zijn niet groot. Ook dat is een belangrijke conclusie. Beide manieren van aansturen krijgen goede beoordelingen.

Dat er geen groot verschil was, bleek ook uit de opmerkingen. Deelnemers waren niet op de hoogte van welke rit met ATO werd gereden en in de gemaakte opmerkingen is te zien dat men het soms wel probeerde te raden, maar dat niet altijd goed kon inschatten. Op de vooraf gestelde vraag of men verschillen verwacht te zullen merken geeft men aan geen grote verschillen te verwachten.

Noot: Deze ritten waren de eerste ritten met passagiers, met een ATO-systeem dat nog in de test- en ontwikkelfase zit. Opgemerkt mag worden dat bij de testen voor een bepaalde configuratie van ATO is gekozen. Er kan dus slechts iets worden geconcludeerd over een besturing met ATO met precies deze instellingen. Hetzelfde geldt voor de manueel bestuurd, reguliere ritten. Deze werden door één en dezelfde machinist gereden, die is opgeleid tot testmachinist. De prestaties van deze machinist zijn mogelijk verschillend van die van de gemiddelde machinist, waarbij de prestaties mogelijk ook nog beïnvloed werden, gezien de bijzondere testsituatie en het feit dat hij tijdens de test beoordeeld werd.

In paragraaf 5.6 wordt deze conclusie in samenhang met de conclusie van het G-krachtenonderzoek belicht.

5.5 G-krachtenonderzoek

Tijdens de testritten zijn de optredende lineaire versnellingen ('G-krachten') gemeten, om zo de verschillen in treinbeweging met en zonder ATO objectief te kunnen kwantificeren. Hierbij is zowel gekeken naar de optredende versnellingen, als de verandering daarin over de tijd, de ruk. Deze kunnen beide bijdragen aan het ervaren rijcomfort.

5.5.1 Methode

Voor het meten van de versnellingen zijn twee verschillende sensoren gebruikt: De Human Activity Monitor en de Shimmer sensor. De Human Activity Monitor (Gulf Coast Data Concepts, LLC, Waveland U.S.A) heeft een groot meetbereik, maar is daardoor iets onnauwkeuriger en is vooral gebruikt als back-up-systeem. De analyses die in dit rapport staan vermeld zijn gebaseerd op de data van de nauwkeurigere Shimmer sensor (Shimmer Sensing, Dublin, Ierland).

Beide sensoren meten de versnelling in de drie hoofdrichtingen: voor-achterwaarts (x), zijwaarts (y) en verticaal (z), op een meetfrequentie van 50 Hz. De sensoren waren geplaatst onder één van de stoelen, waarbij de lengterichting van de sensor goed was afgesteld op de lengterichting van de trein (zie figuur 5.10: De twee kleine versnellingsopnemers). Voor de veiligheid waren de sensoren niet in het deel geplaatst waar de proefreizigers zaten, maar in één van de achterste compartimenten van de trein. De plaatsing kan invloed hebben op de metingen, bijvoorbeeld doordat de trillingen in het achterste deel van de trein sterker zijn dan in het midden. Omdat de analyse zich echter concentreert op bewegingen in het lage frequentiedomein verwachten we dat de plaatsing de uitkomsten niet veel zal beïnvloeden.

De gemeten versnellingsdata bevat van nature veel ruis. Om de signalen beter zichtbaar te krijgen is de gemeten data eerst gefilterd en vervolgens afgevlakt⁶.

Door deze bewerking wordt de ruis (het hoogfrequente deel in het signaal) in het signaal verminderd, maar blijft de originele vorm (het laagfrequente deel in het signaal) behouden. Om de veranderingen in de versnelling en de ruk inzichtelijk te maken is het versnellingssignaal gedifferentieerd en ook afgevlakt. De data is vervolgens weergegeven als functie van de tijd, en minimale en maximale waarden van versnelling en ruk zijn weergegeven in een tabel.

⁶ Hiervoor is een laagdoorlaatfilter met een afsnijfrequentie van 1 Hz gebruikt en een Savitsky-Golay afvlakfilter met een venstergrootte van 100 datapunten. Dit is een veelgebruikte bewerking op dit soort data.

5.5.2 De meetresultaten

Er is van vier van de vijf testdagen data beschikbaar, op de eerste dag was met beide sensoren geen data opgenomen. In figuur 5.10 is een voorbeeld te zien van de ruwe data van één van de opnames. De versnellingen zijn in de drie hoofdrichtingen gemeten:

- Het optrekken en afremmen is zichtbaar in de voor-achterwaartse (x) richting
- Het rijden door bochten leidt tot zijwaartse versnellingen (y richting)
- Hobbels leiden vooral tot versnellingen in de verticale (z) richting.

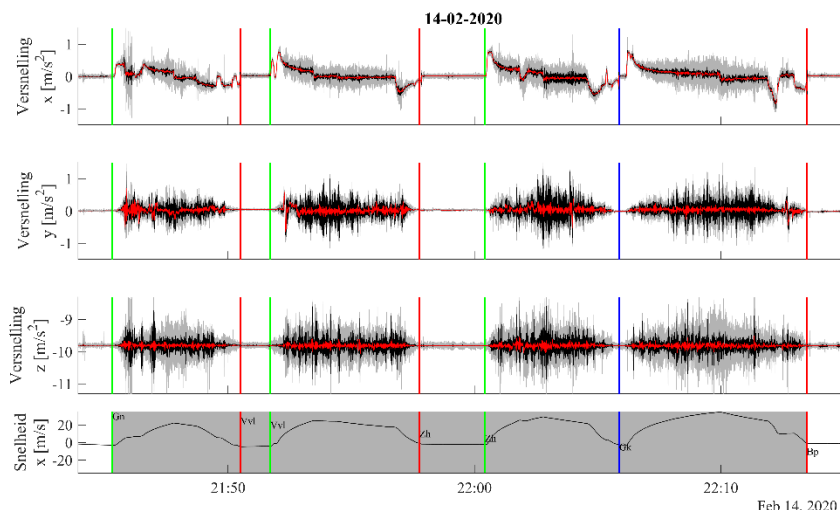
Daarbij kan het effect van trillingen en schokken zichtbaar zijn in alle drie de richtingen.

Gebeurtenissen en snelheid tijdens de ritten

In figuur 5.10 geven de verticale lijnen het tijdstip van de verschillende gebeurtenissen aan. (Groen = vertrek, rood = aankomst en blauw = korte stop). Deze kleurcodering is ook terug te vinden in figuur 5.11.) En grove indicatie van het tijdstip van elke gebeurtenis is gegeven door de dienstregeling, die gevolgd werd met een marge van 2 minuten. Vervolgens is het exacte tijdstip van elke start en stop op basis van visuele interpretatie van de data bepaald. Het traject is afgebeeld in figuur 5.12.

De onderste grafiek in figuur 5.10 geeft een indicatie van de voorwaartse snelheid weer, die bepaald is op basis van integratie van de gemeten versnelling. Omdat dit signaal ruis bevat, kan er een afwijking ontstaan tussen de werkelijke snelheid en de berekende snelheid (geïntegreerde versnelling). Hierdoor dient de snelheid in figuur 5.10 slechts als indicatie gelezen te worden.

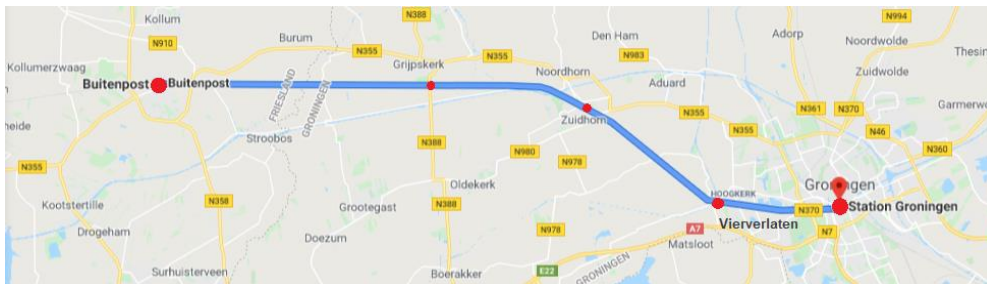
Het is duidelijk dat het meest gebeurt in voor- en achterwaartse richting, namelijk bij het optrekken en afremmen van de trein. Hierop is de analyse dan ook toegespitst. De versnellingen in andere richtingen (y en z) zouden nog gebruikt kunnen worden om het effect van trillingen verder te analyseren. De trillingen, mogelijk naar aanleiding van schokkerigheid van de rails, zijn duidelijk zichtbaar in de zijwaartse en neerwaartse richting. Het gemeten traject bevatte niet veel bochten, en deze zijn ook niet duidelijk zichtbaar in de gemeten zijwaartse versnelling. De G-krachten over het hele traject zijn terug te vinden in Bijlage 8.3.



Figuur 5.10: Voorbeeld van de gemeten versnellingen tijdens 1 van de ritten in de drie richtingen in combinatie met het snelheidsprofiel van de rit in voor- en achterwaartse richting. Ruwe data in grijs, gefilterde data in zwart en afgevlakte data in rood. De verticale lijnen geven de verschillende gebeurtenissen aan, zoals weergegeven in de tabel.

Afkorting en kleur	Gebeurtenis
Gn	Vertrek uit Groningen (Vierverlaten)
	(NB Gn-Vvl geen onderdeel van de test)
Vvl	Aankomst Vierverlaten
Vvl	Vertrek Vierverlaten
Zh	Aankomst Zuidhorn
Zh	Vertrek Zuidhorn
Gk	Korte stop Grijskerk
Bp	Aankomst Buitenpost

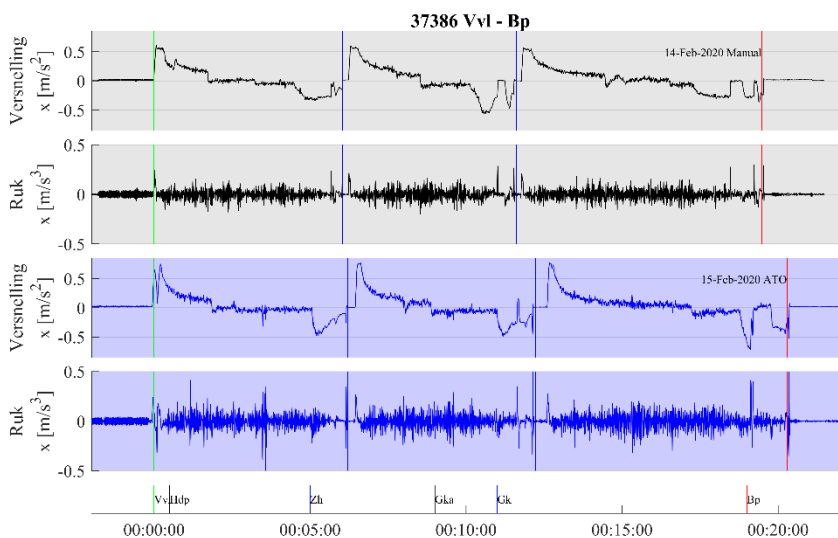
Figuur 5.11: Kleurcodering en gebruikte afkortingen voor marking gebeurtenissen in de versnellingsdata



Figuur 5.12: Het testtraject. De test werd uitgevoerd tussen Vierverlaten en Buitenpost.

5.5.3 Vergelijking ATO en niet-ATO in versnellingen

Om de vergelijking tussen een ATO en niet-ATO rit te kunnen maken zijn alle ritten onder elkaar afgebeeld. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 5.13, die de data van het traject Buitenpost – Vierverlaten weergeeft, zoals gemeten op twee verschillende dagen. De blauwe arcering geeft een ATO rit aan, de grijze arcering een reguliere rit. Zowel de versnelling als de ruk zijn weergegeven.



Figuur 5.13: Voor- en achterwaartse versnelling en ruksignaal voor een ATO-rit (blauw) en reguliere rit (zwart), opgenomen op twee verschillende dagen. De start- en stop-events zijn door de verticale lijnen gemarkeerd (zie figuur 5.11)

Het is duidelijk te zien dat de trein drie keer optrekt (versnelling positief), en weer afremt (versnelling negatief). Optrekken gebeurt door een snelle toename in versnelling, gevolgd door een langzamere afname tot nul. Dan heeft de trein een constante snelheid bereikt. Het afremmen gebeurt in twee fasen, eerst een eerste verlaging van de snelheid (negatieve versnelling), gevolgd door een tweede afremfase om de trein geheel tot stilstand te brengen. De scherpe pieken in het ruksignaal (bijvoorbeeld op het moment van optrekken) geven aan hoe snel de versnelling opbouwt (of afneemt). Hoe hoger de piek, hoe abrupter (schokkeriger) de beweging.

Kijkend naar de data laten de verschillen zich als volgt karakteriseren:

- Met ATO treden er hogere versnellingen op, zowel bij het optrekken als het remmen.
- Met ATO zijn de veranderingen in versnelling, de ruk, tijdens optrekken en afremmen ook hoger (dit is te zien aan de pieken in de ruk, op het moment van optrekken en afremmen)
- Met ATO is de variabiliteit in de ruk over de gehele rit groter. Dit is te zien aan de bredere 'band' in het ruk-signaal, wat aangeeft dat er met ATO veel meer veranderingen in versnellingen (trillingen) waren.

Deze effecten zijn in elke rit zichtbaar en zijn ook consistent over de verschillende dagen. In Bijlage 8.3. zijn de opgenomen versnellingen voor elke rit en dag afzonderlijk weergegeven.

5.5.4 De maximale en minimale versnelling per rit

Om de effecten te kwantificeren, is voor elke rit de maximale en minimale versnelling en ruk bepaald, alsmede de variabiliteit van de ruk over de gehele rit. Dit laatste wordt weerspiegeld in de RMS-waarde ('root-mean-square', ofwel het gemiddelde van kwadraten van de afzonderlijke waarden) van de ruk over de gehele rit. De afzonderlijke waarden staan afgebeeld in onderstaande tabel. Een vergelijking van de gemiddelden waarden over alle ritten laat inderdaad zien dat ATO op alle variabelen op hogere waarden uitkomt. De standaarddeviatie is een maat voor de variabiliteit, en laat zien dat dit patroon consistent is over de verschillende ritten en testdagen.

Dag	Ritcode	Traject	Rit	ATO	Min. Acc. [m/s ²]	Max Acc [m/s ²]	Min. Ruk [m/s ³]	Max. Ruk [m/s ³]	RMS Ruk [m/s ³]
15	37382	Vvl - Bp	1	0	-0.564	0.759	-0.340	0.508	0.063
16	37382	Vvl - Bp	1	0	-0.583	0.749	-0.355	0.435	0.060
14	37367	Bp - Vvl	2	0	-0.537	0.621	-0.365	0.331	0.047
17	37367	Bp - Vvl	2	0	-0.647	0.546	-0.378	0.572	0.056
14	37386	Vvl - Bp	3	0	-0.562	0.605	-0.204	0.298	0.046
17	37386	Vvl - Bp	3	0	-0.556	0.602	-0.261	0.463	0.054
15	37371	Bp - Vvl	4	0	-0.659	0.729	-0.602	0.580	0.075
16	37371	Bp - Vvl	4	0					

5.5.5 Conclusies naar aanleiding van het G-krachtenonderzoek

Het verloop van de voor-achterwaartse versnelling over de tijd is consistent over de verschillende testritten en testdagen. De ATO ritten karakteriseren zich door hogere versnellingen tijdens zowel het optrekken als afremmen, een meer abrupte toe- en afname van de versnelling, en meer variaties in versnelling, dus een schokkeriger rijgedrag, over de gehele rit. Het is aannemelijk dat dit de comfortbeleving heeft beïnvloed.

5.6 Conclusies en aanbevelingen

5.6.1 Conclusies

Allereerst is het onderzoek, waarbij testritten met passagiers werden uitgevoerd, interessant voor de spoorsector, gezien er over de *passagierservaring* van automatisch rijdende treinen in de literatuur nog weinig tot niets te vinden is. Dat maakt het onderzoek relevant voor de branche.

Het reizigersonderzoek werd met veel enthousiasme onder de reizigers ontvangen. Binnen enkele dagen zaten alle testritten vol.

In het reizigersonderzoek werd met behulp van enquêtes uitgevraagd hoe de reizigers de ritten ervoeren. Voor de reizigers was het een 'blinde' test; zij wisten niet of de rit met of zonder ATO gereden werd. Over het algemeen werden zowel de reguliere ritten als de ATO-ritten goed beoordeeld. Wel waren er tijdens deze testritten structureel, significante verschillen tussen de beoordelingen van de ritten. Hierbij scoorden de reguliere ritten beter dan de ritten die gereden zijn met ATO. De verschillen waren echter niet groot: de ritten met ATO werden gemiddeld gewaardeerd met een 7,68 en de reguliere ritten gemiddeld met een 7,96, beiden op een schaal van 1 tot 10. Ondanks het significante verschil werden zowel de ATO ritten als de reguliere ritten goed beoordeeld.

Naast de reizigerservaring is ook een G-krachtenonderzoek uitgevoerd waarbij naar objectieve metingen rond de versnellingen van de trein tijdens de ritten is gekeken. Tijdens deze analyse zijn verschillen tussen de ATO- en niet-ATO-ritten gevonden. De versnellingen waren bij ATO-ritten hoger dan bij niet-ATO-ritten, de versnellingen werden sneller op- en afgebouwd en de rit was over het algemeen schokkeriger.

Noot: Deze ritten waren de eerste ritten met passagiers, met een ATO-systeem dat nog in de test- en ontwikkelfase zit. Opgemerkt mag worden dat bij de testen voor een bepaalde configuratie van ATO is gekozen. Er kan dus slechts iets worden geconcludeerd over een besturing met ATO met precies deze instellingen. Hetzelfde geldt voor de manueel bestuurde, reguliere ritten. Deze werden door één en dezelfde machinist gereden, die is opgeleid tot testmachinist. De prestaties van deze machinist zijn mogelijk verschillend van die van de gemiddelde machinist, waarbij de prestaties mogelijk beïnvloed werden, gezien de bijzondere testsituatie en het feit dat hij tijdens de test beoordeeld werd.

5.6.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Tijdens de gemaakte testritten werd, hoewel het een klein verschil was, verschil gevoeld tussen de ATO en niet-ATO ritten. De treinbewegingen en het comfort werden bij de reguliere ritten iets beter beoordeeld. Daarbij werden bij het G-krachtenonderzoek grotere verschillen in de versnellingen gemeten tijdens de ATO-ritten, in vergelijking met de reguliere ritten.

Meerdere machinisten

De gemaakte vergelijking in dit onderzoek zou mogelijk nog kunnen worden aangescherpt wanneer testen met meerdere machinisten worden uitgevoerd.

Het finetunen van ATO

Het is aannemelijk dat er een verband zit tussen de resultaten van het reizigersonderzoek en het G-krachtenonderzoek. Momenteel is deze aanname op logica gebaseerd (de iets minder hoge waardering zou het gevolg kunnen zijn van het sneller opbouwen van versnellingen en meer

schokken), maar vooralsnog is dit slechts een correlatie en weten we niet of er mogelijk ook een causaal verband is. Dit zou verder kunnen worden onderzocht.

Het zou daarbij goed zijn om deze ATO-testritten niet als 'de ATO rit' te bekijken, maar als rit die met ATO gereden is, onder bepaalde keuzes en configuratie. Het zou kunnen lonen om te onderzoeken hoe de verschillende bewegingen, zoals optrekken en afremmen, zó kunnen worden ingesteld, dat de versnellingen minder groot zijn, of langzamer worden op- of afgebouwd, waardoor ze (indien dit verband klopt) een positief effect hebben op de ervaring van reizigers.

Door 'slim te rijden' en versnellingen aan te passen, is mogelijk nog veel te behalen. Er liggen nog volop kansen voor ATO, dat nog lang niet uitontwikkeld is.

Aandacht voor bewegingsziekte en subjectieve inschattingen van mensen

Vanuit de literatuurscan bleek dat er ook nog weinig bekend is over bijkomende effecten, zoals bewegingsziekte, met automatisch rijdende treinen. In andere vormen van automatisering in de mobiliteit komt dit regelmatig voor. Het zou interessant zijn om hierop in te zoomen.

Verder zou onderzoek naar de belangrijkste randvoorwaarden van mensen in het kader van reizen met de trein, en de meer subjectieve inschattingen, zoals acceptatie en vertrouwen in automatisering, of het gevoel van veiligheid, ook van mensen buiten deze testgroep, interessante informatie kunnen geven.

6 Beeldverslag reizigersritten en media-evenement

6.1 Media-evenement

Op woensdag 12 februari 2020 vond er evenement plaats voor speciale gasten en media om de eerste rit met een met ATO uitgeruste passagierstrein bij te wonen. Een primeur voor het spoor. Aan boord waren onder ander de Directeur Generaal Mobiliteit van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat Kees van der Burg, CEO ProRail John Voppen, Directeur Arriva Nederland Milfred Hart en Gedeputeerde van de provincie Groningen Fleur Gräper van Koolwijk. Onder grote belangstelling van de pers gingen de gasten aan boord van de trein.

Tijdens de rit konden de gasten ervaren hoe het is om onder ATO te rijden en mochten ze een kijkje nemen in de cabine. Ook kregen de gasten de gelegenheid hun visie over de toekomst van ATO en de toekomst van het Nederlandse spoor te delen.

Na afloop van de demonstratierit werd er in de ontvangstlocatie (de Puddingfabriek) nagepraat over de ATO-ontwikkelingen en was er de mogelijkheid om met een treinsimulator zelf te ervaren hoe het is om als machinist een ATO-trein te besturen.

Fotoreportage Stefan Verkerk

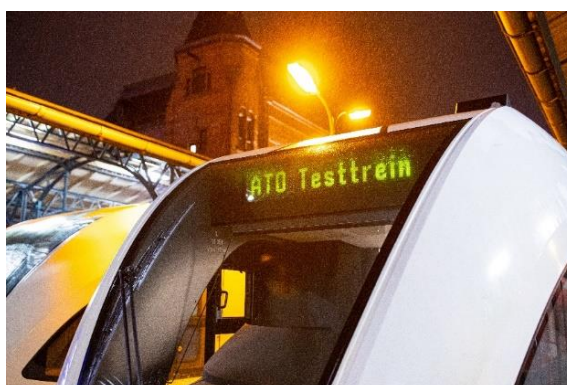




De ATO-Testtrein in actie

6.2 Reizigersritten

Hoe beleeft een reiziger een rit in een automatisch bestuurd trein? Dat hebben we in februari 2020 voor de allereerste keer getest. Onderzocht is hoe reizigers het rijden onder ATO ervaren. Wat merken reizigers er bijvoorbeeld van als een trein automatisch optrekt en remt? Geïnteresseerden kregen de unieke mogelijkheid om als een van de eersten in Nederland mee te rijden met een automatisch bestuurd trein. Arriva had hiervoor speciaal een aanmeldpagina aangemaakt op hun website. Het aantal aanmeldingen was overweldigend: binnen 24 uur zaten alle ritten al vol.



De ritten vonden plaats op donderdag 13 tot en met maandag

In de trein waren projectmedewerkers als begeleiding aan boord voor instructie en vragen van reizigers. Ook waren er treinstewards van Arriva aanwezig om het in- en uitstappen te begeleiden en om ervoor te zorgen dat de reizigers zich aan de instructies hielden. Op alle stations waar de testtrein stopte hadden we toezicht geregeld om te voorkomen dat andere reizigers wilden instappen; de deuren van de testtrein bleven overigens gesloten.



Boven: De passagiers stappen in

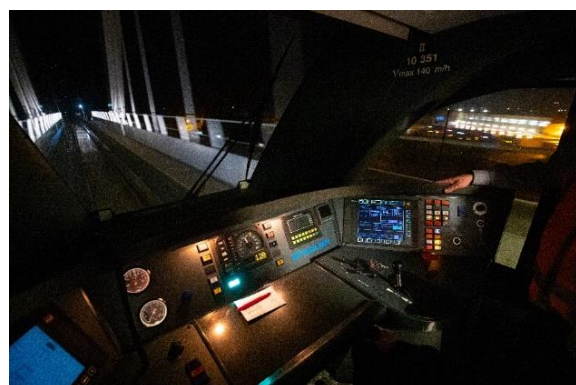


Onder: Instructies en uitleg in de trein door projectmedewerkers



Eenmaal onderweg konden de reizigers een enquête, opgesteld door TNO, invullen. De resultaten van dit onderzoek staan in hoofdstuk 5.

Na afloop van de ritten ontvingen de reizigers een bedankje namens het projectteam.



De ATO-Testtrein onderweg





Groepsfoto van de allereerste ATO-rit met reizigers

7 Overzicht van de belangrijkste conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

In deze verkenning is gekeken naar het mogelijk maken van het automatisch rijden van trein in GoA2 op het Nederlandse spoor op de huidige infrastructuur. Daarnaast is gekeken naar de potentiële effecten van ATO. Elk deelonderzoek heeft uitgebreid de specifieke conclusies benoemd in de afzonderlijke hoofdstukken. Voor de verkenning als geheel kunnen de volgende overkoepelende conclusies worden getrokken.

ATO is nog steeds in ontwikkeling. ATO kan nu al de basisfuncties van het rijden van de trein goed zelfstandig uitvoeren. Zoals dat zijn het bedienen van de tractie en de rem, het verwerken en opvolgen van MA's, en het verwerken van routewijzigingen. Dit wordt ook zo ervaren door de machinisten. Meer ontwikkeling draagt bij aan de volwassenheid van het systeem. Tijdens de live tests hebben meerdere verbeteringsslagen plaatsgevonden. Dit resulteerde in een duidelijke vooruitgang naar een goed kwaliteitsniveau. Echt geavanceerde functies zoals het rijden op dienstregeling en het omgaan met hellingen in het wegprofiel vragen nog extra ontwikkeling.

De machinisten waren tevreden over de interface met het ATO systeem (DMI). Wel geven ze aan dat ze zo min mogelijk extra informatie willen ontvangen tijdens de ATO ritten.

Zowel de reguliere als de ATO-ritten werden als goed beoordeeld door de testreizigers. Er werd een structureel maar klein verschil gevoeld tussen de ATO- en de reguliere ritten (voor ATO in rapportcijfer gemiddeld een 7,68 en voor regulier een 7,96). Ook de beleving, treinbewegingen en het comfort werden bij de reguliere ritten beter beoordeeld. Daarbij liet het G-krachten-onderzoek zien dat de versnellingen (en vertragingen) tijdens de ATO-ritten hoger waren en sneller in de tijd op- en afgebouwd werden. Ook waren de ATO-ritten over het algemeen iets schokkeriger dan de niet-ATO-ritten. Dit kan de comfortbeleving beïnvloeden tijdens deze ritten.

De conclusie van de dienstregelings simulatie is dat, op het baanvak Groningen – Leeuwarden, een verbetering te zien is met ATO GoA2 ten opzichte van de situatie zonder ATO als referentie op capaciteit, punctualiteit en veiligheid (rood sein naderingen en ongeplande stops). De dienstregelings simulatie laat zien dat de 3 minuten punctualiteit in Groningen met ATO een verbetering realiseert van 1.5 procentpunt in de spits en 1 procentpunt in het dal. De 3 minuten punctualiteit zonder ATO is al hoog is waardoor de ruimte voor verbetering op dit traject relatief klein is. De punctualiteit op -30 tot +30 seconden kan in belangrijke mate verhoogd worden met 39 procentpunt in de spits en 32 procentpunt in het dal. De verbeterde sturing kan gebruikt worden om buffers te verkleinen en de capaciteit te verhogen.

De live test heeft waardevolle informatie over de prestaties van ATO onder ATB-NG opgeleverd. Overkoepelend kunnen we concluderen dat automatisch rijden van een trein in GoA2 op het huidige Nederlandse spoor mogelijk is.

7.2 Aanbevelingen

Elk deelonderzoek heeft specifieke aanbevelingen benoemd in de afzonderlijke hoofdstukken. Voor de verkenning als geheel kunnen de volgende overkoepelende aanbevelingen worden gedaan.

Vervolgonderzoek naar het rijden volgens dienstregeling onder ATO is nodig om meer inzicht te krijgen in de punctualiteitsbaten en de energiebesparing. Zowel live tests als simulatieonderzoek kunnen hier een grote bijdrage aan leveren. Tevens dient het vraagstuk van het geleidelijk beginnen en eindigen van tractie en remacties verder worden onderzocht. Ook is het van belang om meer aandacht te besteden aan het verzamelen van gegevens door: nauwkeurigere metingen van positie,

snelheid en eventueel acceleratie en volledigheid van de gegevensverzameling. Dit komt de analyse ten goede.

Verbeter het ATO-rijalgoritme om maximale optimalisatie te behalen en zo de voordelen van ATO te kunnen incasseren. Met daarbij speciale aandacht voor het remmen nabij hellingen en latere/sterkere vertraging bij stations om remtijdverlies te beperken.

Vanwege de testomstandigheden, de volwassenheid van het systeem, de duur en het beperkt aantal machinisten konden een aantal Human Factor vraagstukken tijdens de proef niet goed onderzocht worden. Aanbeveling is om met een verder ontwikkeld ATO systeem uitgebreider Human Factor onderzoek uit te voeren.

De simulaties hebben de grote potentiële punctualiteitsbaten van ATO aangetoond. Op basis hiervan wordt aanbevolen vergelijkbaar onderzoek naar de potentie van ATO uit te voeren op landelijk niveau en voor bekende knelpunten in het Nederlandse spoornetwerk. Hierin kan dan ook de impact van een Traffic Management Systeem worden meegenomen.

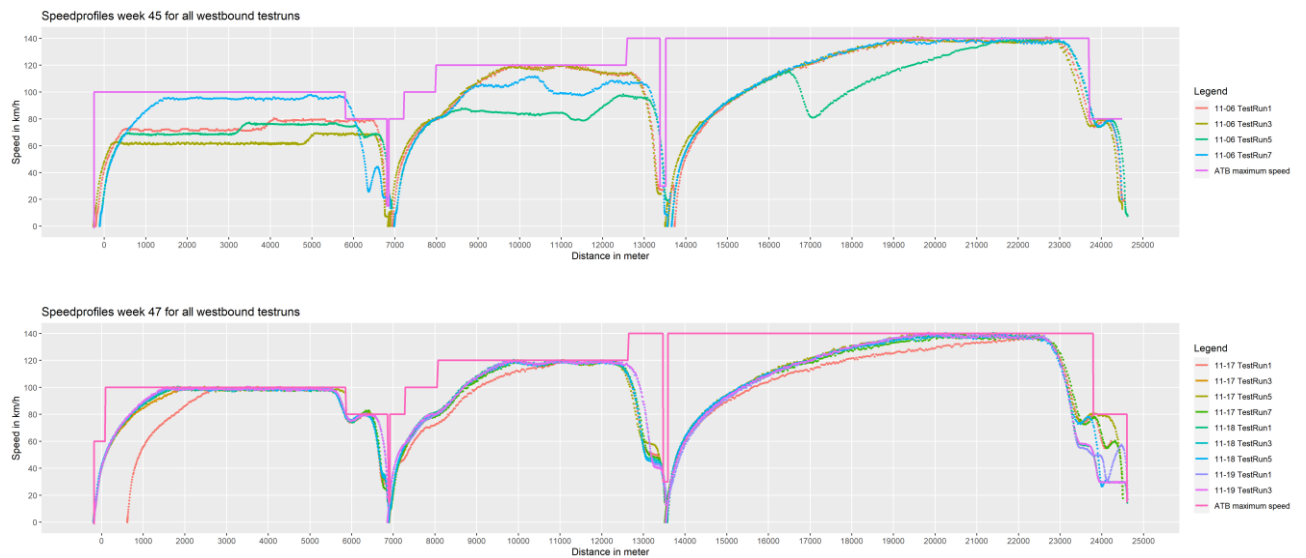
In deze verkenning is gefocust op ATO over het bestaand ATB beveiligingssysteem. Dit systeem wordt in de toekomst uit gefaseerd en vervangen door ERTMS. Om een scherper beeld te krijgen van de toekomstige ATO-baten verdient het de aanbeveling om een simulatieonderzoek te doen naar ATO op toekomstige treinbeveiligingssystemen (ERTMS level 2 en Hybrid level 3).

8 Bijlagen

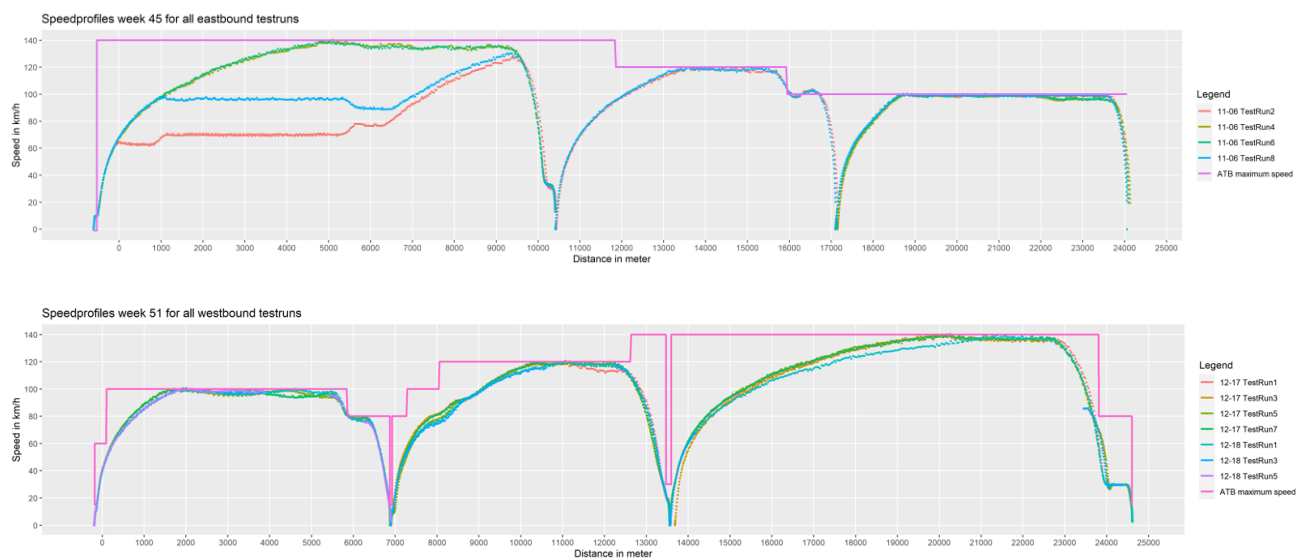
8.1 Bijlage bij hoofdstuk 2: Live testritten

Snelheidsprofielen live test

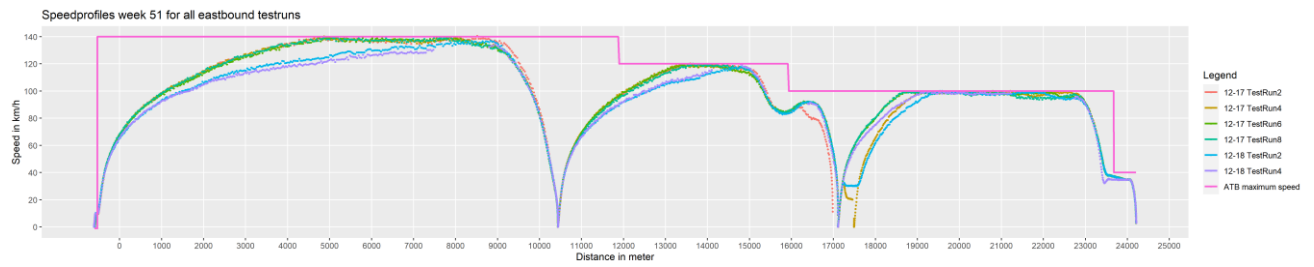
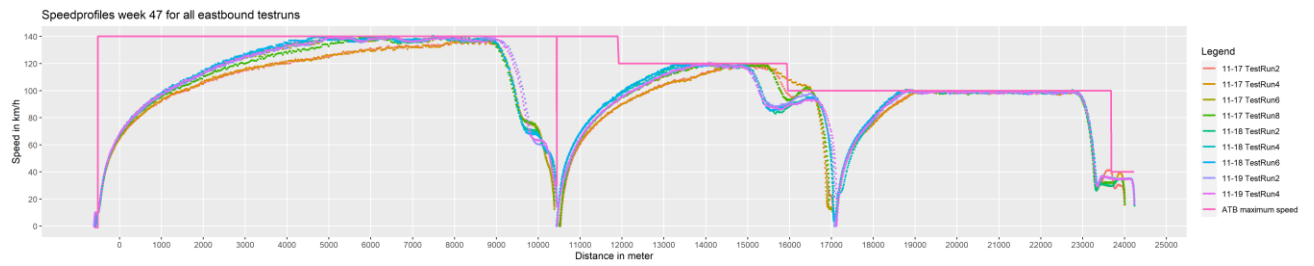
Westelijke richting: Vierverlaten – Zuidhorn – Grijpskerk – Buitenpost



Oostelijke richting Buitenpost - Grijpskerk - Zuidhorn – Vierverlaten



Oostelijke richting: Grijpskerk - Zuidhorn - Viervelaten

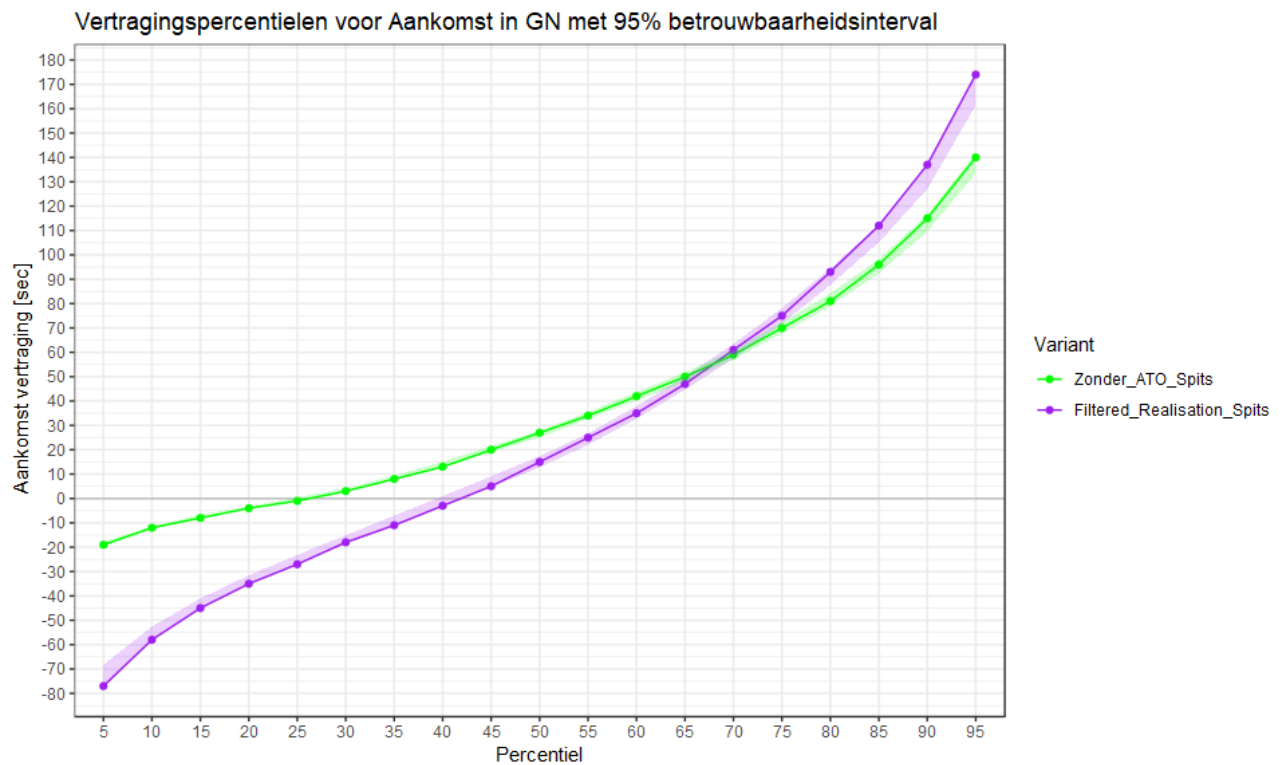


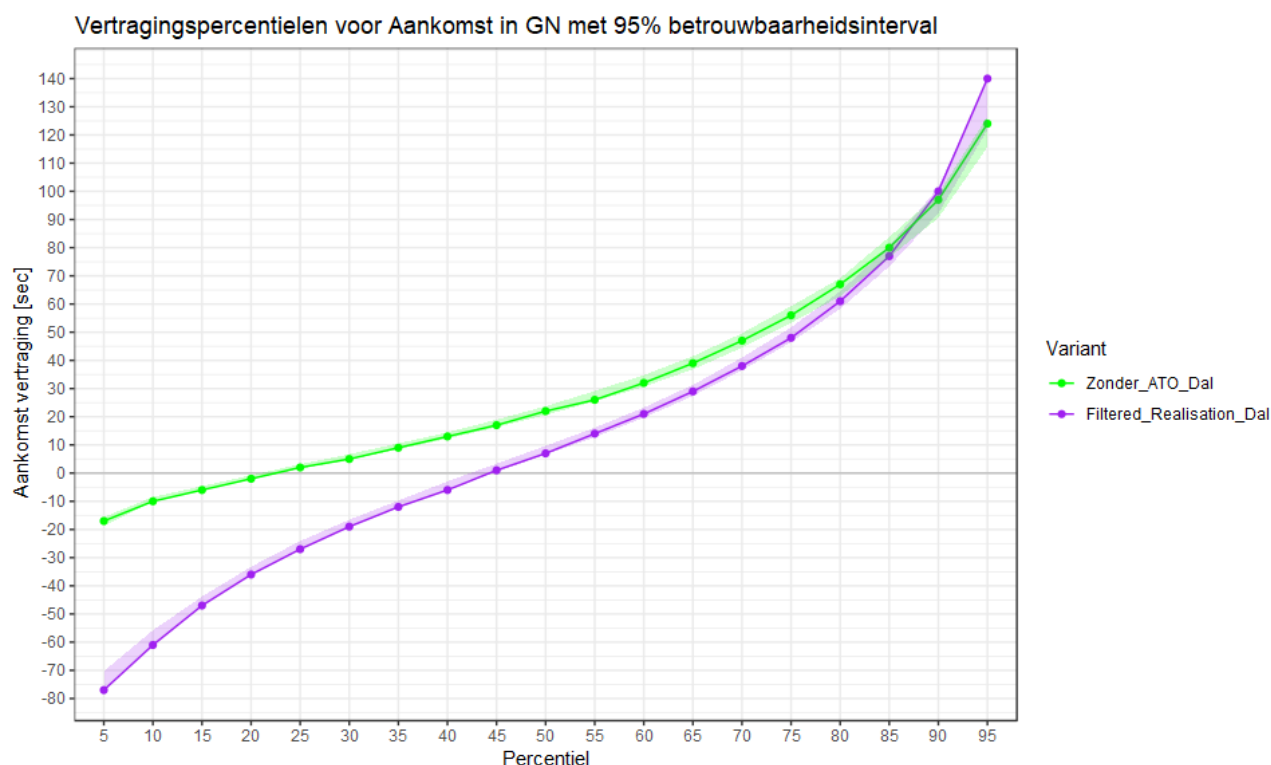
8.2 Bijlagen bij hoofdstuk 4: Dienstregelings simulaties

8.2.1 Vergelijking simulatie met realisatiedata

Om de kwaliteit van het model van het machinistengedrag te bepalen, is de simulatie hiervan vergeleken met de gefilterde realisatiedata van 2018 zoals beschreven in hoofdstuk 4. De vergelijking is uitgevoerd voor de spits en het dal.

De eerste vergelijking is gedaan op vertragingpercentielen bij aankomst in Groningen. Deze worden in de onderstaande figuren gegeven.





Te zien is dat de overeenkomst voor de hogere percentielwaarden redelijk goed is. De realisatie heeft wel meer treinen die te vroeg aankomen dan de simulatie. Omdat met name de grotere vertragingen van belang zijn, is het model zo gemaakt dat de overeenkomst daar goed is. Het aantal knoppen om aan te draaien is echter beperkt zodat niet over het hele bereik een goede fit te verkrijgen is. De tweede vergelijking is gemaakt op KPI's. Deze worden in de onderstaande tabellen gegeven voor aankomst in Groningen.

Variant	Periode	Punctualiteit 180 sec [%]	Punctualiteit -30 tot +30	Percentiel 95 [sec]
Model	Spits	98.4	50.5	140
Gefilterde realisatiedata	Spits	95.6	35.2	174
Model	Dal	98.6	55.8	124
Gefilterde realisatiedata	Dal	97.6	43.1	140

De conclusie is dat het model van het machinistengedrag beter presteert dan de realisatiedata 2018. De gesimuleerde infra en dienstregeling zijn echter van 2023 waarin de infra ingrijpend is gewijzigd en de dienstregeling doorgaande bewegingen over Groningen heen bevat die eerder niet mogelijk waren. Een exacte overeenkomst is daarom niet te verwachten. Met een model dat beter presteert dan de realisatie is gekozen voor de veilige kant.

8.2.2 Gebruikte softwareversies en verbeteringen t.o.v. TOL-studies 2017

De in dit onderzoek gebruikte softwareversie is FRISO 4.8.2.

De belangrijkste verbeteringen ten opzichte van de software en modellering zoals gebruikt in de Trein Op de Lijn (TOL) simulatiestudies van 2017 zijn:

- ATO-rijmodel is toegevoegd. Dit model stuurt nauwkeuriger op de plantijden dan het rijmodel bij gebruik van een Driver Advisory System (DAS) zoals onderzocht in de TOL-simulatiestudies.
- Hellingen zijn gemodelleerd en worden meegenomen in het rijgedrag van treinen.
- Opbouwtijd van de aanzet en de massa van roterende delen is toegevoegd in de aanzetkarakteristieken van materieel.

8.3 Bijlagen bij hoofdstuk 5: Reizigersonderzoek

8.3.1 Reizigersenquête

Reizigersonderzoek ATO – Informatie vooraf

Beste deelnemer,

Bedankt dat u meedoet met het reizigersonderzoek ATO (automatic train operation). Met uw deelname draagt u bij aan de ontwikkeling van automatische treinen. Het is voor ons belangrijk om u hierin te betrekken, omdat reizen met de trein een comfortabele en veilige ervaring voor reizigers moet zijn en blijven. In dit onderzoek wordt een eerste verkenning gedaan naar de ervaringen van reizigers bij het reizen met een automatische trein. Daarbij wordt er met name gekeken naar wat dit betekent voor het ervaren comfort tijdens de rit en de reisbeleving.

In deze verkenning worden verschillende ritten uitgevoerd, waarvan een deel met en een deel zonder ATO zal zijn. U maakt vanavond 4 ritten mee, die elk ongeveer 21 minuten duren. Tijdens het traject staan we even stil op station Zuidhorn en op station Grijpskerk. Het traject kent enkele bochten en enkele wissels. De wissels kunt u verwachten op de volgende plekken:

- Van Groningen naar Buitenpost: 1) Net na vertrek bij Hoogkerk-Vierverlaten, 2) 2km voor Grijpskerk en 3) vlak voor Buitenpost.
- Van Buitenpost naar Groningen: 1) 2km na Grijpskerk en 2) vlak voor Hoogkerk-Vierverlatenvlak

We vragen u om deze ritten te beoordelen door de vragen in de enquête te beantwoorden. Er zijn hierbij geen juiste of onjuiste antwoorden, het gaat om uw gevoel. Laat uw ervaring dus zo min mogelijk beïnvloeden.

De enquête is opgesplitst in verschillende delen: een deel vooraf, een deel na iedere testrit en een deel na de testritten. Wanneer u uw antwoorden invult en aan het eind opstuurt (of afgeeft), is het niet meer mogelijk uw antwoorden op een later moment nog aan te passen of te verwijderen, omdat deze niet aan u als persoon worden gekoppeld en dus niet herleidbaar zijn.

Het reizigersonderzoek wordt uitgevoerd door TNO, een onafhankelijke onderzoeksorganisatie. Deelname aan het onderzoek is geheel vrijwillig en u kunt op elk moment de deelname aan het onderzoek beëindigen zonder opgaaf van redenen. Tijdens en tussen de ritten is het in verband met veiligheidsmaatregelen echter niet toegestaan de trein te verlaten.

TNO hecht groot belang aan uw privacy en neemt de daarvoor geldende regels in acht. Informatie over welke rechten van toepassing zijn en hoe u deze kunt uitoefenen, kunt u vinden in het privacy statement (<https://www.tno.nl/nl/over-tno/contact/corporate-legal/privacystatement/>) van TNO. U kunt hierover ook een e-mail sturen aan privacy@tno.nl.

Een link naar de enquête kunt u vinden in een naar u verzonden e-mail. Mocht het digitaal invullen niet lukken, dan is een papieren versie van de enquête beschikbaar.

Mocht u vragen hebben, stel deze dan gerust aan een van de proefleiders.

We wensen u een prettige avond en plezierige ritten,

Het ATO Team

Enquête reizigersonderzoek ATO – Vragen vooraf

Wilt u de volgende vragen beantwoorden?

1. Wat is uw referentienummer?

2. Wat is voor u de belangrijkste reden om mee te doen aan dit onderzoek?

3. Hoe vaak reist u met de trein?

☐ Nooit ☐ 0-12 keer per jaar ☐ Meerdere keren per maand ☐ Meerdere keren per week

4. Wat is uw geboortejahr?

5. Geslacht

☐ Man ☐ Vrouw ☐ Geen keuze

6. Heeft u al eerder iets van ATO vernomen?

☐ Via media ☐ Ervaring van u zelf ☐ Ervaring van anderen

7. Als u eerder iets vernomen heeft van ATO, wat heeft u vernomen?

We zijn benieuwd naar uw mening voordat u met de test meedoet. Wat zijn uw verwachtingen van een rit met ATO? Geef hieronder per vraag het antwoord dat uw mening het beste weergeeft.

8. Wat verwacht u van de algehele beleving van een rit met ATO?

Zeer onprettig ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer prettig

9. Vindt u het spannend of ontspannend om te rijden met ATO?

Zeer spannend ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer ontspanned

10. Wat verwacht u van het comfort tijdens een rit met ATO?

Zeer oncomfortabel ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer comfortabel

11. Verwacht u verschillen te merken in een rit met ATO ten opzichte van 'normale' treinritten?

Zeer weinig verschil ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer veel verschil

12. Heeft u voorafgaand aan de ritten verdere opmerkingen?

Welkom bij de testritten!

Beste reiziger,

Welkom bij de testritten voor ATO. Hiermee bent u één van de allereerste reizigers in een automatisch bestuurde trein. We zijn benieuwd naar uw ervaring tijdens de ritten en het comfort naar aanleiding van de treinbewegingen.

U maakt vanavond 4 ritten mee. We vragen u om deze ritten te beoordelen. Vult u alstublieft *na iedere testrit* de enquêtevragen in, behorende bij deze testrit. Er zijn hierbij geen juiste of onjuiste antwoorden, het gaat om uw gevoel. Laat uw ervaring dus zo min mogelijk beïnvloeden.

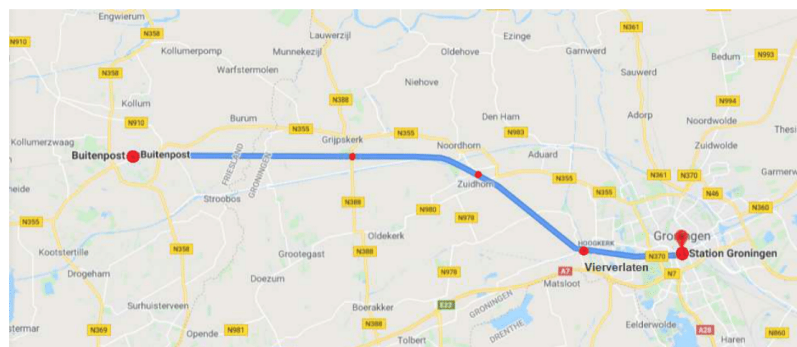
Het traject

De ritten zullen plaatsvinden tussen Groningen en Buitenpost. Echter vindt de eigenlijke test plaats tussen stoppunt Vierverlaten (vlakbij Groningen) en Buitenpost. Het stuk Groningen-Vierverlaten rijden we altijd zonder ATO en ook alleen helemaal aan het begin en helemaal aan het einde.

De ritten zijn als volgt gepland:

Groningen →

- Rit 1: Vierverlaten – Buitenpost
- Rit 2: Buitenpost – Vierverlaten
- Rit 3: Vierverlaten – Buitenpost
- Rit 4: Buitenpost – Vierverlaten (→ Groningen)



Tijdens iedere rit zullen we even stilstaan bij de tussenstations Zuidhorn en Grijpskerk.

Het traject kent enkele bochten en enkele wissels. De wissels kunt u verwachten op de volgende plekken:

- Van Groningen naar Buitenpost: 1) Net na vertrek bij Hoogkerk-Vierverlaten, 2) 2km voor Grijpskerk en 3) vlak voor Buitenpost.
- Van Buitenpost naar Groningen: 1) 2km na Grijpskerk en 2) vlak voor Hoogkerk-Vierverlatenvlak

We vragen u tijdens alle ritten te blijven zitten. Als u vragen heeft, kunt u dit kenbaar maken aan de begeleiders.

We wensen u een prettige reis!

Het ATO team

Enquête reizigersonderzoek ATO – Vragen over de testrit

Wilt u de volgende vragen beantwoorden?

Algemeen

1. Wat is uw referentienummer?

2. Wat is de datum & tijd?

3. Welke testrit was dit?

- ☐ 1: Ververlaten (nabij Groningen) – Buitenpost
- ☐ 2: Buitenpost – Ververlaten (nabij Groningen)
- ☐ 3: Ververlaten (nabij Groningen) – Buitenpost
- ☐ 4: Buitenpost - Ververlaten (nabij Groningen)

Uw rit

4. U reed deze rit:

☐ Vooruit ☐ Achteruit

5. Wat heeft u hoofdzakelijk gedaan tijdens de rit? (max 1 keuze)

☐ Gelezen (boek, tablet, telefoon, ...)

☐ Gepraat ☐ Muziek geluisterd ☐ Rondgekeken

Anders, namelijk:

6. Als u een rapportcijfer aan het comfort van de rit zou geven, met betrekking tot de treinbeweging, wat zou u dan geven?

Zeer laag comfort			comfort				Zeer hoog comfort			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

We zijn benieuwd naar uw mening over de rit die u heeft gereden. Geef hieronder per vraag het antwoord dat uw mening het beste weergeeft.

7. Wat was uw algehele beleving van deze rit? ☐ Zeer onprettig ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer prettig
8. Voelde u zich gespannen tijdens de rit? ☐ Niet gespannen ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer gespannen
9. Vond u deze rit comfortabel? ☐ Zeer oncomfortabel ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer comfortabel

Treinbeweging

- | | |
|--|--|
| 10. Hoe beoordeelt u het optrekken van de trein? | <div> <div>Zeer oncomfortabel</div> <div> ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ </div> <div>Zeer comfortabel</div> </div> |
| 11. Hoe beoordeelt u het afremmen van de trein? | <div> <div>Zeer oncomfortabel</div> <div> ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ </div> <div>Zeer comfortabel</div> </div> |
| 12. Hoe beoordeelt u het rijden over wissels? | <div> <div>Zeer oncomfortabel</div> <div> ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ </div> <div>Zeer comfortabel</div> </div> |
| 13. Hoe beoordeelt u het rijden in bochten? | <div> <div>Zeer oncomfortabel</div> <div> ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ </div> <div>Zeer comfortabel</div> </div> |
| 14. Hoe beoordeelt u het geluid van het rijden? | <div> <div>Zeer oncomfortabel</div> <div> ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ </div> <div>Zeer comfortabel</div> </div> |
| 15. Hoe beoordeelt u de schokkerigheid van het rijden? | <div> <div>Zeer oncomfortabel</div> <div> ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ </div> <div>Zeer comfortabel</div> </div> |

Hoe toepasselijk is de volgende uitspraak na deze rit?

- | | |
|---|--|
| 16. Met een rit als deze zou ik in de toekomst vaker met de trein willen reizen | <div> <div>Zeker niet</div> <div> ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ </div> <div>Zeer zeker</div> </div> |
|---|--|

Hoe beoordeelt u deze rit ten opzichte van de *voorgaande* rit? (invullen vanaf de tweede rit)

- | | |
|------------------|---|
| 17. Deze rit was | <div> <div>Veel minder comfortabel</div> <div> ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ </div> <div>Veel comfortabeler</div> </div> |
|------------------|---|

18. Waren er bijzonderheden tijdens deze rit? Of heeft u nog verdere opmerkingen?

Bedankt voor het delen van uw ervaring over deze rit.

Enquête reizigersonderzoek ATO – Vragen na de testritten

1. Hoe heeft u deze testavond ervaren? Zeer onprettig ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer prettig
2. Is uw beeld van ATO in positieve of negatieve zin veranderd, of neutraal gebleven? In zeer negatieve zin ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ In zeer positieve zin
3. Had u een veilig gevoel tijdens de ritten? Zeer onveilig gevoel ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer veilig gevoel

Hoe was uw gesteldheid tijdens de ritten?

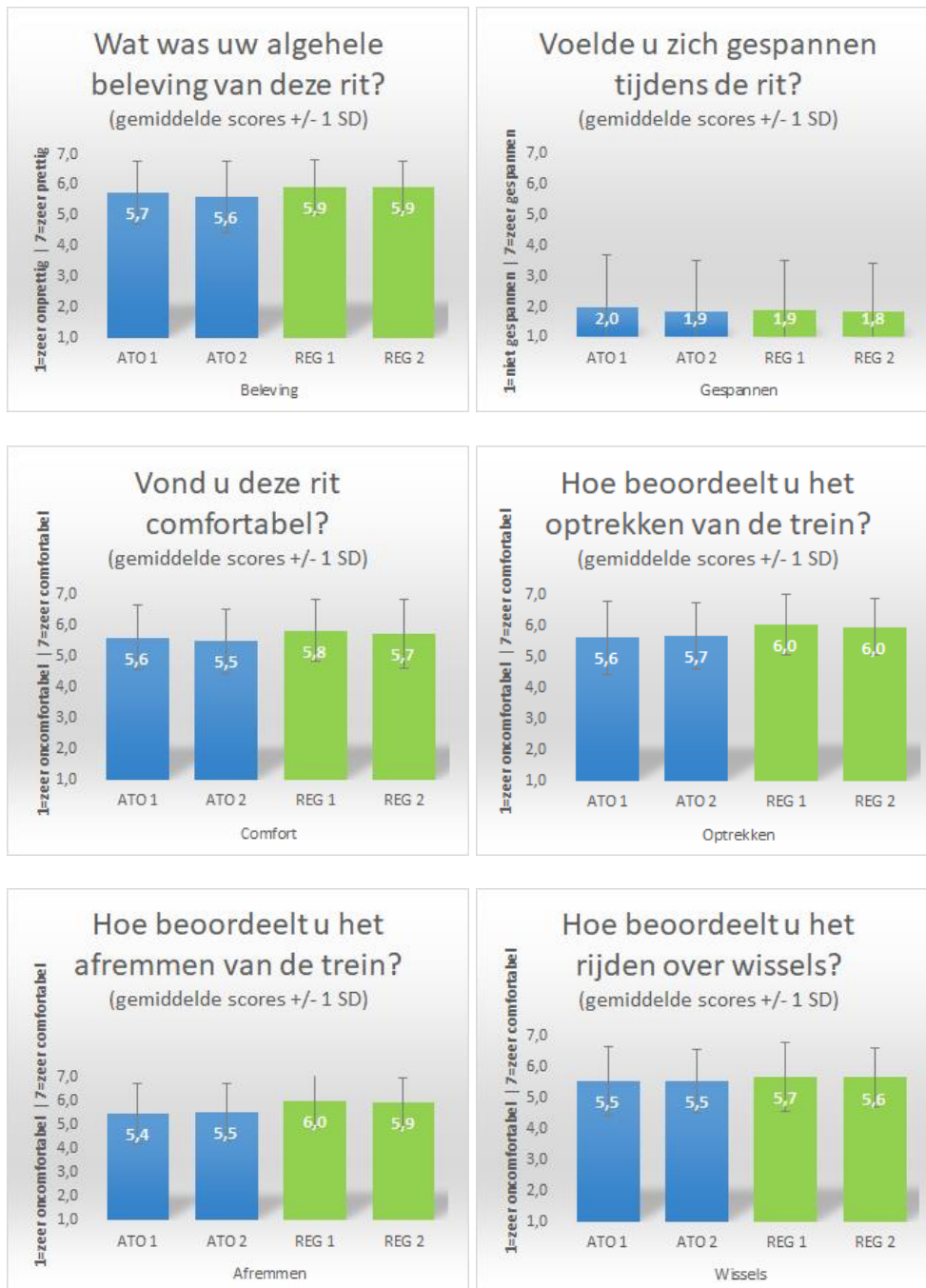
4. Wat was uw algehele gesteldheid tijdens de ritten? Zeer slecht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer goed
5. Bent u tijdens één of meerdere ritten duizelig of misselijk geweest? Zeer weinig ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Zeer veel
6. Als u duizelig of misselijk bent geweest, wanneer is dit begonnen? Tijdens: ☐ Rit 1 ☐ Rit 2 ☐ Rit 3 ☐ Rit 4

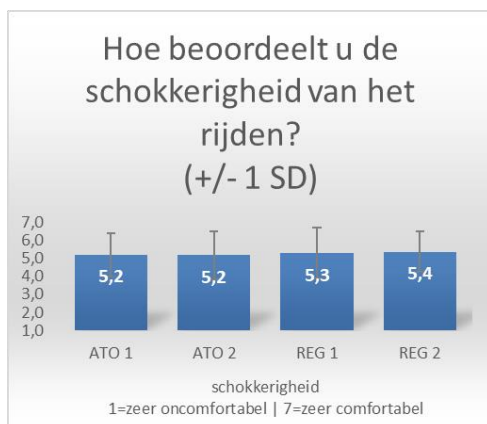
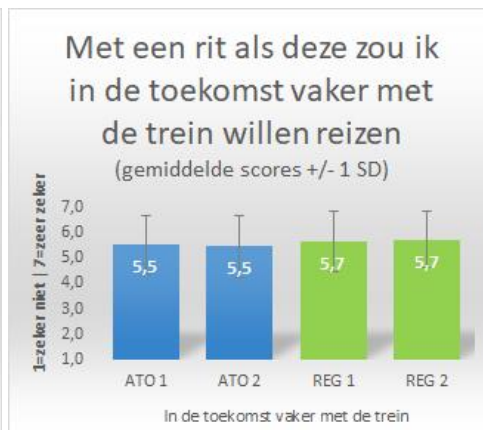
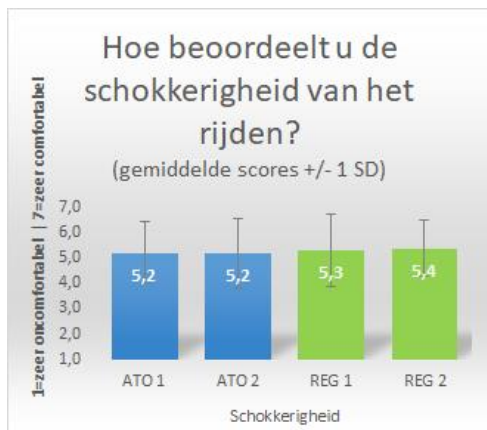
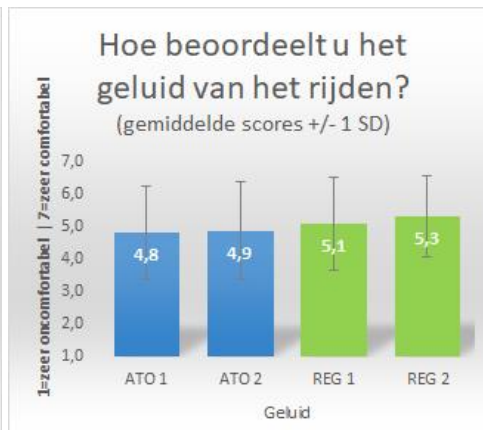
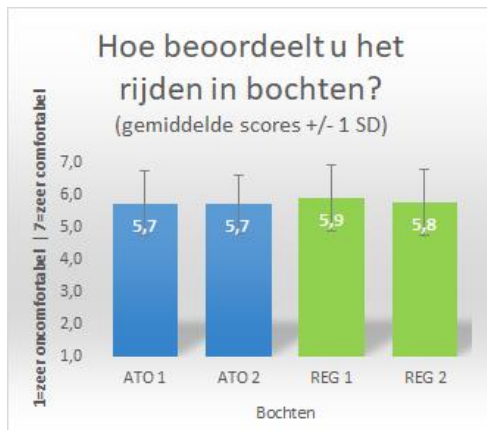
7. Heeft u nog verdere opmerkingen over de testen of testavond? Of is er iets wat u het onderzoeksteam mee wilt geven?

Bedankt voor het delen van uw ervaringen en het meedoen aan deze testavond.

8.3.2 Reizigerservaring per rit

Onderstaande figuren geven de beoordeling weer van de reizigers van de verschillende ritten met en zonder ATO weer. ATO1 is hierbij de eerste rit met ATO, ATO2 de tweede rit met ATO, REG1 de eerste rit zonder ATO en REG2 de tweede rit zonder ATO. De staven geven de gemiddeldes weer, en de verticale zwarte streep de spreiding van de antwoorden (1SD staat voor 1 standaarddeviatie).

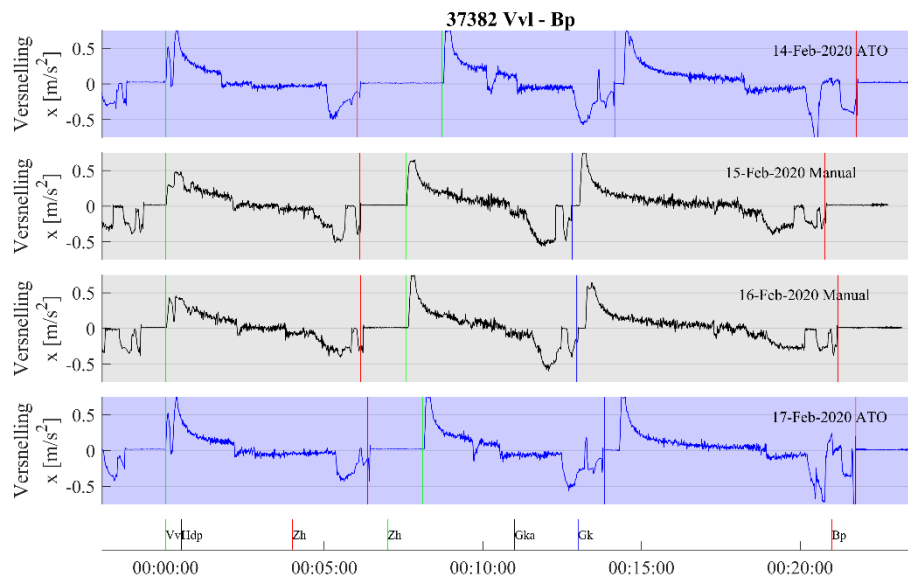




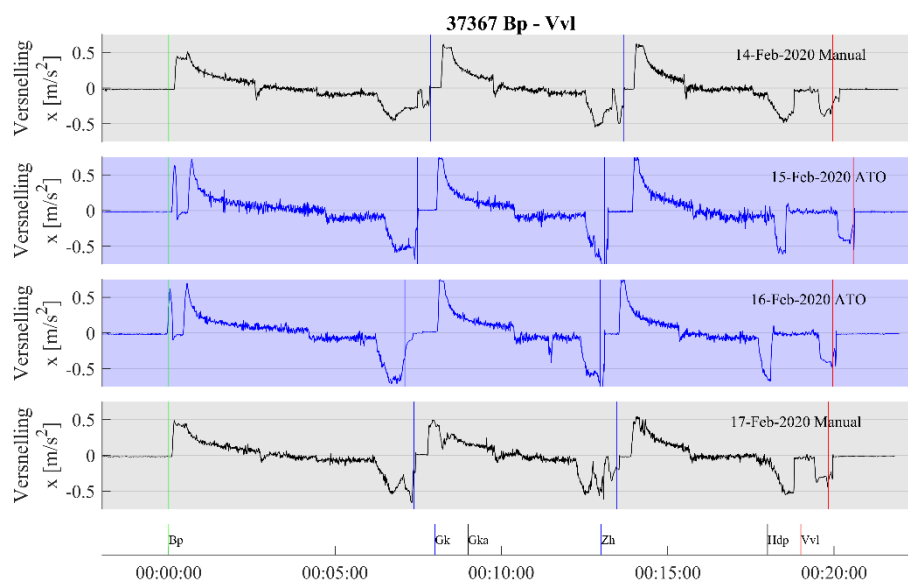
8.3.3 Bewegingsdata per rit

Onderstaande figuren geven de voor-achterwaartse versnelling per rit weer. Binnen elke figuur zijn de vier testdagen onder elkaar weergegeven. De blauwe arcering geeft een ATO-rit aan, de grijze arcering een niet-ATO (reguliere) rit.

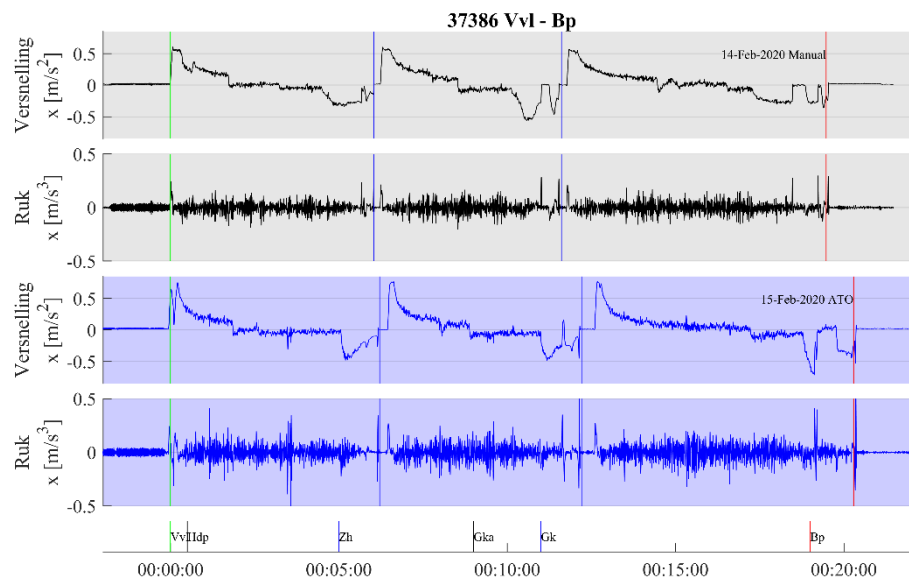
Voor- en achterwaartse versnelling van rit 1 (Vierverlaten – Buitenpost), voor de 4 testdagen



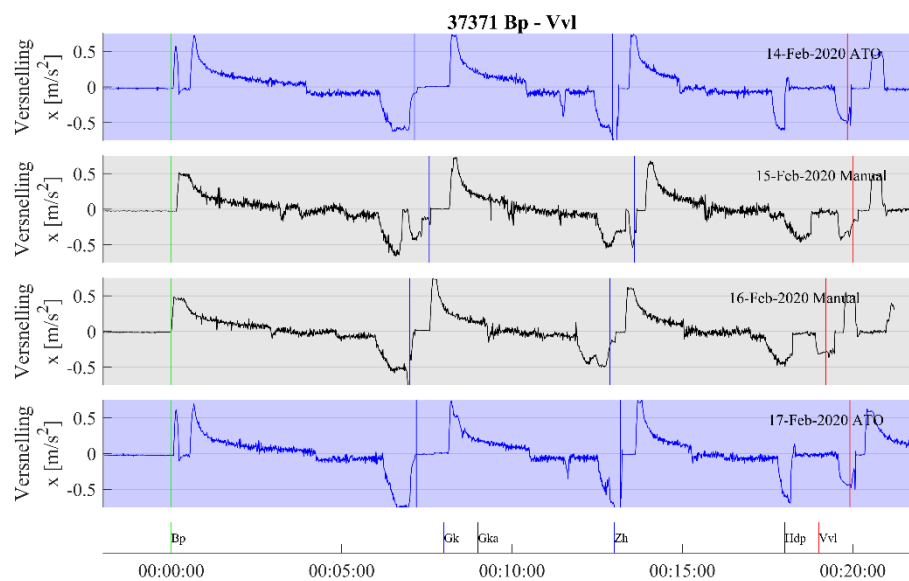
Voor- en achterwaartse versnelling van rit 2 (Buitenpost Vierverlaten), voor de 4 testdagen



Voor- en achterwaartse versnelling van rit 3 (Vierverlaten – Buitenpost), voor de 4 testdagen



Voor- en achterwaartse versnelling van rit 4 (Buitenpost – Vierverlaten), voor de 4 testdagen



8.3.4 Geraadpleegde literatuur

- Akamatsu, M., Green, P., & Bengler, K. (2013). Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present, and Future. *International Journal of Vehicular Technology*, 2013, 1–27. <https://doi.org/10.1155/2013/526180>
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775–779.
- Billings, C. E. (1996). *Human-centered aviation automation: Principles and guidelines* (NASA Technical Memorandum 110381). NASA.
- Brandenburger, N., & Naumann, A. (2019). On Track: A Series of Research about the Effects of Increasing Railway Automation on the Train Driver. *IFAC-PapersOnLine*, 52(19), 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.115>
- Brandenburger, Niels, Hörmann, H.-J., Stelling, D., & Naumann, A. (2017). Tasks, skills, and competencies of future high-speed train drivers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(10), 1115–1122. <https://doi.org/10.1177/0954409716676509>
- Brandenburger, Niels, & Jipp, M. (2017). Effects of expertise for automatic train operations. *Cognition, Technology & Work*, 19(4), 699–709. <https://doi.org/10.1007/s10111-017-0434-2>
- Dunn, N., & Williamson, A. (2011). Monotony in the rail industry: The role of task demand in mitigating monotony-related effects on performance. *Ergonomics Australia*, 1–5.
- Fraszczak, A., Brown, P., & Duan, S. (2015). Public Perception of Driverless Trains. *Urban Rail Transit*, 1(2), 78–86. <https://doi.org/10.1007/s40864-015-0019-4>
- Hely, M., Shardlow, T., Butt, B., Friswell, R., McIntosh, A., & Williamson, A. (2015). Effects of automatic train protection on Human Factors and driving behaviour. *Proceedings of the 19th Triennial Congress of the IEA*, 1–9.
- Karvonen, H., Aaltonen, I., Wahlström, M., Salo, L., Savioja, P., & Norros, L. (2011). Hidden roles of the train driver: A challenge for metro automation. *Interacting with Computers*, 23(4), 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2011.04.008>
- Naweed, A. (2014). Investigations into the skills of modern and traditional train driving. *Applied Ergonomics*, 45(3), 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.06.006>
- Oliveira, L., Bruen, C., Birrell, S., & Cain, R. (2019). What passengers really want: Assessing the value of rail innovation to improve experiences. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 1, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100014>
- Poulus, R., Kempen, E., Meijeren, J., Automatic Train Operation -driving the future of rail transport Programma Toekomstbeeld OV (2019). Contouren Toekomstbeeld OV 2040
- Tabai, B. H., Bagheri, M., Sadeghi-Firoozabadi, V., & Shahidi, V. (2017). The relationship between train drivers' attention and accident involvement. *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, 1034–1039. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047897>
- Wang, Y., Zhang, M., Ma, J., & Zhou, X. (2016). Survey on Driverless Train Operation for Urban Rail Transit Systems. *Urban Rail Transit*, 2(3–4), 106–113. <https://doi.org/10.1007/s40864-016-0047-8>