

Automatische metro maakt Rotterdam klaar voor de toekomst

Alexander Warmelink – RET – ahwarmelink@ret.nl

Halmar Kranenburg – RET – hjkranenburg@ret.nl

Willie de Swart – RET – wdeswart@ret.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 21 en 22 november 2019, Leuven

Samenvatting

Recent vierde Rotterdam het 50-jarig bestaan van haar metro; de eerste van Nederland. Een mijlpaal om even bij stil te staan, maar voor vervoerder RET ook een reden om vóóruit te kijken. Dat de metro in Rotterdam een succes is blijkt wel uit het feit dat de afgelopen jaren een groei van 24% is gerealiseerd van het aantal instappende reizigers. Met de voorgenomen groei van de stad zal het aantal reizigers alleen nog maar verder toenemen. Nu al voelt de metro de druk van het aantal reizigers. Het centrale metrostation *Beurs* in het midden van de stad komt voor in de top-10 van drukste spoorwegstations van Nederland. De komende jaren verwacht RET dat de capaciteit van het netwerk zal worden bereikt. Om de metro ook in de toekomst een duurzaam vervoermiddel te laten zijn, zal flink in het metronetwerk moet worden geïnvesteerd.

RET heeft onderzocht in hoeverre in het metronetwerk moet worden geïnvesteerd om de frequenties op het netwerk – en daarmee de capaciteit – te verhogen. Op de middellange termijn volstaat de huidige infrastructuur en kan met extra materieel de vervoervraag tot 2035 afdoende bediend worden. Hierna is de huidige infrastructuur echter niet meer in staat om aan de vervoervraag te kunnen voldoen.

Automatiseren van de metro kan een oplossing zijn. Dit is de laatste jaren flink in populariteit gestegen. Verschillende steden in de wereld leggen nieuwe, geautomatiseerde lijnen aan. Ook steden met een bestaand, oud, netwerk zoals Parijs, zijn verschillende bestaande lijnen aan het ombouwen om de capaciteit op die lijnen te verhogen. Dit is voor Rotterdam en RET interessant omdat dit een uitkomst kan bieden aan de capaciteitsproblematiek op de lange termijn. Onderzoek heeft aangetoond dat het automatiseren van het Rotterdamse metronetwerk hogere frequenties kan faciliteren. Hierdoor kan de Rotterdamse metro de groei van de stad aan en blijft de metro ook in de toekomst een duurzaam vervoermiddel. Zo is Rotterdam klaar voor de toekomst.

1. Beschrijving Rotterdamse metro

1.1 Historie en ontwikkelingen

De Rotterdamse Metro is in 1968 gestart, nadat de files op de Willemsbrug en in de Maastunnel tussen de Linker en Rechter Maasoever jarenlang de spuigaten uitliepen en nadat zichtbaar werd dat het wegverkeer en de tram zonder extra verbinding de verdere vervoergroei niet meer aankonden. In die 40 jaar is het Rotterdamse metrosysteem gegroeid van een 5 km lang lijntje tussen Centraal Station en Zuidplein naar een regionaal netwerk van meer dan 80 km. De Rotterdamse metro vervoert per dag ca. 350.000 reizigers, ca. 65% van het totaal aantal reizigers van de RET. Het centrale knooppunt Beurs met 128.000 in-en uitstappers per werkdag (stand: november 2019) bevindt zich midden in de top 10 van drukste railstations in Nederland.



Figuur 1 RET-metronetwerk na uitbreiding met de Hoekse lijn

De laatste jaren is het gebruik van de Rotterdamse metro sterk gegroeid. Door nieuwe verbindingen (de komst van RandstadRail en de Hoekse lijn), door verruiming van het aantal studentenkaartgebruikers, door toeristen en door regionale en stedelijke ontwikkelingen is het aantal reizigers afgelopen 7 jaar met 24% gestegen. Reizigers reizen daarbij ook steeds verder en het aantal reizigerskilometer steeg in diezelfde periode zelfs met 40%.

Tabel 1 Gebruik van de metro (RET, o.b.v. gegevens OV Chipkaart 2010-2018)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Groei 2010-2018
Instappers per dag (x1000)	248	270	274	266	269	277	281	299	309	
Groei	-	8,7%	1,4%	-2,7%	1,1%	3,0%	1,5%	6,1%	3,4%	24,4%
Reizigerskm per dag (miljoen)	1,41	1,51	1,61	1,65	1,71	1,79	1,80	1,93	1,98	
Groei	-	7,0%	6,9%	2,5%	3,8%	4,5%	0,2%	7,3%	2,8%	40,6%

RandstadRail (en voor Rotterdamse begrippen is dat metrolijn E) kan als een succes worden gezien. Waren er in 2013 bij start 8.000 reizigers per dag, in 2019 is dit aantal meer dan verzesvoudigd naar 51.000 reizigers per dag in september van dat jaar. De frequentie is in die periode toegenomen van eens per kwartier naar eens per tien minuten.

De bestaande capaciteit liep dan snel ook tegen haar grenzen aan. Vooral richting Rotterdam waren de metro's meer dan druk. In 2015 werd de regulier gehanteerde norm (bezetting van alle zitplaatsen en 50% van de staanplaatsen voor het drukste uur gemiddeld) overschreden. Inzet van extra spitsritten werd noodzakelijk. Ook richting Den Haag doet de drukte op een aantal ritten in de spits zich al voelen.

Op andere metrolijnen steeg de bezetting, al was dat minder spectaculair. Het leidt tot drukte op diverse plaatsen. De Beneluxlijn uit Spijkenisse en Hoogvliet kent bij Schiedam in de spits een capaciteitsknelpunt, terwijl rond het drukste punt van het netwerk (Beurs) met name de Maaskruising en het traject Oostplein-Beurs regelmatig volle ritten kennen.

1.2 Groeiende stad, groeiende vraag

Komende jaren verwachten we met de komst van de Hoekse lijn een verdere groei van het aantal metroreizigers. Voor regionale reizen kan de potentie van de metro groter zijn dan het voormalige treinsysteem, al wordt geen extreme groei als bij RandstadRail verwacht. Een groei van 40% ten opzichte van de trein op Hoekse Lijn is echter wel berekend.

Daarnaast groeit de regio sterk. Komende jaren worden in Zuid-Holland tot 2040 195.350 woningen gepland, waarvan 57.350 in Rotterdam en 58.620 in Den Haag. Daarnaast blijft de stad aantrekkelijk voor bedrijven: van internationale kantoren, hotels tot kleine ondernemers met een bescheiden kantoorbehoefte.

Werden eerst vooral woningen buiten het Rotterdamse centrum gebouwd, laatste jaren groeit het aantal projecten dat in en om de binnenstad wordt gebouwd. Het betreft dan veelal hoogbouw en appartementen, waardoor de dichtheid van de stad verder toeneemt. Voor komende vijf jaren zijn er al ca. 7.000 woningen en 11.000 werkplekken in het Rotterdamse centrum gepland. Een groter aantal projecten is voor 2030 gedacht. Zichtbaar is dat dit vooral rondom de bestaande metrolijnen wordt gerealiseerd.

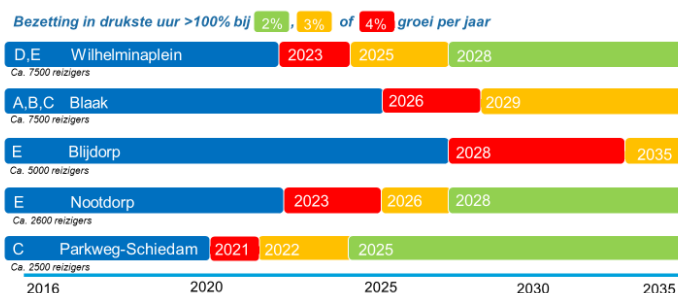


Figuur 2 Verdichting Rotterdams centrum (Gemeente Rotterdam, 2019)

Verdere versterking van de knooppunten Alexander, Schiedam en Zuidplein met extra voorzieningen en ruimte voor woningbouw en bedrijven zal het vervoer eveneens doen toenemen. Ontwikkeling van 'de nieuwe Kuip', een nieuw stadion voor Feyenoord, zal de motor worden voor extra ontwikkelingsprojecten in dit gebied en daarmee potentie voor een nieuwe vervoerknoop rond het huidige station Rotterdam Stadion.

Tenslotte is in de OV Visie Rotterdam van Gemeente en MRDH en in de Rotterdamse Verkeers Agenda beschreven dat er gestreefd wordt naar een modal shift vanuit het autoverkeer ten gunste van meer fiets en OV. Een eerste stap is zichtbaar door het versmallen van de autocapaciteit van de Coolsingel en het beperken van de noodzakelijk te bouwen parkeerruimte bij nieuwe woningbouwprojecten in de stad.

Verdere groei voor het OV wordt dan ook verwacht en daarmee bestaat de kans dat er een hernieuwde knelpunten op het metronetwerk ontstaan. Een eerste verkenning liet zien dat bij een permanente gemiddelde groei van 3% er in 2025 al ondercapaciteit ontstaat. In 2029 zijn alle drukke locaties overbelast.



Figuur 3 Figuur Bezetting op drukste locaties RET-metronetwerk (RET, 2019)

Een scala van maatregelen zal instelling gebracht om de problematiek te beteugelen. Op korte termijn kan gedacht worden aan methoden van spreiden van reizigers over de metrotrein, over de ritten en over het netwerk (bijvoorbeeld met extra reizigerscommunicatie) en scherper op de vraag gerichte inzet.

Op middellange termijn wordt gedacht aan de aanschaf van extra metrorijtuigen. Het proces van aanschaf tot op de baan hebben van railvoertuigen is een lang proces dat snel 5 jaar duurt. Door deze extra voertuigen kan de frequentie stijgen tot elke 150 seconden op de stam (gezamenlijke trajecten CS-Slinge en Schiedam-Capelsebrug) en tot 300 seconden op de takken met capaciteitsproblemen. Met de aanschaf van extra rijtuigen kan tot 2035 de vervoervraag op de stam en tot 2045 op de takken afdoende bediend worden. Vanaf dat moment is weer uitbreiding van de capaciteit nodig.

Voor de langere termijn (2035-2040 e.v.) zijn investeringen in de Oude lijn Den Haag-Dordrecht nodig (forse frequentieverhoging vraagt metroachtige bediening c.q. S-Bahn) en een zuidelijke tangent tussen Kralingse Zoom, Zuidplein, Dijkzigt en CS nodig. Daarnaast bezien we of de frequentie op bestaande metrolijnen niet verder verhoogd kan worden.

2. Automatisering onder de loep

Automatisering in het verkeer is een hot item. Er wordt op veel plaatsen in de wereld druk geëxperimenteerd met zelfrijdende auto's en bussen. In Rotterdam rijdt de zelfrijdende Parkshuttle naar Capelle Rivium. Ook automatisering bij treinen neemt toe.

Echter, zelfrijdende metro's zijn er al sinds 1986 de metro van Lille startte. En wereldwijd zijn er al meer dan 66 lijnen in 43 streken (UITP, 2019). Automatische metro's kunnen korte opvolgtijden en daarmee meer capaciteit leveren. 2 steden hebben reguliere lijnen omgebouwd naar automatische lijnen en 7 Europese steden zijn inmiddels met conversie van conventionele naar automatische metro bezig. Zou een automatische metro ook iets voor Rotterdam zijn?

2.1 Onderzoeksvraag

Het ombouwen van een bestaande metrolijn naar een geautomatiseerd systeem is een zeer complexe en dure aangelegenheid. Daarom moet eerst worden onderzocht of het automatiseren in Rotterdam überhaupt wel zinvol is. RET heeft daarom een onderzoek uitgevoerd waarin twee vragen zijn gesteld: (1) in hoeverre is een stabiele dienstregeling uit te voeren als de frequenties op het metronet worden verhoogd, en (2) indien het verhogen van de frequentie tot instabiele dienstregelingen leidt, in hoeverre kan een geautomatiseerde metro de stabiliteit van de dienstregeling verbeteren? De onderzoeksvraag is als volgt geformuleerd:

“Op welke manier wordt de dienstuitvoering van een metronetwerk beïnvloed als de huidige frequenties worden verhoogd en welke maatregelen kunnen worden getroffen om de capaciteit en stabiliteit te verhogen?”

Deze tweeledigheid is bewust gekozen om te onderzoeken tot welke frequenties de huidige infrastructuur nog kan voldoen en dus op welke manier op de middellange termijn de capaciteit kan worden verhoogd.

2.2 Methodiek

Om dit te onderzoeken zijn uiteraard geen echte dienstregelingen verreden. In de plaats daarvan zijn nieuwe dienstregelingen gesimuleerd middels software. Bij hoogfrequentie metrolijnen luistert alles zeer nauw. De kleinste invloeden van en interacties tussen voertuigen en metrobaan, en tussen voertuigen onderling, kunnen grote gevolgen hebben voor de stabiliteit van een dienstuitvoering. Bloklengtes, seinplaatsing, rijkaracteristieken van voertuigen, en zo verder, spelen allemaal een rol. Het is daarom belangrijk dat deze details geïmplementeerd zijn in het simulatiemodel. Daarom is gebruik gemaakt van het programma OpenTrack, in welk het metronetwerk van Rotterdam is gemodelleerd. In het model zijn alle infra-elementen nauwkeurig ingevoerd. Ieder sein en wissel staat op de juiste plek ten opzichte van elkaar en de gebruikte seinsystemen zijn zo realistisch mogelijk nagebootst. De rijtijden van de treinen zijn ingevoerd in OpenTrack door de rijkaracteristieken uit OpenTrack overeen te laten komen met gegevens uit de "black box" van metrovoertuigen. Halteertijden zijn ingevoerd op basis van halteergegevens, geëxtraheerd uit gegevens van een werkelijk gereden dienstregeling. Validatie van het model toonde aan dat OpenTrack realistische uitkomsten geeft, rekening houdend met de onnauwkeurigheden van de data, die verzameld is uit gegevens van de treindetectiesystemen.

2.3 Beoordelen van alternatieven

Verschillende groeiscenario's zijn onderzocht met inachtneming van de interesses van de twee belangrijkste stakeholders: het vervoersbedrijf en de reiziger. Hoewel er een overlap in interesses aanwezig is, verschillen de interesses van beide. Het vervoersbedrijf is vooral geïnteresseerd in het zo punctueel mogelijk laten rijden van haar treinen, om zo te garanderen dat de werktijden van het personeel worden gehandhaafd en genoeg tijd overblijft voor het onderhoud van de voertuigen en infrastructuur. Daarnaast worden vervoersbedrijven op basis van hun punctualiteitsgegevens gecontroleerd door vervoersautoriteiten.

De interesses van de reiziger verschillen. Hoewel ook zij gebaat zijn bij punctuele treinen, streven zij naar het minimaliseren van de reistijd. Bij hoogfrequente OV-verbindingen consulteren reizigers de dienstregeling niet alvorens af te reizen naar het station. Daardoor vormt de wachttijd op het station een belangrijk deel van de totale reistijd en is daardoor een belangrijke factor in de kwaliteitsbeleving van de reiziger. Aangezien wachttijden gerelateerd zijn aan de opvolgtijden van de treinen, betekent dat hoe regelmatig de dienstuitvoering is, hoe later de totale gemiddelde wachttijd is én hoe hoger de betrouwbaarheid is. Iets wat de reiziger belangrijk vindt.

Daardoor is tijdens dit onderzoek gebruik gemaakt van twee indicatoren die elk de interesses van één van de stakeholders vertegenwoordigen. De reiziger wordt vertegenwoordigd door een indicator: de *Percentage Regularity Deviation Mean (PRDM)* (van Oort & van Nes, 2009). Deze indicator geeft de gemiddelde mate aan waarin de werkelijke opvolgtijd afwijkt van de geplande opvolgtijd uitgedrukt als percentage:

$$PRDM_j = \frac{\sum_i \left| \frac{H_{i,j} - H'_{i,j}}{H_{i,j}} \right|}{n_j}$$

waarin:

$H_{i,j}$: de geplande opvolgtijd voor voertuig i met de voorganger t.h.v. station j ,

$H'_{i,j}$: de werkelijke opvolgtijd voor voertuig i met de voorganger t.h.v. station j ,

n_j : het aantal voertuigen in totaal dat station j aandoet.

Gedefinieerd als de mate van *onregelmatigheid*, een PRDM van 0% betekent dat de gerealiseerde opvolgtijd exact gelijk is aan de geplande opvolgtijd en dat de treinen dus volledig regelmatig zijn. Een PRDM van 100% geeft aan dat de werkelijke opvolgtijd twee keer zo hoog is als gepland (of gelijk is aan nul), wat aangeeft dat *bunching* voorkomt.

The indicator voor punctualiteit is *dis-punctualiteit* (van Oort & van Nes, 2009). Deze indicator toont de gemiddelde hoeveelheid tijd dat de werkelijke vertrektijd afwijkt van de geplande vertrektijd. Dit kan zowel inhouden dat een trein te vroeg vertrokken is, als te laat.

$$\bar{p}_j = \frac{\sum_i |t_{i,j}^{real} - t_{i,j}^{planned}|}{n_i}$$

waarin:

$t_{i,j}^{real}$ de werkelijke vertrektijd van trein i vanaf station j ,

$t_{i,j}^{planned}$ de gerealiseerde vertrektijd van trein i vanaf station j ,

n_i het aantal treinen.

Gemeten in seconden geeft een dispunctualiteit van 0 seconden aan dat de vertrekken (gemiddeld) keurig op tijd zijn. Ieder ander getal geeft de gemiddelde waarde aan dat de vertrektijd afwijkt van de geplande vertrektijd.

2.4 Scenario's

Verschillende groeiscenario's zijn ontwikkeld, waarin voor elk scenario een nieuwe dienstregeling geconstrueerd is. In ieder groeiscenario is de frequentie op het netwerk stapsgewijs opgevoerd. Uitgangspunt hierbij is dat de opvolgtijden op de drukste trajecten van het netwerk – de stamtrajecten – gelijk gespreid zijn. Hierbij kan het dus voorkomen dat de intervallen op de uitlopers minder gelijk verdeeld zijn over de tijd. Een nieuw basisscenario is geschreven met dezelfde frequenties als de huidige dienstregeling, waarin infrastructurele aanpassingen die op korte termijn worden gerealiseerd (zoals de opening van de Hoekse Lijn naar Hoek van Holland) zijn verwerkt.

De volgende scenario's zijn geconstrueerd en onderzocht middels OpenTrack:

Tabel 2 Overzicht van de verschillende scenario's die zijn onderzocht

Scenario	Interval op stamtrajecten	Automatiseringsgraad
Huidige dienstregeling	200"	GoA 1
Basisscenario 2021	200"	GoA 1
Scenario 150	150"	GoA 1
Scenario 120	120"	GoA 1 GoA 2 GoA 3
Scenario 100	100"	GoA 1 GoA 2 GoA 3

3. Verschillen in automatiseringsgraad

In de spoorwereld worden meerdere vormen van automatisering onderscheiden. In elk van de verschillende niveaus worden een of meerdere taken van de bestuurder overgenomen door een geautomatiseerd systeem. Er worden vijf verschillende niveaus onderscheiden:

- GoA 0: Het voertuig wordt volledig manueel bediend en er is geen treinbeveiliging aanwezig. Veel (stads)tramlijnen rijden met GoA0
- GoA 1: Het voertuig wordt volledig manueel bediend, maar er is wel treinbeveiliging aanwezig. Veel metro- en spoorssystemen hebben GoA1.
- GoA 2: Het rijden van het voertuig wordt overgenomen door een geautomatiseerd systeem. De bestuurder voorin het voertuig bedient nog wel de deuren en drukt op een knop om de trein in gang te zetten. Deze vorm komt bij veel metrolijnen voor
- GoA 3: Er is geen bestuurder meer aanwezig voorin de trein. Wel is er een steward aanwezig die de deuren bedient, wiens functie over het algemeen overeenkomt met die van een conducteur
- GoA 4: Er is geen personeel meer aanwezig in het voertuig. Alle functies worden uitgevoerd door een geautomatiseerd systeem.

Tabel 3 hieronder geeft een overzicht weer van de verschillende graden van automatisering:

Tabel 3 Overzicht van de verschillende graden van automatisering

Automatisering	Operatie	Rijden/remmen	Deurbediening	Storingen
GoA 0	Geen ATB	Bestuurder	Bestuurder	Bestuurder
GoA 1	ATB	Bestuurder	Bestuurder	Bestuurder
GoA 2	ATB/ATO	Automatisch	Bestuurder	Bestuurder
GoA 3	Bestuurderloos	Automatisch	Steward	Steward
GoA 4	Onbemand	Automatisch	Automatisch	Automatisch

Voor de Rotterdamse metro zijn de niveaus GoA 2 en GoA 3 onderzocht en geïmplementeerd in het OpenTrack model. Voor Niveau 2 is aangenomen dat wanneer dit niveau wordt geïmplementeerd, tevens een nieuw treinbeveiligingssysteem wordt aangelegd in welk geen vaste blokken meer worden toegepast (ook wel CBTC-systemen genoemd). Het ontbreken van een bestuurder voorin in Niveau 3 is gemodelleerd door de minimumkeertijden aan de eindpunten te reduceren van 2 minuten (nu als norm gebruikt

voor de minimum benodigde tijd voor een bestuurder om naar de andere kant van de trein te lopen en de trein gereed te maken voor de volgende rit) naar 30 seconden.

4. Uitkomsten en discussie

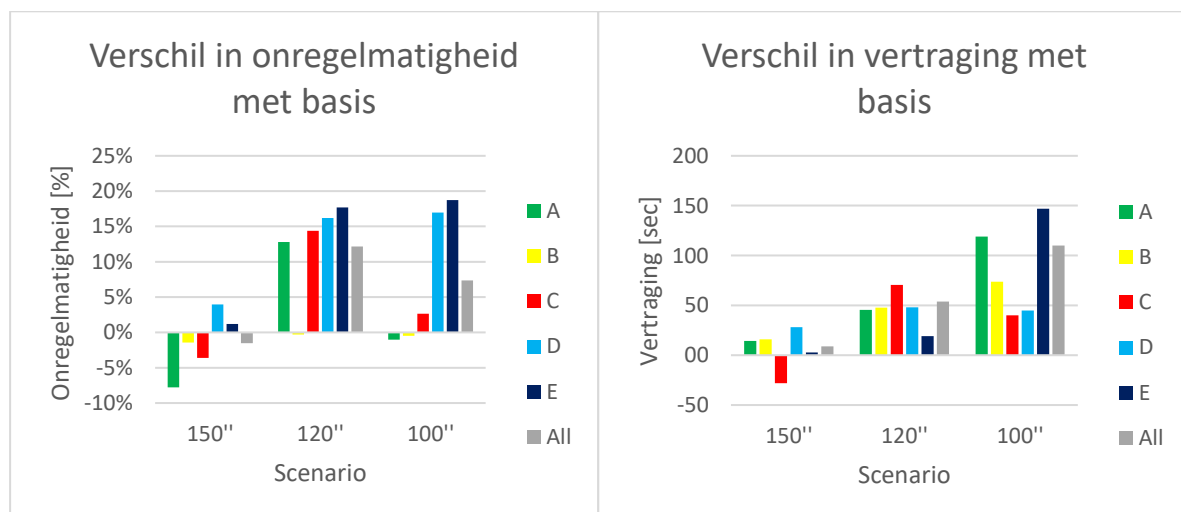
4.1 Resultaten zonder automatisering

Voor elk van de scenario's zijn simulaties uitgevoerd en de resultaten zijn met elkaar vergeleken. Tabel 4 hieronder toont de algehele prestaties van ieder scenario, gezien vanuit beide indicatoren (onregelmatigheid en vertraging). In het algemeen laat de tabel zien dat hoe lager de intervallen op de stamtrajecten, hoe hoger de gemiddelde vertraging wordt. De Scenario's 120 en 100 presteren dusdanig, dat de gemiddelde vertraging zelfs boven de 120 seconden uitstijgt, waarbij Scenario 100 zelfs gemiddelde vertragingen van 180 seconden te verduren krijgt.

Tabel 4 Overzicht van de prestaties van de verschillende scenario's zonder automatisering

Scenario	Onregelmatigheid [%]	Vershil	Vertraging [sec]	Vershil
Basis	17.9	-	70	-
Scenario 150	17.0	- 5 %	79	+ 13 %
Scenario 120	30.8	+ 72 %	124	+ 77 %
Scenario 100	26.4	+ 55 %	180	157 %

Figuur 4 toont, per lijn, de verschillen in prestaties tussen de verschillende groeiscenario's (150, 120 en 100) en het basisscenario. De linker figuur laat de verschillen in onregelmatigheid zien in procentpunt en de rechter figuur de verschillen in gemiddelde vertraging. Voor wat betreft vertraging is een trend zichtbaar dat hoe hoger de frequentie, hoe hoger de vertragingen. Wat betreft onregelmatigheid is een ander fenomeen zichtbaar. Hier geldt niet dat hoe hoger de frequentie, hoe hoger de onregelmatigheid. Scenario 150 bijvoorbeeld presteert qua onregelmatigheid beter dan het basisscenario, en Scenario 100 presteert beter dan Scenario 120.



Figuur 4 Vershil in onregelmatigheid en vertraging voor de verschillende scenario's vergeleken met het basisscenario

De oorzaak van dit fenomeen ligt bij de spreiding van de treinen over de tijd. Bij het construeren van de dienstregelingen is ervoor gezorgd dat de intervallen op de stamtrajecten voor alle treinen gelijk zijn. Hierdoor kan het voorkomen dat de intervallen buiten de stamtrajecten niet gelijk verdeeld zijn. Dit is niet het geval voor Scenario's 150 en 100. In deze scenario's zijn de opvolgtijden voor de treinen ook op de uitlopers gelijk voor alle treinen. Een dienstregeling die dus al op de tekentafel regelmatig is, is ook in de praktijk regelmatiger dan een dienstregeling die op paper minder regelmatig is, ook al is de frequentie hoger.

4.2 Uitkomsten met automatisering

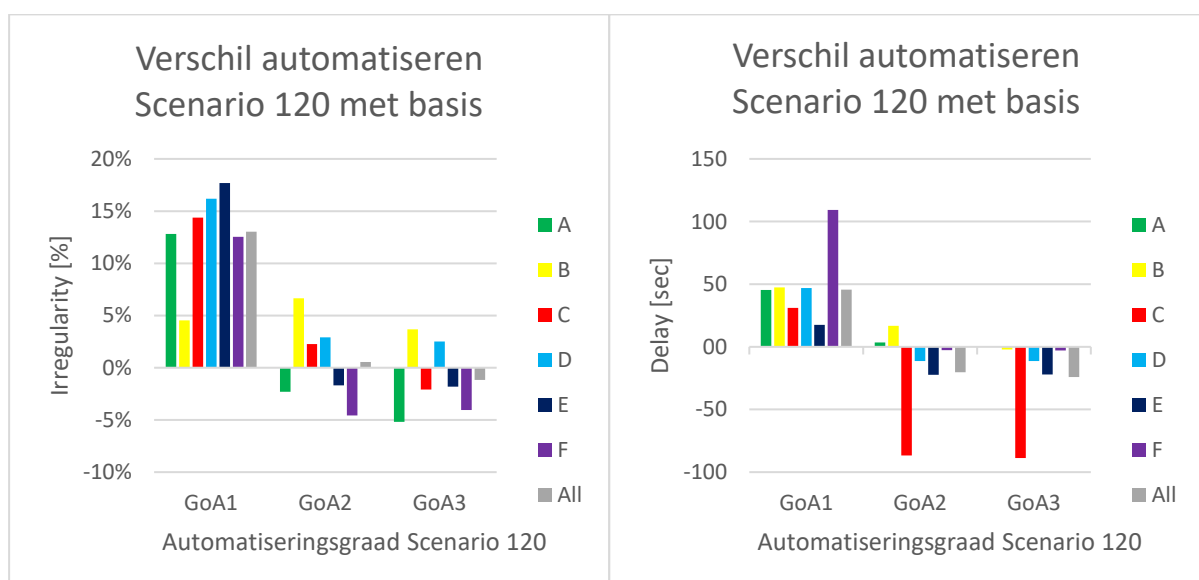
De tabel en de figuren hierboven laten zien dat Scenario's 120 en 100 duidelijk slechter presteren volgens beide indicatoren dan het basisscenario en Scenario 150. Beide scenario's kennen gemiddelde vertragingen van boven de 120 seconden. Voor deze scenario's loont het om te onderzoeken in hoeverre het automatiseren van het netwerk de prestaties van beide kan verbeteren.

Tabel 5 hieronder toont voor Scenario 120 de resultaten van het invoeren van hogere niveaus van automatisering (zoals beschreven in Hoofdstuk 3).

Tabel 5 Overzicht van de prestaties van de verschillende vormen van automatiseren voor Scenario 120

Scenario	GoA	Onregelmatigheid [%]	Verskil basis	Vertraging [sec]	Verskil basis
Basisscenario	1	17.9	-	70	-
Scenario 120	1	30.8	+ 72	124	+ 77
	2	18.5	+ 3	57	- 19
	3	16.6	- 7	54	- 23

Figuur 5 toont dezelfde gegevens, maar dan grafisch. Te zien is dat automatiseren met zowel GoA 2 als GoA 3 flinke verbeteringen in prestaties opleveren voor Scenario 120 en de prestaties brengen naar een niveau vergelijkbaar met het basisscenario, welke beduidend lagere frequenties kent.



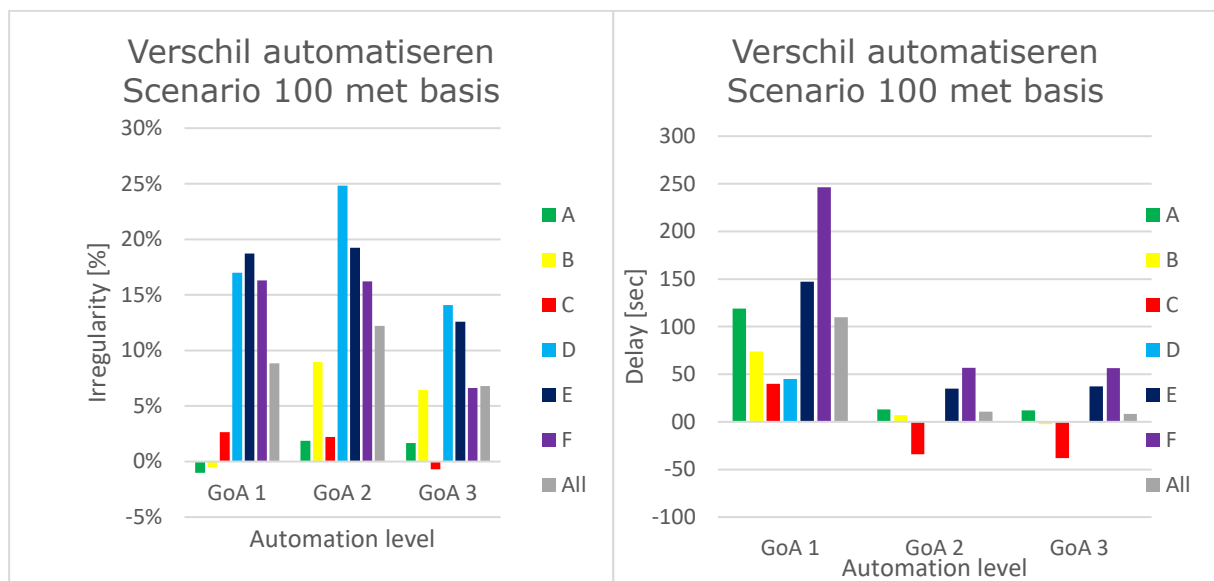
Figuur 5 Verschil in onregelmatigheid en vertraging van Scenario 120 en het basisscenario

Tabel 6 en Figuur 6 tonen de resultaten voor het automatiseren van Scenario 100. Hier zijn heel andere resultaten merkbaar. Te zien is dat de gemiddelde vertraging drastisch wordt gereduceerd door automatiseren en een vergelijkbaar niveau haalt als het

basisscenario. Dit geldt echter niet voor onregelmatigheid, dat nauwelijks verbetert en zelfs voor sommige lijnen iets verslechtert. Ondanks de regelmatigere geplande dienstregeling lijken de toegepaste intervallen in Scenario 100 te veel van het goede en, hoewel de treinen meer op tijd rijden, de gerealiseerde intervallen nog veel afwijken van de geplande intervallen.

Tabel 6 Overzicht van de prestaties van de verschillende vormen van automatiseren voor Scenario 100

Scenario	GoA	Onregelmatigheid [%]	Verskil basis	Vertraging [sec]	Verskil basis
Basisscenario	1	17.9	-	70	-
Scenario 100	1	26.4	+ 47	180	+ 157
	2	30.0	+ 68	81	+ 16
	3	24.0	+ 34	79	+ 13



Figuur 6 Verskil in onregelmatigheid en vertraging van Scenario 100 en het basisscenario

5. Conclusies

De gevolgen van het verhogen van de frequentie op de stabiliteit van de dienstuitvoering zijn duidelijk te observeren. Ook het invoeren van een hoger niveau van automatisering toont een zeer duidelijke verbetering van de dienstuitvoering, zodanig dat structurele intervallen van 2 minuten en lager op de stamtrajecten haalbaar worden. Het onderzoeken van de verschillende scenario's heeft aangetoond dat met de huidige infrastructuur en beveiligingssystemen een dienstregeling met intervallen tot 150 seconden (of 2,5 minuut) nog tot een stabiele dienstuitvoering kan leiden. Het ontwerpen van een goede dienstregeling speelt hierin een belangrijke rol. Door voldoende rij- en keertijdsupplementen in te bouwen kunnen vertragingen tot een minimum worden gelimiteerd. Door bovendien de treinen zo gelijk mogelijk te spreiden in de tijd kan de beschikbare capaciteit zo efficiënt mogelijk worden gebruikt. Op deze manier kan een dienstregeling worden geconstrueerd die leidt tot een zo regelmatig mogelijke dienstuitvoering.

Hiermee kan op de middellange termijn aan de capaciteitsvraag worden voldaan. Op de lange termijn is de huidige infrastructuur echter niet afdoende. Met een verdere verhoging van de frequentie degradeert de dienstuitvoering substantieel. Het toepassen van een hogere automatiseringsgraad biedt hierin een uitkomst en biedt mogelijkheden tot een verdere verhoging van de capaciteit op de Rotterdamse metro.

Verschillende andere steden zijn Rotterdam voorgegaan in het automatiseren van hun bestaande metronetwerk. Deze hebben aangetoond dat het ombouwen ervan een zeer dure en complexe aangelegenheid is. Toch zijn deze investeringen noodzakelijk om Rotterdam in de toekomst leefbaar te houden. Automatisering van de metro maakt de weg vrij voor het verhogen van de capaciteit van het netwerk en bevordert zo de bereikbaarheid en leefbaarheid van de stad. Met een automatische metro is Rotterdam daarmee klaar voor de toekomst.

6. Bibliografie

de Boer, L., Goedbloed, F., van Loon, J. & Wieringa, H., 2019. *Woningbouwmonitor Verstedelijkingsalliantie 2018*, sl: sn

Gemeente Rotterdam, 2019. *Transformatie en verdichting Rotterdamse Binnenstad 2010-2030*, Rotterdam: sn

UITP, 2019. *World Report on Metro Automation 2018*. [Online] Available at: <http://metroautomation.org>

van Oort, N. & van Nes, R., 2009. Control of public transportation operations to improve reliability: Theory and practice. *Transportation Research Record*, 2112(2112), pp. 70-76.

van Oort, N. & van Nes, R., 2009. Regularity analysis for optimizing urban transit network design. *Public Transport*, 1(2), pp. 155-168.