

Robuustheid van stedelijke railnetwerken

Gert-Jaap Koppenol – Royal HaskoningDHV – gert-jaap.koppenol@rhdhv.com
Marc van Deventer – Vervoerregio Amsterdam – m.vandeventer@vervoerregio.nl
Oded Cats – Technische Universiteit Delft – o.cats@tudelft.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 23 en 24 november 2017, Gent

Samenvatting

De groei in de stad en daarmee gepaarde groei in verkeersintensiteiten zowel voor auto, fiets als openbaar vervoer zorgt ervoor dat onder andere werkzaamheden inpassen steeds lastiger wordt. Mogelijkheden tot bijsturing van het openbaar vervoer in het algemeen en in het bijzonder het stedelijke railnetwerk worden daarbij dan ook steeds belangrijker. Het is daarvoor wel nodig dat de noodzakelijke bijsturingsinfrastructuur aanwezig is. Het inzichtelijk hebben van de onmogelijkheden en mogelijkheden tot omleiden, kort keren en de verdere alternatieven die reizigers te bieden zijn, is dan ook essentieel. Maar hoe doe je dit? En hoe toon je de waarde aan van infrastructuur die alleen in situatie van bijsturing gebruikt wordt?

Om antwoord te gaan geven op deze vragen is de methode 'Van globale netwerkanalyse naar lokale bijstuurmaatregelen' ontwikkeld. In deze methode wordt het netwerk op link-niveau geanalyseerd op kwetsbaarheid. Vervolgens wordt de waarde van aanwezige en potentiële infra geïnventariseerd. De methode is toegepast op een schetsmatig vervoerplan van het stedelijk railnetwerk van Amsterdam ontworpen voor de opening van de Noord/Zuidlijn. De resultaten van de globale netwerkanalyse geven inzicht in de kwetsbare linkjes in het netwerk van Amsterdam. De analyse op de lokale bijstuurmaatregelen geven waardevolle inzichten in ontbrekende infrastructuur voor bijsturing tijdens verstoringen. Zo geven de resultaten een vruchtbare bijdrage aan discussies tot aanleg of sanering van railinfrastructuur ten behoeve van bijsturing. Daarnaast geeft het inzicht die kunnen leiden tot een bijsturing-handboek voor de verkeersleiding in geval van verstoringen.

De toepassing in het Amsterdamse laat zien dat de methode 'Van globale netwerkanalyse naar lokale bijstuurmaatregelen' een functionele eerste stap is naar het inzichtelijk maken van zowel de robuustheid van stedelijke railnetwerken en de waarde en impact van bijstuurinfra. Vervolgstappen kunnen genomen worden om de resultaten van de methode mee te nemen in business cases en MKBA.

1. Inleiding

1.1 Motivatie

Amsterdam barst uit haar voegen. De stad is vol, bewoners, forensen en toeristen verdringen zich op en langs het wegennet. De autowegen staan vol, terwijl pelotons fietsers door de stad sukkelen. Ook de trams zitten vol. Tegelijkertijd timmert de stad letterlijk driftig aan de weg. Na het megaproject Noord/Zuidlijn wordt op veel plaatsen de schep in de grond gezet. Straten worden heringericht, waarbij het accent meer bij langzaam verkeer komt te liggen. Ook het openbaar vervoer wordt niet vergeten. Met het programma Investerings Agenda Openbaar Vervoer (Stadsregio Amsterdam, 2013) worden honderden miljoenen geïnvesteerd om tram en bus sneller en betrouwbaarder te maken. Ook dat gaat dan weer gepaard met een hele serie nieuwe opbrekingen. En breken wordt er niet makkelijker op. Tegenwoordig vraagt dat een breed pakket aan veiligheidsmaatregelen, waarbij meer en meer hele wegvakken tijdelijk worden afgesloten. Daarnaast levert werk aan de railinfrastructuur zònder of met beperkt tramverkeer een flinke tijdwinst en kostenbesparing op.

Maar buitendienststellingen en omleidingen, dat botst met de drukte. De trams zitten immers vol, en de capaciteit op vooral kruispunten en haltes is beperkt. Kan dat zomaar? Hoe kan je daar zo verantwoord mogelijk mee omgaan? Moet je investeren in extra infrastructuur om dit mogelijk te maken? Wat is daarvan de nut en noodzaak? En uiteindelijk is dan de kernvraag: hoe kan een reiziger over een verstoord netwerk alsnog en zo vlot mogelijk de voorziene reis maken. Dat zijn de vragen die hier aan de orde komen. Dat is niet alleen een Amsterdams verhaal, maar universeel toepasbaar. De kennisontwikkeling op dat gebied is echter beperkt, en vooral gebaseerd op ervaring van de oudgedienden. Bij velen is er geen inzicht, vooral niet over de gevolgen voor de reizigers. En juist de reiziger, daar doen we het voor.

1.2 Doel

In dit paper wordt een methode voorgesteld die de robuustheid van stedelijke railnetwerken en daarbij de waarde en impact van bijstuurinfra inzichtelijk maakt. De methode die omschreven wordt als 'Van globale netwerkanalyse naar lokale bijstuurmaatregelen' heeft een topdown structuur waarbij het netwerk op *link-niveau* wordt geanalyseerd op kwetsbaarheid door middel van een ontwikkeld reizigerstoedelingsmodel en robuustheidsindicator. Vervolgens wordt er ingezoomd naar de aanwezige infra op lokaal niveau om de waarde met *expert-judgment* te inventariseren.

1.3 Scope

Scope van de methode

Het grootste deel van dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van een afstudeeropdracht (Koppenol, 2016). De scope van de methode is mede daardoor beperkt tot stedelijke spoorgebonden OV netwerken (tram en metro), netwerken waarbinnen de frequenties en vervoervraag hoog is. De hogere netwerkdichtheid zorgt ervoor dat er bij kleinere

verstoringen al interessante alternatieve routes voor reizigers ontstaan en dat alternatieve routes voor de tramlijnen realistisch zijn. Verder zijn bij de grote vervoervraag de effecten eenvoudiger in kaart te brengen door de sneller toenames in gegeneraliseerde reiskosten. De verwachting voorafgaande aan het onderzoek is dan ook dat een gedeeltelijke capaciteitsreductie op een traject ten opzichte van volledige buitendienststelling in deze gevallen meer onderscheid laat zien. Verder wordt alleen gekeken naar geplande capaciteitsreducties op halte-halte niveau. Dit rechtvaardigt de ontwikkeling en gebruik van een statisch model in plaats van een dynamisch model. Bij geplande verstoringen komt en-route route keuze gedrag namelijk veel minder voor dan bij ongeplande verstoringen. Dit neemt niet weg dat conclusies voor geplande verstoringen doorgaans zonder meer hanteerbaar zijn bij onvoorziene verstoringen.

Scope van de globale analyse

De globale analyse bestaat uit een modelaanpak op macroniveau. Hierbij zijn de reizigersstromen op verschillende alternatieve routes tussen herkomst en bestemming toegedeeld, hierbij is het individuele keuzegedrag van OV reizigers niet meegenomen. De reizigersintensiteit is wel per link in kaart gebracht.

De analyse vergt de berekening van een groot aantal verschillende scenario's, het model dient dan ook een lage rekentijd per scenario te hebben om zo de analyse binnen beperkte tijd af te ronden. Daarvoor is aangenomen dat voor het verschaffen van inzicht in *link-robustheid* infrastructurele-karakteristieken, reizigersstroom karakteristieken en lijn frequenties voldoende zijn en een microsimulatie dus niet nodig is.

Verder is niet gekeken naar betrouwbaarheid van materiaal, materieel en infrastructuur en is aangenomen dat de vervoersvraag inelastisch is (reizigers veranderen hun herkomst en bestemming niet in de situatie van een lokale capaciteitsreductie).

Scope van de lokale analyse

De lokale analyse bestaat uit een expert judgment van mogelijke omleidingen voor de railvoertuigen. Dit wordt alleen uitgevoerd voor trajecten binnen het tramnet. Voor het metronet is deze analyse niet gemaakt, dit omdat er eigenlijk geen omleidingsmogelijkheden bestaan. Wanneer een traject niet gebruikt kan worden, dan is alleen inkorten tot een calamiteitenwissel, met gelijktijdige inrichting van een pendeldienst mogelijk.

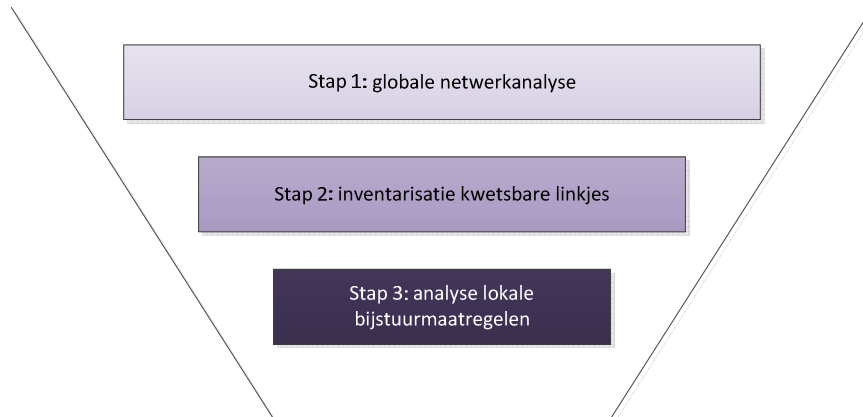
De mogelijke omleidingen voor de tram zijn alleen bedacht op bestaande railtrajecten, hierbij zijn beperkingen in de knooppunten (afwezigheid van trambogen) in eerste instantie niet meegenomen. De afwezigheid van specifieke trambogen en wissels wordt in tweede instantie wel aangegeven. Hierbij wordt geen rekening gehouden met fysieke inpassingen, benodigde aanpassingen aan verkeersregelingen en het effect van type wissels (elektrisch of handbediend).

1.4 Inhoud

Als eerste zal de methode toegelicht worden in hoofdstuk 2. Vervolgens zal in hoofdstuk 3 de toepassing op het Amsterdamse stedelijke spoorgebonden OV netwerk toegelicht worden. Het paper eindigt met de resultaten van deze toepassing in hoofdstuk 4 en conclusies over de methode in hoofdstuk 5.

2. Methode 'Van globale netwerkanalyse naar lokale bijstuurmaatregelen'

De methode voor het inzichtelijk maken van de robuustheid van stedelijke railnetwerken waarmee de waarde en impact van bijstuurinfra in kaart wordt gebracht werkt topdown van globaal naar lokaal. De methode bestaat uit grofweg drie stappen, welke schematisch zijn weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 Schematische weergave methode 'Van globale netwerkanalyse naar lokale bijstuurmaatregelen'

De eerste stap is een modelstudie naar de robuustheid van linkjes (halte-halte relaties) in het netwerk. Hierin wordt gebruik gemaakt van een *reizigerstoedelingsmodel*. De robuustheid per linkje wordt gekwantificeerd door middel van een *robuustheidsindicator*. De tweede stap is inventarisatie van de linkjes die nadere analyse behoeven op lokaal niveau. De input hiervoor zijn de scores op de robuustheidsindicator. De derde stap is de lokale kwalitatieve bijstuurmaatregelenanalyse.

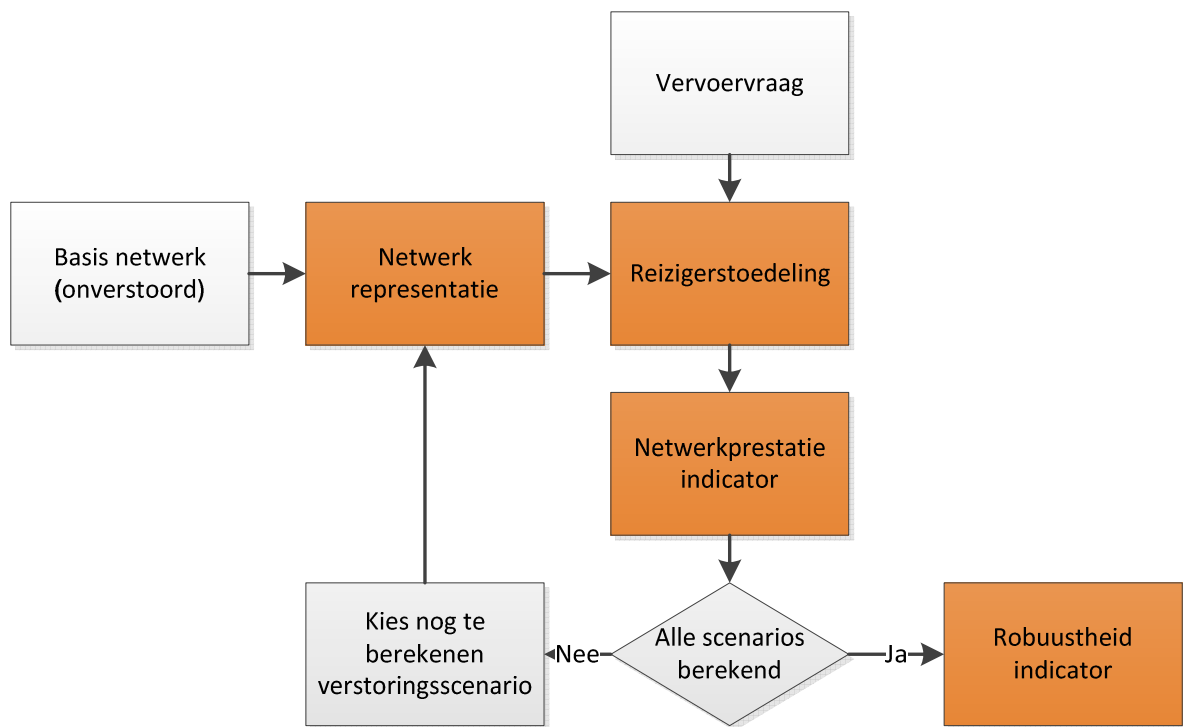
2.1 Stap 1: globale netwerkanalyse

Een schematische weergave van de globale netwerkanalyse is gegeven in figuur 2. In het basisnetwerk zitten gegevens als rijtijden, frequenties, gemiddelde snelheden en routes van de tramlijnen. De vervoervraag is gegeven als een herkomst-bestemming matrix tussen de verschillende tramhaltes en metrostations in het netwerk. Het reizigerstoedelingsmodel is verder weer te geven in drie componenten (gemarkeerd in het figuur) waarmee alle verstoringsscenario's uitgevoerd worden:

- Netwerk representatie – voor elk verstoringsscenario worden de rijtijden, op basis van een verlaging van de gemiddelde snelheid op de halte-halte relatie, en de gevolgen daarvan op het netwerk doorgevoerd
- Reizigerstoedeling – de reizigers worden aan een van de mogelijke routes tussen herkomst en bestemming toegedeeld op basis van kosten minimalisatie principes
- Netwerkprestatie indicator – de prestatie van het netwerk wordt berekend op basis van de totale gegeneraliseerde reiskosten in het netwerk op basis van de door de reiziger beleefde rijtijd, wachttijd en aantal voerstappen

Bovenstaande stappen worden herhaald voor alle verstoringsscenario's. Nadat alle relevante verstoringsscenario's – stapsgewijze capaciteitsreducties voor alle linkjes in het netwerk – zijn uitgevoerd, wordt de lus verlaten en wordt een vierde component berekend:

- Robuustheidsindicator – de robuustheid van elk linkje wordt uitgedrukt in een kwantitatieve indicator gebaseerd op de netwerkprestatie tijdens de verschillende verstoringsscenario's op dit linkje.



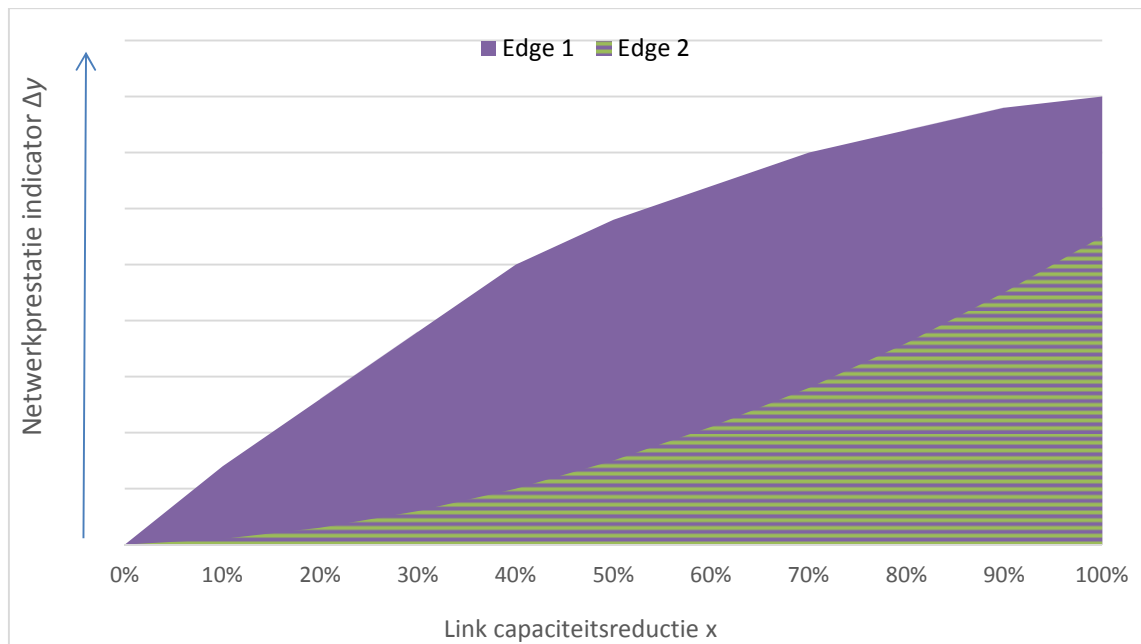
Figuur 2 Schematische weergave globale netwerkanalyse met reizigerstoedelingsmodel en robuustheidsindicator

Netwerkprestatie indicator

De netwerkprestatie indicator meet de prestatie van het netwerk als de totale gegeneraliseerde reiskosten in het netwerk. De indicator is in staat om de gevolgen van een verstoring te meten op zowel de in-voertuigtijd, wachttijd en aantal overstappen van een reiziger. Het berekent dus het effect van een capaciteitsreductie op een linkje op de prestatie van het openbaar vervoernetwerk als geheel.

Robuustheidsindicator

Als indicator voor robuustheid van de linkjes is gebruikt gemaakt van *Link Kritikaliteit* (Cats et al., 2017). *Link Kritikaliteit* wordt berekend door de som van de netwerkprestaties in het basis scenario en alle verstoringsscenario's te nemen. Deze indicator geeft het gesommeerde effect van de volledige reeks aan verstoringen op de netwerkprestatie weer. De netwerkprestatie per verstoringsscenario's kan in een grafiek uitgezet worden voor elk linkje, dit wordt de netwerk degradatie curve genoemd. Voor twee slechts als voorbeeld dienende linkjes zijn de twee curves (respectievelijk egaal en horizontaal gestreept) te vinden in figuur 3. Het oppervlak onder de curve correspondeert met de waarde van de *Link Kritikaliteit*. Hoe groter de Δy van de netwerkprestatie indicator, hoe groter het oppervlak onder de curve, hoe groter het effect van de verstoring op het netwerk en dus hoe groter de *Link Kritikaliteit*.



Figuur 3 Voorbeeld netwerk degradatie curves, op de horizontale as de link capaciteitsreductie als percentuele reductie op de gemiddelde snelheid op de halte-halte relatie, op de verticale as de netwerkprestatie in totale gegeneraliseerde reiskosten

2.2 Stap 2: inventarisatie kwetsbare linkjes

Door de aanname dat alle bijstuurinfra (trambogen en wissels) aanwezig is, geeft de *Link Kritikaliteit* slechts een indicatie van waar waardevolle bijstuurinfrastructuur zou kunnen liggen. In bijvoorbeeld een situatie waar niet alle bijstuurinfra aanwezig is, is de kans op onderschatting van *Link Kritikaliteit* aanwezig. In zo'n situatie worden de berekende effecten van de verstoring beperkt terwijl dat in realiteit niet geheel kan.

In principe is het mogelijk alle linkjes in een netwerk te analyseren om op lokaal niveau te bepalen welke bijstuurinfra van waarde is. Vanwege de beperkte waarde van het analyseren van alle linkjes en de kosten in tijd die daarmee gemoeid zijn is er voor gekozen binnen de methode alleen specifieke type linkjes nader te beschouwen. De nader te beschouwen types zijn grofweg in te delen in drie categorieën die een combinatie zijn van netwerkdichtheid (hoog of laag) en *Link Kritikaliteit* (hoog of laag), de categorie lage netwerkdichtheid en lage *Link Kritikaliteit* wordt verder niet beschouwd.

Ter controle of de aangenomen bijstuurinfra wel aanwezig is en of deze dus nog wenselijk is wordt de categorie lage netwerkdichtheid en hoge kritikaliteit wel beschouwd. Ondanks de al hoge kritikaliteit zou hier ook de kritikaliteit nog onderschat kunnen zijn door de afwezigheid van benodigde bijstuurinfra. Deze categorie zou daarmee dus wenselijke bijstuurinfra in beeld kunnen brengen.

Verder zullen hoge kritikaliteit zowel bij een lage als bij een hoge netwerkdichtheid beschouwd worden. In het eerste geval geeft deze een indicatie voor de wens voor oplossingen buiten het stedelijke railnetwerk, denk hierbij aan vervangend busvervoer of omreisroute met de trein. In het tweede geval is het belang de bijstuurinfra te

inventariseren om te voorkomen dat de toename van gegeneraliseerde reiskosten nog hoger wordt.

2.3 Stap 3: analyse lokale bijstuurmaatregelen

De lokale analyse op bijstuurmaatregelen bestaat uit een expert judgment op de mogelijke omleidingsroutes voor de railvoertuigen op de linkjes geïnventariseerd in stap twee. Hierbij wordt gekeken naar alle tramlijnen die in onverstoorde situatie dit linkje passeren. Er wordt gekeken hoe het netwerk een volledige uitdienstname van het linkje (het traject tussen twee knooppunten) of de twee knopen die het linkje verbindt omleidingsroutes biedt voor alle tramlijnen die in onverstoorde situatie dit linkje passeren.

Hierbij wordt het uitgangspunt gehanteerd dat de railvoertuigen zo snel mogelijk weer terug zijn op de originele lijn om zodoende het vervoer in die richting in stand te houden. Wanneer dit niet mogelijk is wordt gekeken waar het mogelijk is een overstapverbinding naar het metronet te verzorgen. Op trajectniveau wordt rekening gehouden met aanwezige railinfrastructuur, op kruispuntniveau wordt eerst gekeken naar alle mogelijke omleidingen zonder rekening te houden met afwezige trambogen en wissels. Vervolgens wordt gekeken welke trambogen niet aanwezig zijn voor de gewenste omleidingen. Hierbij wordt geen rekening gehouden met fysieke inpassing, benodigde aanpassingen van verkeersregelingen en type wissels (elektrisch of handbediend).

3. Toepassing

Er is gekozen de methode toe te passen op het stedelijk spoorgebonden OV netwerk in Amsterdam.

3.1 Huidige situatie stedelijk spoorgebonden OV netwerk Amsterdam

Het huidige Amsterdamse spoorgebonden OV netwerk bestaat uit veertien tramlijnen en vier metrolijnen. Dagelijks maken circa 350.000 reizigers gebruik van het tramnet en op een gemiddelde werkdag gebruiken ruim 200.000 reizigers het metronet.

De vier deels vervlochten metrolijnen maken gebruik van een volledig dubbelsporig netwerk. In het metronet zijn op regelmatige afstand bijsturingswissels aanwezig, op enkele plaatsen liggen ook speciale keerspooren. Deze keerspooren worden geregeld gebruikt.

De veertien tramlijnen maken gebruik van een voornamelijk dubbelsporig netwerk, waarin soms ook enkel- en strengelspoor in is opgenomen. Het grootste deel van het tramnetwerk ligt in de straat, deels op vrije baan maar ook gemengd met autoverkeer. Een kleiner deel van het tramnetwerk heeft vrijliggende infrastructuur. Het tramnetwerk is op kruispunten vrijwel steeds voorzien van wissels en bogen die andere dan reguliere trambewegingen mogelijk maken. Deze wissels en bogen zijn over het algemeen niet in

de verkeersregeling opgenomen, ook is een deel van de wissels slechts handmatig te bedienen.



Figuur 4 Traminfrastructuur in Amsterdam, de lijnen indiceren de aanwezige tramsporen en bijstuurinfra

In het huidige openbaar vervoer van Amsterdam is het tramnet de drager. Deze rol zal met de komst van de Noord/Zuidlijn en de daarbij gepaarde veranderingen in het bus en tramnet veranderen.

3.2 Verwachte situatie 2020 en run3a

In 2018 wordt aan het metronet een geheel autonome vijfde lijn toegevoegd: de Noord/Zuidlijn. Als gevolg van de opening van deze lijn en het als gevolg daarvan vernieuwde vervoerplannen voor de tram en metro zal de dragende rol van het tramnet deels worden overgenomen door de Noord/Zuidlijn. In het nieuwe vervoerplan zal een deel van de huidige tramlijnen in de binnenstad een nieuwe oost-west gericht route krijgen. Het Leidseplein wordt daarbij de nieuwe *hub* in het tramnetwerk. De metrostations Vijzelgracht en Weesperplein zijn de belangrijke overstappunten tussen tram en metro. De hoeveelheid tramverkeer op een aantal aan de metro parallelle assen in de binnenstad zal worden teruggedrongen.

Uitgangspunt voor dit onderzoek is een schetsmatig vervoerplan ontworpen voor de opening van de Noord/Zuidlijn. Inmiddels heeft de Vervoerregio op voorstel van concessiehouder GVB een definitief Vervoerplan vastgesteld. Ten tijde van dit onderzoek was daarvan echter nog geen sprake. De principes die aan het definitieve Vervoerplan ten grondslag liggen zijn echter hetzelfde als van het schetsmatige plan. Het verschil zit voornamelijk in keuzes rond het verbinden van diverse lijndelen. De naam van dit schetsmatige vervoerplan is run3a uit het toenmalige GenMod model.

4. Resultaten

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de toepassing van de methode op het stedelijk spoorgebonden OV netwerk in Amsterdam. De beschrijving van deze resultaten zal plaatsvinden overeenkomstig de stappen zoals beschreven in hoofdstuk 2.

4.1 Stap 1: globale netwerkanalyse

Van alle trajecten in het Amsterdamse tram en metronetwerk is de capaciteit stapsgewijs verlaagd door de gemiddelde snelheid op de trajecten met 10% te verlagen tot een snelheid van 0 km per uur. Op basis van deze verstoringsscenario's is de *Link Kritikaliteit* van alle linkjes berekend. De resultaten van de *Link Kritikaliteit*, met als eenheid minuten, is geografisch weergegeven in figuur 5.



Figuur 5 Link Kritikaliteit per link in het spoorgebonden OV netwerk in Amsterdam geografisch weergegeven

De meer kritische linkjes doen zich voor op de intensief gebruikte metrolijnen. De minder kritische linkjes bevinden zich in de centraal gelegen delen van het netwerk met een hoge netwerkdictheid. De meest kritische linkjes bevinden zich in de afgelegen takken. In het tramnet is dit bijvoorbeeld de Cornelis Lelylaan, de oost-westverbinding in het westen van het netwerk, de tak naar Amstelveen in het zuiden en de IJtram tak in het oosten.

4.2 Stap 2: inventarisatie kwetsbare linkjes

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 zullen specifieke type linkjes nader beschouwd worden.. Per type is hieronder beschreven welke linkjes daar in het Amsterdamse netwerk nader beschouwd worden en hoe daar in stap 3 verder naar gekeken gaat worden.

Lage netwerkdichtheid en Hoge kritikaliteit

Een lage netwerkdichtheid en hoge kritikaliteit zien we bij de IJtram en de Cornelis Lelylaan. In de volgende stap zal de infrastructuur op deze trajecten geïnventariseerd worden om te kijken of extra alternatieven nodig zijn.

Hoge netwerkdichtheid en lage kritikaliteit

Een hoge netwerkdichtheid en lage kritikaliteit zien we bij de Paulus Potterstraat/Hobbemastraat. In de volgende stap zal de infrastructuur op dit traject geïnventariseerd worden om te kijken of de alternatieve omreis en omleidingsroutes aanwezig zijn om die lage kritikaliteit te bevestigen.

Hoge netwerkdichtheid en hoge kritikaliteit

Een relatief hoge kritikaliteit in een hoge netwerkdichtheid zien we op de Sarphatistraat ten oosten van de brug over de Amstel. In de volgende stap zal op de infrastructuur ingezoomd worden om te bepalen of alternatieven in de bijsturing nodig zijn.

4.3 Stap 3: analyse lokale bijstuurmaatregelen

In deze stap worden de resultaten van de expert judgment op de nader te beschouwen linkjes besproken. Dit gebeurt per type, waarin een of meerder voorbeelden besproken worden.

Lage netwerkdichtheid en hoge kritikaliteit

Een lage netwerkdichtheid betekent over het algemeen dat trajecten geen of nauwelijks paralleliteit met andere tramspoorverbindingen hebben. Als gevolg daarvan hebben reizigers en tramvoertuigen niet of nauwelijks keuze in de vorm van alternatieve omreis of omleidingsroutes. Twee specifieke trajecten worden hierbij, in onverstoorde situatie, ook nog eens intensief gebruikt. Het betreft:

- Het traject richting IJburg, in gebruik door tramlijn 26 (IJtram)
- Het traject over de Cornelis Lelylaan, in gebruik door tramlijn 1 en 17

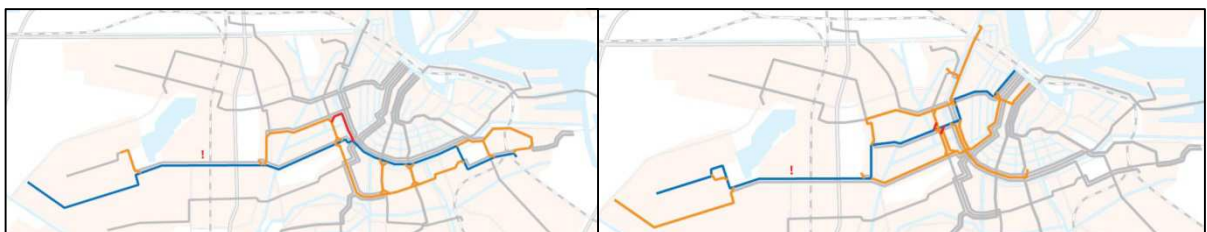


Figuur 6 Tramlijn 26, blauwe lijn onverstoorde route, gele lijn: bestaande bijstuurinfra, uitroeptekens: traject zonder mogelijke bijsturing

Tramlijn 26, ofwel de IJtram, is in feite een geïsoleerde tramlijn met alleen bij het Centraal Station een aansluiting op de rest van het tramnet. Deze hoogfrequente lijn wordt zeer intensief gebruikt wat de hoge *Link Kritikaliteit* deels verklaard.

Bijsturingsmogelijkheden zijn door het geïsoleerde karakter van de tram beperkt. Wissels die enkelspoorrijden mogelijk zouden maken ontbreken, de aanwezige keerlus bij Zeeburgereiland is slechts bruikbaar vanuit IJburg en de aanwezige keerlus bij de Passagiersterminal is slechts bruikbaar vanuit CS. Voor reizigers betekent dit dat er bij een verstoring nauwelijks alternatieven zijn per spoor. Waar er in de onverstoorde situatie nog overgestapt kan worden bij het Rietlandpark op lijn 7 is dit bij een verstoring van lijn 26 niet mogelijk doordat er nauwelijks keermogelijkheden zijn.

Deze studie laat zien dat tramlijn 26 in zijn geheel een hoge kritikaliteit heeft en dat er noodzaak is voor extra bijstuurvoorzieningen. Een ontwikkeling in lijn met deze constatering is de voorbereiding van de aanleg van een calamiteiten lus aan de IJzijde van het Centraal Station om tijdens verstoringen bij het voorplein van het Centraal Station, de meest voorkomende voor deze lijn, lijn 26 in dienst te houden en zelfs verbonden te houden met het Centraal Station. Om ook robuust te zijn tegen verstoringen elders op de lijn en het vervoer überhaupt flexibeler te maken, is het bijvoorbeeld een idee om lijn 26 te gaan exploiteren met tweerichtingsmaterieel en de infrastructuur op de lijn uit te breiden met calamiteitenwissels. Ook de meermaals geopperde aanleg van een tramverbinding tussen Zeeburgereiland en de Indische Buurt kan bijdragen aan een lagere kritikaliteit van deze verbinding.



Figuur 7 Tramlijn 1 (rechts) en 17 (links) in Amsterdam, blauwe lijn: onverstoorde route, gele lijn: bestaande bijstuurinfra, rode lijn: niet bestaande bijstuurinfra, uitroepteken: traject zonder mogelijke bijsturing.

De Cornelis Lelylaan faciliteert de tramlijnen 1 en 17 die daarmee Osdorp en de stadsdelen Oud-West en Binnenstad met elkaar verbindt, zie figuur 7. Het deel tussen Station Lelylaan en Osdorp wordt het meest intensief gebruikt.

Hoewel er aan beide uiteinden van het traject goede bijsturingsmaatregelen mogelijk zijn, is er bij een verstoring op het geïsoleerde traject op de Cornelis Lelylaan geen tramverkeer mogelijk tussen Osdorp en de rest van het tramnetwerk. Ook de verbinding met het bovenliggende metro en nationale treinnetwerk gaat hierbij verloren.

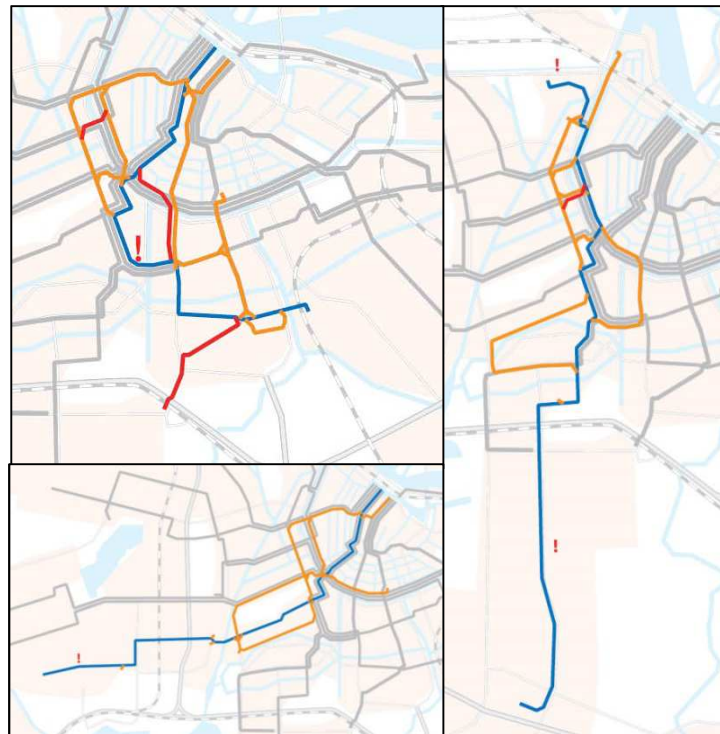
Om de robuustheid van dit traject te vergroten is het zaak om de lijnen in ieder geval verbonden te houden met Station Lelylaan zodat reizigers alternatieve routes krijgen over het metro en treinnetwerk. Een reële mogelijkheid hiervoor is de aanleg van een

keervoorziening bij Station Lelylaan die bij een stremming aan een van beide kanten van Station Lelylaan de verbinding met de andere kant in stand houdt.

Hoge netwerkdichtheid en lage kritikaliteit

Een hoge netwerkdichtheid wordt vaak gevonden midden in het netwerk waar de vervoersintensiteiten het grootst zijn, dit heeft het nadeel dat een verstoring daar veel reizigers raakt. Positieve bijkomstigheid bij hoge netwerkdichtheid is dat er tal van omreis en omrijroutes zijn waardoor naar verwachting de effecten op de netwerkprestatie beperkt blijven. Op het tramtraject door de Paulus Potterstraat en de Hobbemastraat is dit te zien door de lage kritikaliteit. Dit is echter alleen zo als de omrij en omreisroutes ook daadwerkelijk mogelijk zijn. Hiervoor wordt de aanwezige infrastructuur nader beschouwd voor bijsturing van de volgende tramlijnen op het traject Paulus Potterstraat –Hobbemastraat:

- Tramlijn 2 tussen Nieuw Sloten en Centraal Station
- Tramlijn 5 tussen Amstelveen Stadshart en Westergasfabriek
- Tramlijn 12 tussen Amstelstation en Centraal Station



Figuur 8 Tramlijn 2 (linksonder), 5 (rechts) en 12 (linksboven), blauwe lijn: onverstoorde route, gele lijn: bestaande bijstuurinfra, rode lijn: niet bestaande bijstuurinfra, uitroepteken: traject zonder mogelijke bijsturing.

Puur de railinfra beschouwende lijkt de oude en twee minuten tragere route via de van Baerlestraat en de Overtoom een zeer goede alternatieve omrijroute voor de tramlijnen, zie figuur 8. De door toeristen veelvuldig gebruikte tramhalte bij het Rijksmuseum is dan echter niet meer bereikbaar en het drukke autoverkeer in de Van Baerlestraat hindert het tramverkeer waarschijnlijk dermate dat de vertraging niet bij 2 minuten gaat blijven.

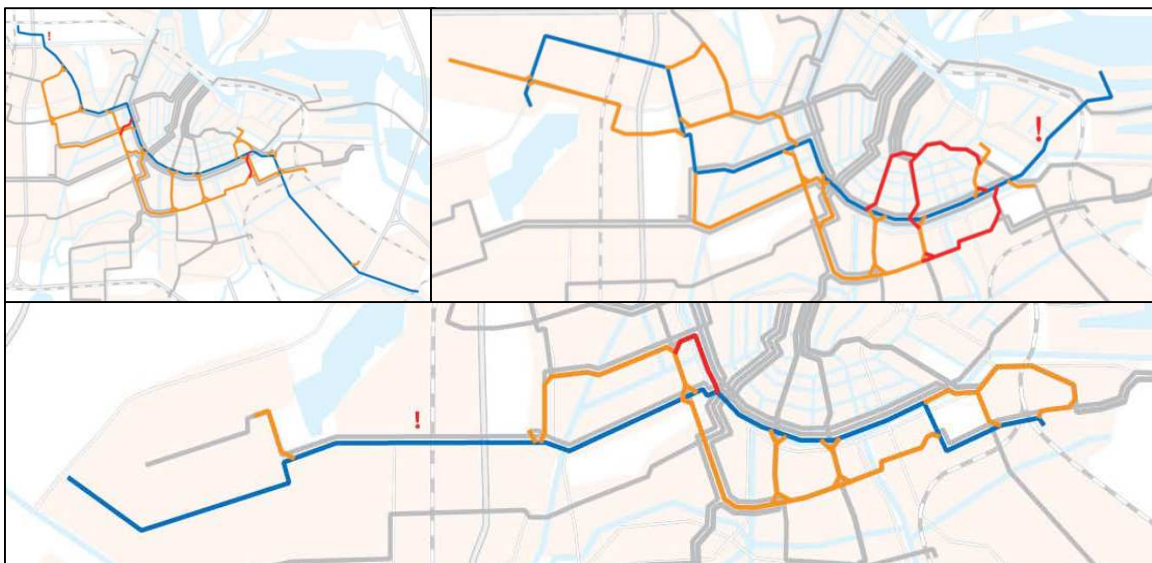
De eerstvolgende mogelijk lijkende omrijroute over de Bilderdijkstraat-Kinkerstraat-Marnixstraat is niet mogelijk door het ontbreken van trambogen rechtsafbuigend van de Bilderdijkstraat op de Kinkerstraat en linksafbuigend van de Kinkerstraat op de

Bilderdijkstraat. De daaropvolgende alternatieve routes zorgen voor te grote toename in de rijtijden of te lange afwijkingen van de tramroute voor verder beschouwing.

Hoewel hier uit de plaats in het netwerk dus een lage kritikaliteit volgt, wordt die conclusie niet bevestigd in de lokale analyse. Juist het gebrek aan capaciteit van de voorhanden alternatieven, en het deels niet kunnen bedienen van de voornaamste herkomsten en bestemmingen leidt alsnog tot een hogere kritikaliteit. Om dit op te lossen zijn eigenlijk geen reële oplossingen in de infrastructuur denkbaar.

Hoge netwerkdichtheid en hoge kritikaliteit

Ondanks de hoge netwerkdichtheid wordt op de Sarphatistraat ten oosten van de brug over de Amstel toch een hoge kritikaliteit gevonden. Dit traject wordt straks dan ook hoog frequent bereden door de tramlijn 1,7 en 19.



Figuur 9 Tramlijn 1,7 en 19, blauwe lijn: onverstoorde route, gele lijn: bestaande bijstuurinfra, rode lijn: niet bestaande bijstuurinfra, uitroeptekens: traject zonder mogelijke bijsturing

Bij verstoringen ten westen van het Frederiksplein is een veelheid aan alternatieven beschikbaar, zodat daar het oost-westgerichte tramverkeer bij verstoringen redelijk in stand kan worden gehouden. Gebleken is echter dat bij verstoringen of het Frederiksplein zelf, en ten oosten daarvan (zoals de beweegbare brug Hogesluis) het tramverkeer naar Rietlandpark komt stil te liggen. Er zijn daarvoor geen alternatieven beschikbaar. Door het gebrek aan wissels is een omleiding in die richting niet mogelijk. Voor de huidige tramlijn op dit traject (lijn 10) is dit al meermaals een aanzienlijk probleem gebleken, zowel bij geplande stremmingen als bij geregeld optredende verstoringen.

Proefondervindelijk is hier een hoge kritikaliteit vastgesteld, die in de modelstudie bevestigd is. De lijnen 1 en 19 hebben hier een veel lagere kritikaliteit. Voor die lijnen is de route via Oosterpark naar de Indische Buurt respectievelijk Watergraafsmeer/Diemen zonder meer beschikbaar.

In het nieuwe lijnennet zal lijn 7 naar Rietlandpark (en Azartplein) gaan rijden. Op het bijgaande kaartje van lijn 7 is een veelheid aan rode trajecten te zien waarmee Frederiksplein en de Hogesluis/Weesperplein omzeild kunnen worden. Daarin ontbreekt

een rood traject vanaf Alexanderplein richting Artis. Railtechnisch zijn de hiervoor benodigde bogen bij Alexanderplein niet inpasbaar. Wel inpasbaar zijn bogen bij de Roetersstraat. Een omleiding via die weg loopt echter altijd via Rembrandtplein. Een omleiding van een zware Binnenringtramlijn door de binnenstad is vanwege de lage snelheid en de grotere kans op verstoringen eigenlijk ondoenlijk. En om dat toch zo vlot en robuust mogelijk te faciliteren vraagt dat eigenlijk ook de aanleg van ontbrekende infrastructuur bij Artis en op het Rembrandtplein.

Een betere mogelijkheid blijkt het inrichten van een omleidingsroute via de Nieuwe Amstelbrug. Deze biedt bij de Wibautstraat een (wandel)overstap op de metro en maakt tevens beide bruggen onderling volledig uitwisselbaar. Toch kent ook deze route beperkingen door de concrete plannen de Van Woustraat in te richten voor dertig kilometer per uur, en door de aanwezigheid van capaciteit beperkend enkelspoor in de noordelijke Ferdinand Bolstraat. Deze worden voor lief genomen, gezien het belang van deze verbinding (waar overigens ook lijn 1 van kan profiteren).

In het kader van de Investerings Agenda Openbaar Vervoer wordt nu ingezet op uitvoering van de benodigde wissels voor de calamiteitenroute via de Nieuwe Amstelbrug. Wat nog een aandachtspunt vormt is de plaats in de verkeersregeling van deze route op het kruispunt met de Van Woustraat, en het elektrisch bedienbaar maken van de daarvoor in aanmerking komende wissels.

5. Conclusies

De methode 'Van globale netwerkanalyse naar lokale bijstuurmaatregelen' is een functionele stap naar het inzichtelijk maken van zowel de robuustheid van stedelijke railnetwerken en de waarde en impact van bijstuurinfra. De effecten van verstoringen op het prestatievermogen van het netwerk zijn inzichtelijk gemaakt. Tevens is een beschouwing gemaakt van de aanwezige, overbodige en/of juist afwezige bijsturingsinfrastructuur. De gecombineerde analyses levert op strategisch niveau een waardevolle bijdrage aan discussies tot aanleg of sanering van railinfra ten behoeve van bijsturing. Daarnaast kan de methode op tactisch niveau leiden tot een bijsturing-handboek voor de verkeersleiding in geval van verstoringen. Dit kan zover gaan dat bij een ongeplande verstoring overgeschakeld kan worden naar een geprogrammeerd scenario, wat vooral grote voordelen voor informatievoorziening heeft.

Om verdere stappen te nemen naar een detailniveau waarbij de resultaten van deze methode met een monetarisatie stap meegenomen kunnen worden in business cases en MKBA, zijn er verschillende aanbevelingen. Het is van waarde om verschillende zaken die nu nog slechts in de lokale analyse meegenomen worden ook al mee te nemen in de globale analyse. Denk hierbij aan het meenemen van de (on)mogelijkheden en beperkingen van omleidingen bij verschillende verstoringsscenario's op het gebied van railinfra, invloed van autoverkeer, verkeersregelingen en type wissels. Ook wordt aanbevolen om gericht te kijken naar de frequentie, locatie en zwaarte van voorkomende verstoringen bij het definiëren van door te rekenen scenario's (Cats et al., 2016). Als hierbij tegelijkertijd ter discussie staande infrastructuur en mogelijke bijsturing in de

vorm van alternatief vervoer meegenomen wordt, kan de waarde nog concreter worden bepaald.

Referenties

Cats, O., Yap, M., & van Oort, N. (2016). Exposing the role of exposure: Public transport network risk analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 88, 1-14.

Koppenol, G. J. (2016). Robustness of public transportation networks: The effect of capacity reductions at the link-level. Technische Universiteit Delft

Stadsregio Amsterdam (2013). Investeringsagenda OV – Investeren in een bereikbare regio. <https://www.investeringsagenda-stadsregioamsterdam.nl/investeringsagenda-ov/home-ov>

Cats, O., Koppenol, G. J., & Warnier, M. (2017). Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: Application for public transport systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 544-553.