Het effect van treinpassages over spooroverwegen op bereikbaarheid voor wegverkeer

Ontwikkeling van een generieke en objectieve rekenmethode

Luuk Brederode
Goudappel Coffeng BV
Lbrederode@goudappel.nl

Kees Larooij
Prorail
Kees.larooij@prorail.nl

Frank Aalbers
Goudappel Coffeng BV
Faalbers@goudappel.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
22 en 23 november 2012, Amsterdam

Samenvatting

*Het effect van treinpassages ove spoor-overwegen op bereikbaarheid voor wegverkee*r

Het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS) betekent meer treinen en (dus?) meer verkeershinder door gesloten spoorwegovergangen. Het objectief en integer omgaan met hinderbeleving vormt een belangrijk onderdeel van de voorbereiding van PHS door Prorail. Dit paper beschrijft (de ontwikkeling van) een methodiek waarmee de impact van PHS op het gebied van bereikbaarheid op het onderliggend wegennet (overwegen) kan worden gemeten en vergeleken. De methodiek is objectief, uniform en transparant; bovendien zijn resultaten reproduceerbaar en is de methodiek snel toepasbaar op grote aantallen overwegen, zonder dat daarbij uitgebreid veldwerk noodzakelijk is.

De eerste stap was het operationaliseren van het begrip bereikbaarheid, het te hanteren beoordelingskader en het vertalen naar een eerste versie van de methode. Hierbij bleek dat een uitgebreide beschouwing van bereikbaarheid niet noodzakelijk is voor een eerste beoordeling. We kozen voor gemiddelde wachttijden (c.q. verliestijden) als hinderindicator voor gemotoriseerd verkeer en wachttijden (en stopkans) als hinderindicator voor langzaam verkeer. Vervolgens is de methode getoetst op een twintigtal pilot-overwegen. Hieruit blijkt dat de methode goed in staat is om waargenomen dichtligtijden en wachtrijlengten te reproduceren. Daarnaast leidde de pilot studie tot aanscherping van de methode en twee belangrijke inzichten:

- Vuistregels of het lineair doortrekken van dichtligtijden leiden tot verkeerde resultaten. Deze aanpak gaat voorbij aan o.a. het effect van gelijktijdig passeren van twee of meer treinen tijdens één overwegsluiting.
- Spreiding rondom vertrek en aankomsttijden op stations blijkt een significante factor te zijn omdat een scenario uitgaande van het exacte BasisUurPatroon (de reguliere dienstregeling) veelal niet het gemiddelde beeld beschrijft. Door spreiding rondom het BasisUurPatroon mee te nemen in de berekening ontstaat tevens inzicht in de bandbreedte van uitkomsten.

De methode is een doorontwikkeling van de bestaande 'Wachtrijtool bij Overwegen', die uitgaat van de verkeersstroomtheorie volgens Newell. De methode maakt gebruik van de intensiteiten op de weg en dichtligtijden van de overweg. De (toekomstige) intensiteiten worden ontleend uit de NSL monitoringstool, verrijkt met verkeersmodeldata. De (toekomstige) dichtligtijden worden berekend op basis van bestanden die de geometrie van het spoorwegennet en een BasisUurPatroon beschrijven.

Momenteel wordt de methode ingezet in een studie naar de effecten van PHS op het traject 'Goederenroute Oost Nederland'. Mogelijk zullen meer studies volgen die de effecten op de overige PHS corridors in kaart brengen.

1. Inleiding

Sinds 2009 is ProRail bezig met de voorbereidende werkzaamheden om te komen tot invoering van het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS). In de basis komt dit programma neer op het vaker laten rijden van personentreinen en anders routeren van goederentreinen. PHS is een samenwerkingsverband van IenM (opdrachtgever), spoorvervoerders en ProRail (beheerder van de infrastructuur). IenM is de concessieverlener aan zowel NS als aan ProRail en als zodanig is zij dus opdrachtgever van zowel de benodigde infrastructuuraanpassingen als van de vervoersaanpassingen. ProRail treedt in veel gevallen op als gedelegeerd opdrachtgever voor de infrastructuuraanpassingen.

Zowel IenM als ProRail stellen de waarborging van de veiligheid op de eerste plaats. Daarnaast wordt het objectief en integer omgaan met hinderbeleving als zeer belangrijk ervaren. Het gehele programma is immers bedoeld om maatschappelijke doelen te dienen. Het past hierbij om evenwichtig om te gaan met onbedoelde bijeffecten. Hinder voor het gelijkvloers kruisende wegverkeer is een voorbeeld van zo'n onbedoeld bijeffect. Het integer zoeken naar evenwicht leidt tot de vraag hoe de impact van PHS op het onderliggend wegennet op het gebied van bereikbaarheid objectief kan worden gemeten en vergeleken. Deze vraag leidde tot een opdracht aan Goudappel Coffeng om dit te onderzoeken.

Als het gaat om de effecten op bereikbaarheid zijn spooroverwegen een aandachtspunt: er was behoefte aan een methodiek om bereikbaarheidseffecten van alle spooroverwegen beïnvloed door PHS te kunnen vergelijken. Aangezien spooroverwegen effect hebben op de bereikbaarheid op wegvakken van een groot aantal verschillende wegbeheerders, werden de volgende eisen gesteld aan de methodiek:

- objectief;
- uniform (dus vergelijkbaar);
- transparant en begrijpelijk;
- reproduceerbaar.

De wens is tevens geuit om te komen tot systematiek die relatief gemakkelijk toepasbaar is op een groter aantal overwegen (zonder dat er uitbreid veldwerk noodzakelijk is) en waarmee regionaal dan wel landelijk een (tussen overwegen onderling) richtinggevend beeld kan worden verkregen van de optredende 'bereikbaarheidsissues' bij wijziging van treinfrequenties en verkeersintensiteiten. Indien daartoe aanleiding is kunnen deze dan lokaal nader worden beschouwd.

De opdracht heeft uiteindelijk betrekking op de circa 400 overwegen op de PHS corridors. Samen met ProRail kijkt IenM uiteraard verder dan deze overwegen; er liggen immers meer dan twee duizend overwegen in Nederland. In eerste instantie is de systematiek toegepast op een pilot van 20 overwegen (bij het schrijven van dit stuk lopen er inmiddels studies op meerdere overwegen).

2. Beoordelingssytematiek overwegsituaties

2.1 Bestaande beoordelingskaders

Er bestaan op dit moment geen wettelijke normen of heldere beleidskaders ten aanzien van het beoordelen van gesloten overwegen op het aspect bereikbaarheid. Wel komen in discussies vaak de volgende toetsingsvariabelen naar voren:

- de intensiteit van het kruisende autoverkeer;
- de dichtligtijd van de betreffende overweg (veelal per uur);
- de intensiteit/de frequentie van het treinverkeer;
- de aard en omvang van het goederenvervoer;
- de bereikbaarheid (aanrijdtijden) voor hulpdiensten.

Aanvullend wordt soms gewezen op optredende 'netwerkeffecten'. Hierbij kan het bijvoorbeeld gaan om de afstand tot de eerste (ongelijkvloerse) kruising als volwaardig alternatief in het netwerk.

Omdat deze toetsingsvariabelen meetbaar en objectief zijn, wordt veelal gesteld dat deze prima bruikbaar zijn om situaties mee te beschouwen. In de praktijk valt dit tegen. Dit komt met name omdat niet duidelijk wordt aan de hand waarvan bepaald wordt wanneer een situatie goed, matig of slecht is. De beoordeling van overwegsituaties op bereikbaarheid bij wijzigende treinfrequenties en verkeersintensiteiten is dus min of meer nog steeds onontgonnen terrein.

2.2 Toegepaste beoordelingssystemathiek

De beoordelingsystematiek voor overwegsituaties die in het onderzoek is toegepast, kenmerkt zich door het doorlopen van een viertal inventariserende stappen en één beoordelende stap:

- stap 1: Inventariseren WEG: functie, vormgeving (inclusief afstand tot zijwegen) en gebruik van de weg (door gemotoriseerd verkeer, fietsers, voetgangers, busverkeer en hulpdiensten)
- stap 2: Inventariseren SPOOR: gebruik van het spoor door personen- en goederentreinen (huidig en toekomstig) en kenmerken van sluitingen (dichtligtijd per uur en gemiddelde dichtligtijd per sluiting; voor rekenmethode zie hoofdstuk 3);
- stap 3: Inventariseren NETWERK: netwerkoverwegingen m.b.t. weg en spoor (beschikbaarheid ongelijkvloerse alternatieven en het gebruik van de weg als U-route);
- stap 4: Bepalen EFFECTEN: bepalen kwaliteitsniveau verkeersafwikkeling en wachtrijkenmerken (aan de hand van/naar analogie van beoordelingcriteria die worden toegepast bij verkeersregelinstallaties,zoals gemiddelde en maximale wachtrijlengte, mate van overstaan, gemiddelde wachttijd, stopkans en verliestijden; voor rekenmethode zie hoofdstuk 3);
- stap 5: Beoordelen SITUATIE: beoordeling overwegsituatie.

2.3 Conclusies beoordelingssystemathiek

Uit het onderzoek en de pilot met toepassing de beoordelingssystematiek op 20 overwegen is gebleken dat een uitgebreide beschouwing van overwegen op de diverse onderscheiden aspecten c.q. variabelen en toetsing aan criteria veel werk is. De

belangrijkste conclusie is echter dat een eerste beoordeling aan de hand van berekeningen van huidige en toekomstige gemiddelde wacht- en verliestijden voor zowel gemotoriseerd verkeer als langzaam verkeer (eventueel aangevuld met de mate van 'overstaan' en gegevens over wachtrijlengtes) een goed eerste beeld geeft van het te verwachten kwaliteitsniveau van verkeersafwikkeling op de betreffende overweg. Omdat deze relatief snel berekend kunnen worden door het onderling met elkaar in verband brengen van (toekomstige) dichtligtijden met gegevens over de (toekomstige) kruisende intensiteit van het gemotoriseerde verkeer, zijn het zeer efficiënte indicatoren voor de totale bereikbaarheidssituatie.

Voor wat betreft het verkrijgen van toekomstige dichtligtijden is het wel van belang dat deze niet worden ingeschat met vuistregels of globale berekeningen, maar dat ze (nauwkeurig) berekend worden. Huidige dichtligtijden kunnen namelijk niet 'zomaar' rechtlijnig worden opgehoogd bij hogere treinfrequenties. Onder andere effecten van het gelijktijdig passeren van twee treinen tijdens een overwegsluiting zouden hierbij bijvoorbeeld volledig verloren gaan. Tevens is het van belang om rekening te houden met speling rondom vertrek- en aankomsttijden van treinen en het effect hiervan op (toekomstige) dichtligtijden. In navolgend hoofdstuk wordt nader op de berekeningsmethodiek ingegaan.

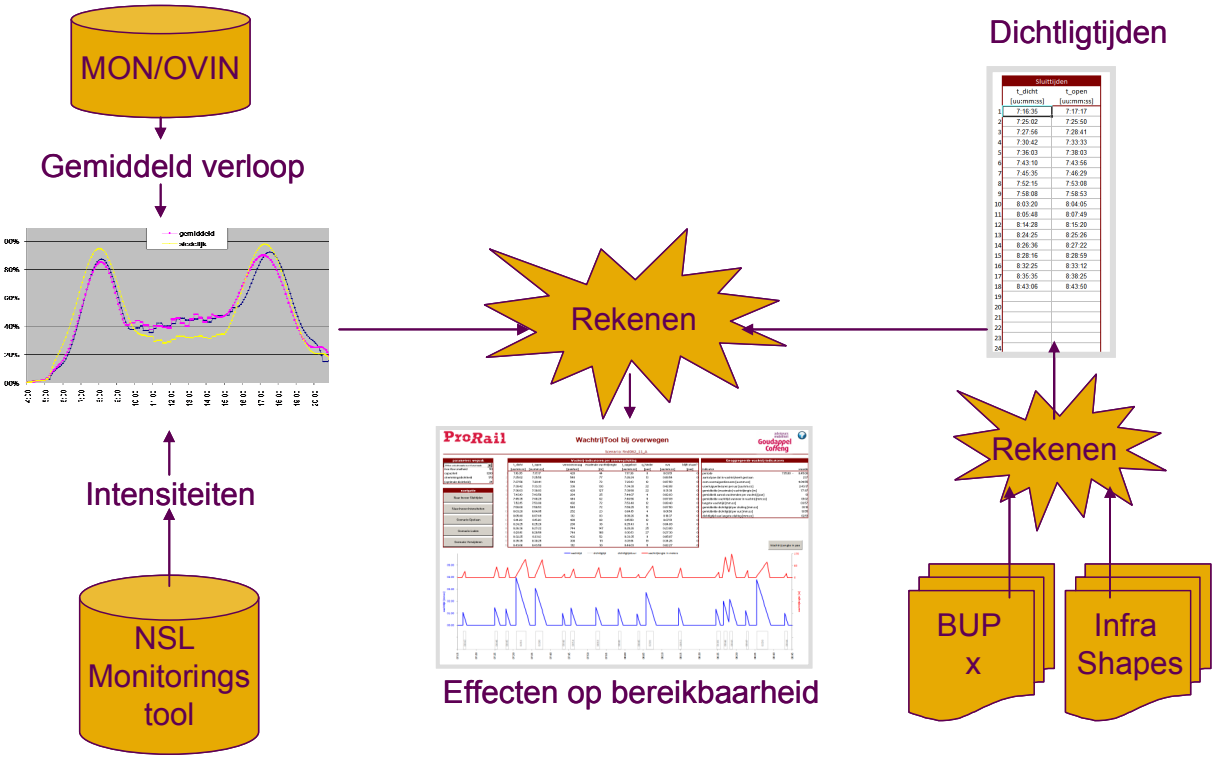
3. Rekenmethode effecten op bereikbaarheid

In paragraaf 2.3 zijn indicatoren genoemd die gebruikt worden om het kwaliteitsniveau van de afwikkeling van het verkeer op de kruisende weg te beschrijven. Het gaat hierbij om:

- de gemiddelde dichtligtijd (relevant voor langzaam verkeer);
- de gemiddelde wachttijd (relevant voor gemotoriseerd verkeer);
- het aantal voertuigen dat moet 'overstaan' (relevant voor gemotoriseerd verkeer);
- de maximale wachtrijlengte (relevant voor verkeer stroomopwaarts).

3.1 Raamwerk: WachtrijTool bij Overwegen 2.0

Om genoemde indicatoren te kunnen bepalen is gebruik gemaakt van de WachtrijTool bij Overwegen 2.0 (hierna 'Wachtrijtool 2.0'). Deze Excel-tool is een doorontwikkeling van de WachtrijTool bij Overwegen 1.0 waarmee, gegeven de intensiteiten op de weg en dichtligtijden van de overweg, (o.a.) de gemiddelde wachttijd, het aantal voertuigen dat moet 'overstaan' en de maximale wachtrijlengte berekend kan worden. In versie 1.0 moesten de dichtligtijden per sluiting en de wegintensiteiten per 5 minuten bekend zijn (op basis van veldwerk) en handmatig worden ingevoerd. In Wachtrijtool 2.0 is veldwerk en het handmatig invoeren van intensiteiten en dichtligtijden niet meer nodig. Intensiteiten kunnen automatisch worden opgehaald uit een landelijke database (de NSL monitoringstool verrijkt met modeldata voor het onderliggend wegennet) en dichtligtijden kunnen worden berekend op basis van bestanden die de geometrie van het spoorwegennet en een BasisUurPatroon (de reguliere dienstregeling) beschrijven. In Figuur 1 is de relatie tussen de verschillende databronnen, rekenstappen en uitvoer van WachtrijTool 2.0 weergegeven.



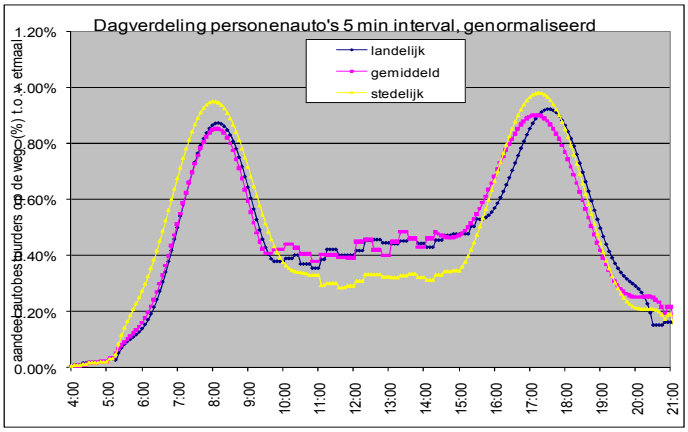
Figuur 1: workflow binnen WachtrijTool 2.0

3.2 Bepalen wegintensiteiten

Voor het bepalen van de waarde van de wachtrij-indicatoren gebruikt WachtrijTool 2.0 intensiteiten per vijf minuten, uitgesplitst naar licht, middelzwaar en zwaar verkeer. Wanneer beschikbaar kunnen vijf minuuts-intensiteitswaarden voor de te beschouwen studieperiode handmatig worden ingevoerd. De te beschouwen periode wordt door de gebruiker gedefinieerd en dient minimaal 10 minuten en maximaal één etmaal te duren.

Wanneer er geen veldwerk gedaan is of er een scenario in de toekomst moet worden doorgerekend kan gebruik gemaakt worden van intensiteiten uit een database gebaseerd op de NSL monitoringstool (http://www.nsl-monitoring.nl/), verrijkt met modeldata van Goudappel Coffeng BV. Deze etmaalwaarden worden vertaald naar 5 minuutswaarden voor alle intervallen binnen de te beschouwen periode. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een gemiddeld verkeersaanbodprofiel over de dag afgeleid uit het MON 2004-2009. Er zijn drie typen verkeersaanbodprofielen beschikbaar, variërend naar stedelijkheidsgraad (Figuur 2).

Het resultaat is een lijst van intensiteiten (in pae's) per vijf minuten voor de te beschouwen periode die als invoer dient voor de wachtrijberekeningen (paragraaf 3.4).



Figuur 2: verkeersaanbodprofielen o.b.v. MON 2004-2009

3.3 Bepalen dichtligtijden

In situaties waarin geen dichtligtijden gemeten zijn of kunnen worden (bijvoorbeeld in het geval van een toekomstscenario) kunnen deze berekend worden op basis van bestanden die de spoorinfrastructuur beschrijven en een basisuurpatroon. Deze functionaliteit werkt als volgt:

- Basisuurpatroon selecteren: de gebruiker kiest het te gebruiken BasisUuurPatroon (BUP). Een BUP is een bestand waarin de reguliere dienstregeling wordt beschreven. Standaard zijn de basisuurpatronen van 2012 en 2020PHS beschikbaar, maar toekomstige BUPs kunnen eenvoudig worden toegevoegd.
- Overweg selecteren: de gebruiker kiest de te analyseren overweg uit alle beschikbare overwegen in de landelijke database. De tool haalt vervolgens de afstand van de overweg tot alle relevante dienstregelpunten[1] op tezamen met alle treinen die de overweg passeren. Dienstregelpunten zijn relevant wanneer ze:
    - worden aangedaan door één van de treinen die ook de overweg passeren; en
    - het eerste dienstregelpunt zijn waar een trein voor of na een overweg halteert; of
    - tussen de overweg en het eerste dienstregelpunt waar een trein voor of na een overweg halteert liggen
- Tijdstippen ophalen uit BUP: voor alle treinen die de overweg passeren wordt voor de relevante drp's halteer- of doortochttijden opgehaald.
- Doortochttijden berekenen: aan- en afmeldingtijdstippen per trein worden berekend.
    - Op basis van de vertrek- en aankomsttijden op de relevante dienstregelpunten en de maximale optrekversnelling en afremvertraging per treintype worden x-t diagrammen geconstrueerd van alle treinen die de overweg passeren.
    - Op basis van de geconstrueerde x-t diagrammen, de toegestane snelheid op het beschouwde spoordeel, de vooraankondigingstijd van de overweg en de afkondigingstijd van de overweg wordt het tijdstip van aankondiging en het tijdstip van afmelding per trein bepaald.
- Doortochten combineren:
    - Op basis van de aankondigings- en afmeldingstijden van alle treinen wordt gekeken of er overlap tussen treinen plaats vind. Wanneer het aankondingstijdstip van een trein eerder is dan het afmeldingstijdstip van een

[1] Dienstregelpunten zijn locaties op een lijn waarnaar verwezen wordt in BUPs. Veelal zijn dit stations, maar ook splitsingspunten, bruggen of andere punten langs een lijn kunnen getypeerd worden als dienstregelpunt.

trein die eerder de overweg passeerde wordt de overwegsluiting gecombineerd. Dat wil zeggen dat er één sluiting plaats heeft met het aanmeldingstijdstip van de eerste trein en het afmeldingstijdstip van de laatste trein.

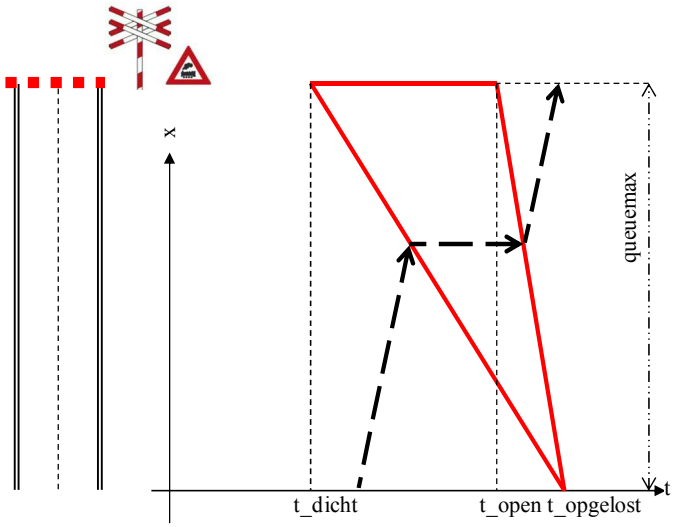
- De aan- en afmeldingtijdstippen zijn de tijdstippen waarop de spoorwegbomen beginnen te dalen respectievelijk volledig geopend zijn. Dit zijn feitelijk dus dichtligtijden.

Met behulp van deze functionaliteit kunnen voor elk basisuurpatroon de verwachte dichtligtijden worden bepaald. Deze dichtligtijden kunnen samen met de 5 minuten intensiteiten worden gebruikt om wachtrij-indicatoren te bepalen.

3.4 Berekenen wachtrijen wegverkeer

Het berekenen van wachtrijen vindt plaats op basis van verkeersstroomtheorie volgens Newell (1993), welke uitgaat van een driehoekig fundamenteel diagram voor de relatie tussen intensiteit, dichtheid en snelheid. Het principe van Newell's verkeersstroomtheorie in de context van een spoorwegovergang wordt uitgelegd aan de hand van Figuur 3. Aan de rechterzijde is een tijd-wegdiagram weergegeven, met horizontaal de tijd en verticaal de afstand, in feite de weg en de overweg zoals links afgebeeld.

Op tijdstip t_dicht gaat de overgang dicht en op tijdstip t_open gaat de overgang weer open. Vanaf t_dicht gaat zich een wachtrij vormen die naar achteren wordt opgebouwd. Nadat de overweg opengaat, bouwt de wachtrij aan de voorkant af. De stippellijn laat een voertuig zien dat aansluit in de wachtrij, een tijdje stilstaat en vervolgens weer kan wegrijden. Voertuigen die aankomen na t_open krijgen nog te maken met een wachtrij die nog niet helemaal is opgelost. Dit is pas het geval na tijdstip t_opgelost.
De snelheid waarmee de wachtrij zich opbouwt hangt samen met de intensiteit, de dichtheid onder free flow omstandigheden en de stremmingsdichtheid van het wegvak. Hoe hoger de intensiteit of hoe lager de stremmingsdichtheid, hoe sneller de wachtrij zich opbouwt. De snelheid waarmee de wachtrij aan de voorkant oplost hangt samen met de wegvakcapaciteit, de dichtheid onder optimale omstandigheden (wanneer de intensiteit gelijk is aan de wegvakcapaciteit en de snelheid gelijk aan free flow snelheid) en de stremmingsdichtheid.



Figuur 3: Wachtrij berekening conform verkeersstroomtheorie

Met behulp van Newell's verkeersstroomtheorie kan voor elk moment binnen de beschouwde periode bepaald worden of er een wachtrij staat en zo ja, hoe lang deze is. WachtrijTool 2.0 levert standaard per sluiting de maximale wachtrijlengte, het aantal gehinderde voertuigen, het aantal voertuigverliesuren en het aantal voertuigen dat 'moet overstaan'. Door te aggregeren over alle sluitingen in de beschouwde periode kunnen tal van bereikbaarheidsindicatoren worden afgeleid. Voorbeelden hiervan zijn de langste wachttijd, de gemiddelde wachttijd, het aantal voertuigen dat te maken heeft gehad met een wachtrij, het gemiddeld aantal wachtenden per wachtrij, de langste dichtligtijd, etc.

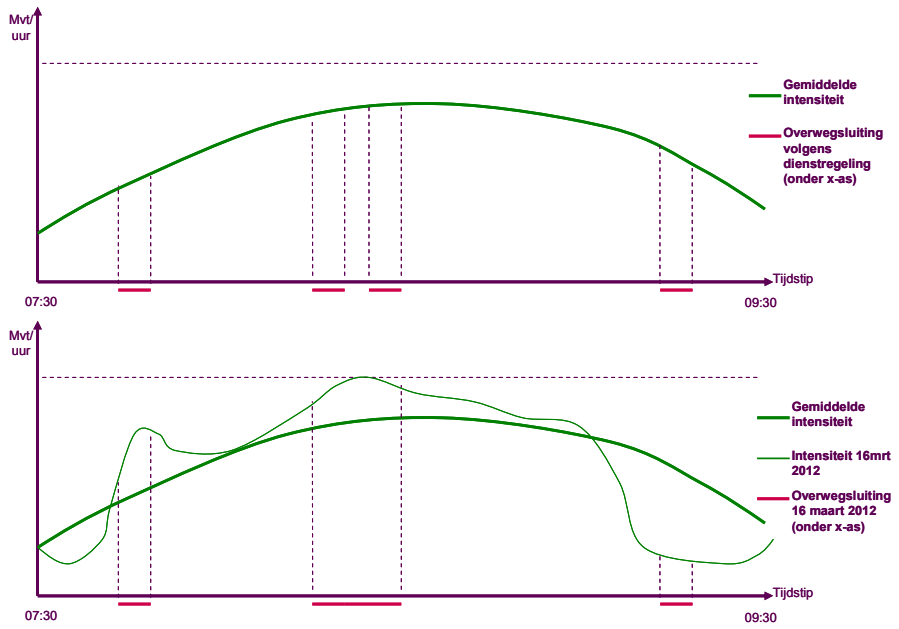
4. Stochastiek

Om de systematiek en rekenmethodiek zoals beschreven in hoofdstukken 2 en 3 te testen op bruikbaarheid is een pilotstudie gedaan waarbij een twintigtal overwegen is geanalyseerd wat de effecten van het invoeren van het PHS op de bereikbaarheid zijn (Aalbers, 2012).

Bij het interpreteren van de resultaten bleek dat op negen van de twintig beschouwde overwegen in het 2020 PHS-scenario meer treinen gecombineerd (tegelijkertijd) de overweg passeren dan in 2012 het geval is. Wanneer de dienstregeling van 2020 PHS dusdanig gunstig is dat treinen op exact hetzelfde moment langs een overweg komen, kan daarbij de gemiddelde dichtligtijd per sluiting gelijk blijven of zelfs dalen. Natuurlijk is het zo dat wanneer de dienstregeling geïntensiveerd wordt (zoals in de situatie 2020-PHS), de kans ook groter is dat treinen gecombineerd de overweg kunnen passeren. Het berekende effect kan zich dus ook in werkelijkheid voordoen. Waar echter geen rekening mee gehouden is, is dat er in werkelijkheid spreiding bestaat in de uitvoering van de dienstregeling: treinen vertrekken en komen niet altijd aan op exact het tijdstip volgens de dienstregeling. Afhankelijk van de gerealiseerde vertrek- en aankomsttijden kunnen treinen die volgens dienstregeling gelijktijdig een overweg zouden passeren, alsnog individueel langs de betreffende overweg komen.

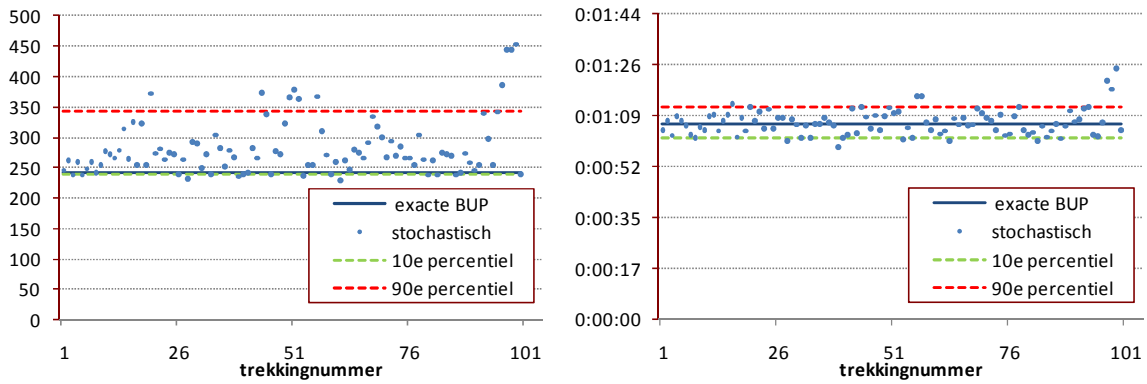
Dit effect wordt geïllustreerd in Figuur 4. Stel dat er, conform de dienstregeling (bovenste grafiek), in de tweede en derde sluiting meerdere treinen tegelijk passeren. De gerealiseerde sluitingen op een bepaalde dag laten echter zien dat door spreiding in vertrek- en aankomsttijden de tweede en derde sluiting in elkaar overlopen (onderste grafiek). Dit resulteert in minder sluitingen, maar een langere gemiddelde dichtligtijd. De hoeveelheid verkeer dat te maken krijgt met een gesloten overweg (de oppervlakten tussen de verticale stippellijntjes), en dus de hinder voor het wegverkeer is hierdoor groter.

Naast spreiding in vertrek- en aankomsttijden van treinen is er ook variatie in intensiteiten van het wegverkeer. In de onderste grafiek wordt dit geïllustreerd ('intensiteit 16 maart 2012'). Afhankelijk van het wel of niet samenvallen van een piek in de intensiteit en overwegsluitingen beïnvloedt deze variatie ook de hoeveelheid verkeer dat te maken krijgt met een gesloten overweg en daarmee de hinder voor het wegverkeer.



Figuur 4: gemiddelde (boven) vs. gerealiseerde (onder) intensiteit en dichtligtijden (fictief voorbeeld)

Concluderend: bij een toename van het aantal treinen in een dienstregeling neemt niet alleen de kans dat treinen gelijktijdig de overweg passeren toe. Ook de daarmee samenhangende kans op langere dichtligtijden en/of meer sluitingen als gevolg van spreiding in vertrek- en aankomsttijden neemt toe. Om laatstgenoemd effect mee te nemen is WachtrijTool 2.0 uitgebreid zodat deze kan rekenen met stochastische vertrek- en aankomsttijden. Hierdoor is de uitvoer (sluittijden en bereikbaarheidsindicatoren) ook stochastisch van aard en worden bereikbaarheidsindicatoren beschreven met een waarde 'exact volgens BUP' en een 10^{e} en 90^{e} percentielwaarde, aangevuld met een grafische weergave van alle getrokken waarden. De meerwaarde hiervan wordt duidelijk uit Figuur 5 waaruit duidelijk wordt dat voor de beschouwde overweg uitgaan van het exacte BUP niet leidt tot de gemiddelde situatie voor wat betreft de maximale wachtrijlengten, terwijl uitgaan van het exacte BUP wel redelijk goed leidt tot de gemiddelde situatie voor wat betreft de gemiddelde wachttijd wanneer in wachtrij.



Figuur 5: voorbeelden van stochastische resultaten: max wachtrijlengte [m] (links) en gemiddelde wachttijd wanneer in wachtrij [u:mm:ss] (rechts)

NB: de variatie in intensiteiten wordt vooralsnog niet meegenomen omdat dit een beduidend minder groot effect heeft op wachtrijen dan de variatie in sluittijden.

4.1 Verdelingen rondom vertrek en aankomsttijdstip

Uit literatuur blijkt dat de verdeling rondom vertrek en aankomsttijdstip in Nederland het beste beschreven kan worden door een verschoven lognormale of Weibull-verdeling (Yuan, 2006). Aangezien een Weibull-verdeling met de juiste parameters de lognormale verdeling kan benaderen (Liu en Willey, 2008) is vooralsnog alleen de Weibull-verdeling geïmplementeerd in WachtrijTool 2.0.

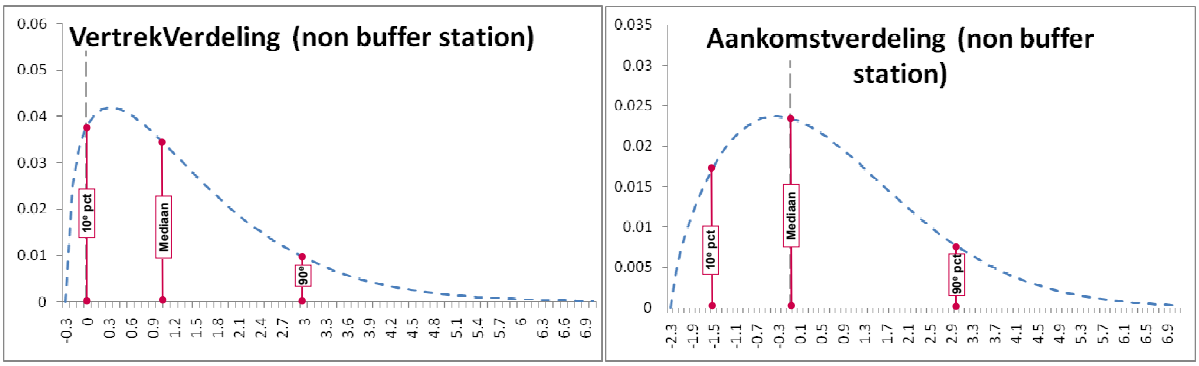
Prorail meet voortdurend de passagetijden op stations. Op basis van data op een aantal representatieve routes concludeert het prestatie analysebureau van ProRail verkeersleiding het volgende:

- De bandbreedte rondom het vertrektijdstip van een typisch station waar geen buffertijd in de dienstregeling is opgenomen kent een mediaan van +1 minuut, waarbij het 10^{e} percentiel op het exacte tijdstip volgens de dienstregeling en het 90ste percentiel op +3 minuten ligt.
- De verdeling rondom het aankomsttijdstip van een typisch station kent een mediaan op het exacte tijdstip volgens de dienstregeling, waarbij het 10^{e} percentiel op -1.5 minuten en het 90ste percentiel op +3 minuten ligt.
- De bandbreedte rondom het vertrektijd- en aankomsttijdstip van een typisch station waar wel buffertijd in de dienstregeling is opgenomen is beduidend minder breed.

Op basis van deze conclusies zijn verschoven Weibull-verdelingen geschat voor vertrek en aankomst op een non-buffer en bufferstation. Dit resulteert in de volgende verdelingen:

- Vertrek (non buffer): Weibull-verdeling met k=1.3, lambda = 1.75, shift = -0.25
- Aankomst (non buffer): Weibull-verdeling met k = 1.7, lambda = 3.3, shift = -2.3
- Vertrek (buffer): Weibull-verdeling met k = 1.1, lambda = 0.7, shift = 0.1
- Aankomst (buffer): Weibull-verdeling met k = 1.6, lambda = 1.5, shift = -1.05

In Figuur 6 zijn de verdelingen voor non-bufferstations grafisch weergegeven.



Figuur 6: vertrekverdeling (links) en aankomstverdeling (rechts) op non bufferstations

4.2 Implementatie van verdelingen rondom vertrek en aankomsttijdstip

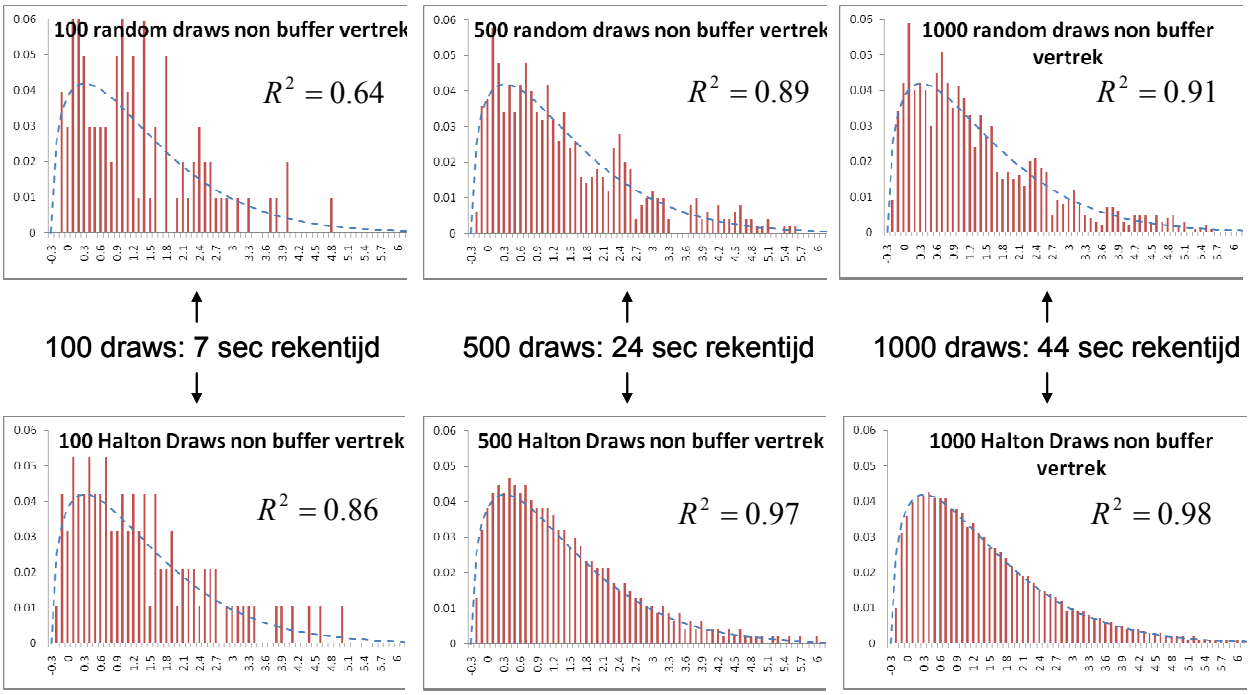
Het toevoegen van stochastiek aan vertrek en aankomsttijdstippen van treinen op dienstregelpunten heeft gevolgen voor zowel het bepalen van dichtligtijden (zoals eerder beschreven in paragraaf 3.3) als het berekenen van wachtrijen (eerder beschreven in paragraaf 3.4).

Bij het bepalen van dichtligtijden wordt op dezelfde wijze als beschreven in paragraaf 3.3 een basisuurpatroon en overweg geselecteerd en relevante tijdstippen opgehaald. De gebruiker heeft vervolgens de mogelijkheid om aan te geven dat er gebruik gemaakt moet worden van een N aantal stochastische tijden, waarna de te gebruiken parameters van de WeiBull-verdelingen moeten worden opgegeven (default worden de parameters uit paragraaf 4.1 gebruikt). Het verschil met een doorrekening zonder stochastiek is dat het berekenen van doortochttijden en het combineren tot sluittijden niet één maar N keer wordt uitgevoerd. Voor elke doorrekening wordt gebruik gemaakt van een andere trekking uit de verdeling rondom vertrek en aankomsttijden.

Halton-reeksen

Om met zo min mogelijk trekkingen de verdeling zo goed mogelijk te benaderen wordt gebruik gemaakt van pseudowillekeurige trekkingen op basis van Halton-reeksen (Halton, 1960). Pseudowillekeurig trekken op basis van Halton reeksen is een manier om efficiënt een uniforme verdeling te benaderen. Van de waarde uit de Halton reeks wordt vervolgens de inverse cumulatieve waarde van de opgegeven Weibull-verdeling berekend. Op deze manier worden de waarden in de Halton-reeks (welke een uniforme verdeling benaderd) vertaald naar de opgegeven Weibull-verdeling. In Figuur 7 zijn histogrammen van trekkingen samen met de te benaderen verdeling weergegeven. Te zien is dat trekkingen op basis van Halton-reeksen beduidend sneller een goede benadering van de verdeling realiseren (zie R^2 waarden in de grafieken).

Naast het efficiëntievoordeel dat het gebruik van Halton-reeksen met zich meebrengt zorgt het gebruik van vaste reeksen ook voor reproduceerbaarheid van resultaten. Hierdoor levert WachtrijTool 2.0 ook bij gebruik van stochastische tijden reproduceerbare resultaten (één van de eisen die in hoofdstuk 1 aan de methodiek zijn gesteld).



Figuur 7: Effect van het gebruik van Halton-reeksen voor benadering van de verdeling rondom het vertrektijdstip op non buffer stations

Aanname van niet verstoorde dienstregeling
Een andere eis die gesteld is aan de methodiek (hoofdstuk 1) is dat resultaten vergelijkbaar zijn. Om overwegen op verschillende locaties zuiver te vergelijken worden alleen situaties beschouwd waarin de dienstregeling niet verstoord is. Er is sprake van een niet verstoorde dienstregeling wanneer een vertraagde trein geen invloed heeft op de punctualiteit van andere treinen.

Geoperationaliseerd in WachtrijTool 2.0 betekent dit dat de gebruikte Halton-reeks die voor de *N* doorrekeningen wordt gebruikt voor een bepaalde trein geen correlatie mag hebben met de Halton-reeks gebruikt voor elke willekeurige andere trein die over de beschouwde overweg rijdt. Dit is het geval wanneer (Train, 2009):

- bij het genereren van Halton-reeksen voor elke trein een ander basis priemgetal wordt gebruikt;
- bij het toepassen de eerste x elementen van alle Halton-reeksen niet gebruikt worden, waarbij x gelijk staat aan het hoogste basis priemgetal gebruikt voor het genereren van de Halton-reeksen.

Omdat het niet realistisch is dat een trein met een zeer grote vertraging geen effect heeft op de punctualiteit van andere treinen worden extremen uit de trekkingen gehaald. Dit houdt in dat waarden uit Halton-reeksen hoger dan het 90ste percentiel worden begrensd (dus vervangen door 0.9). Prorail hanteert bij het analyseren van passagetijden dezelfde begrenzing aan de bovenkant; waarnemingen hierbuiten worden beschouwd als niet regulier. Daarnaast hanteert Prorail een begrenzing aan de onderkant van 0.1, deze is niet overgenomen aangezien de linkerkant van de Weibull-verdeling geen horizontale assymptoot kent en daardoor extreem lage waarden nooit getrokken kunnen worden.

Voortplanting van vertragingen per individuele trein
Doordat per trein telkens van dezelfde Halton-reeks gebruik gemaakt wordt zijn vertrek en aankomsttijden van een zelfde trein perfect gecorreleerd. Anders gezegd: wanneer in de doorrekening op basis van trekking *n* een trein vertrekt op het 90ste percentiel van de Weibull-verdeling voor vertrektijden zal dezelfde trein ook op het 90ste percentiel van de Weibull-verdeling voor aankomsttijden aankomen. Omdat de Weibull-verdeling voor aankomsttijden wat verder naar links ligt in vergelijking met de verdeling voor vertrektijden (zie Figuur 6) wordt het effect dat treinen vertraging kunnen inlopen door harder te rijden tussen stations meegenomen in het model. Hierbij wordt wel altijd rekening gehouden met de maximale optrekversnelling en afremvertraging van het treintype en de maximumsnelheid op het traject (zie paragraaf 3.3).

Dit betekent dat wanneer een trein volgens trekking *n* uit de aankomstverdeling vroeger aan zou moeten komen dan dat fysiek mogelijk is gegeven het vertrektijdstip volgens dezelfde trekking *n* de vertrektijd leidend is en de aankomsttijd na de getrokken aankomsttijd aangehouden wordt. Wanneer er geen buffertijd op het aankomststation is, of wanneer de buffertijd op het aankomststation kleiner is dan de vertraging plus de minimale halteringstijd kan ook de getrokken vertrektijd vanuit dit volgende station te vroeg in de tijd liggen. Dit vertrektijdstip zal dan ook door naar achteren geschoven worden.

Dit heeft tot gevolg dat op trajecten waarbij er maar weinig compensatieruimte in het BUP zit (op trajecten en/of op stations) de kans groter is dat treinen vertraging opbouwen over meerdere stations. Dit effect doet zich in de werkelijkheid ook voor en wordt op deze manier gemodelleerd.

5. Toepassing rekenmethode en systematiek

Voor een twintigtal overwegen (door ProRail geselecteerd op grond van aantal treinpassages in het PHS scenario, wegtype en -gebruik en verspreid over geheel Nederland) is een pilotstudie uitgevoerd om de rekenmethode te testen en valideren. Hiervoor is veldwerk gedaan waarbij op alle twintig overwegen gedurende de ochtendspitsperioide het aantal treinpassages, de sluittijden en de intensiteiten per vijf minuten en de wachtrijlengten per sluiting zijn gemeten. Vervolgens is de capaciteit van de wegvakken en zijn vooraankondigings- en afmeldingstijden van de overwegen ingevoerd. Op basis van deze invoer bleek WachtrijTool 2.0 goed in staat om de waargenomen dichtligtijden en wachtrijlengtes over de beschouwde periode te reproduceren. Vervolgens is de beoordelingssystematiek (hoofdstuk 2) toegepast door op basis van toekomstige intensiteiten uit verkeersmodellen, en het BUP van het PHS scenario 2020 te kijken naar de effecten op bereikbaarheid van het wegverkeer. Geconcludeerd werd dat er op 4 overwegen belangrijke aandachtspunten te benoemen waren. Op 4 andere overwegen werden minder belangrijke aandachtspunten gevonden en op 10 van de 20 overwegen zijn geen problemen op het gebied van verkeersafwikkeling te verwachten. Over twee overwegen kon, aan de hand van de gebruikte systematiek, geen uitspraak worden gedaan omdat de overweg gekoppeld was aan een verkeersregelinstallatie. Hierdoor was het niet mogelijk om wachtrijen direct toe te kennen aan sluittijden van overwegen. Voor een meer uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Aalbers (2012).

6. Conclusie en vervolg

De beschreven rekenmethode maakt het mogelijk om op een snelle manier objectieve bereikbaarheidsindicatoren te bepalen voor alle overwegen in Nederland (voor zowel de huidige als een toekomstige situatie). Hierbij zijn slechts in beperkte mate aannames gedaan en wordt optimaal gebruik gemaakt van vigerende bronnen voor wegintensiteiten en spoordienstregelingen. De methodiek en gebruikte databronnen zorgen ervoor dat uitkomsten vergelijkbaar en reproduceerbaar zijn.

De beschreven beoordelingssystemathiek is een methode om snel te identificeren of een overweg nadere analyse behoeft. Doordat geen impliciete weging van indicatoren plaats vind is de systematiek transparant en begrijpelijk.

Tijdens de pilotstudie op 20 overwegen werd duidelijk dat de toename van spreiding rondom sluittijden als gevolg van de toename van het aantal treinbewegingen een effect is dat niet kan worden genegeerd. Daarom is de aanname dat treinen altijd exact vertrekken en aankomen op station op het tijdstip volgens de dienstregeling losgelaten en is stochastiek geïntroduceerd (hoofdstuk 4, inmiddels geimplementeerd).

Inmiddels loopt een studie naar de effect van de PHS goederenroute Oost Nederland waarbij gebruik gemaakt wordt van de rekenmethode en beoordelingssystematiek. Voor

deze studie wordt waar mogelijk het effect van stop-door systemen[2] toegevoegd aan de rekenmethodiek. Afhankelijk van de ervaringen die tijdens studies worden opgedaan kan de rekenmethodiek verder verbeterd of uitgebreid worden. De volgende verbeteringen zijn daarbij denkbaar:

- betere vulling van goederenslots op basis van historische data (nu wordt een percentage aangenomen);
- betere verdelingen rondom vertrek en aankomsttijdstip op basis van lokale historische data (nu: twee verdelingen voor vertrek en twee verdelingen voor aankomst, geldig voor heel Nederland);
- het automatisch bepalen van de maatgevende periode door het verloop van wachtrijen gedurende 24 uur uit te rekenen en vervolgens automatisch de maatgevende periode te selecteren (nu wordt een maatgevende periode aangenomen);
- verbeteringen in het gebruik van aankondigingstijd per overweg op basis van ontwerpvoorschrift overwegen (benodigde data nu niet beschikbaar voor alle overwegen).

Referenties

Aalbers, F.A. (2012) Beoordeling overwegsituaties op bereikbaarheid bij wijzigende treinfrequenties en verkeersintensiteiten, *Rapportage Goudappel Coffeng BV in opdracht van ProRail*.

Halton, J.H. (1960) On the efficiency of certain quasi-random sequences of points in evaluating multi-dimensional integrals. *Numerische Mathematik*, 2 (1960) pp. 84–90.

Liu en Willey (2008) The approximate equations between the Weibull and lognormal distributions by using MRR, *presented at the international conference on business and information 2008 in Seoul, South Korea*

Newell, G.F. (1993) A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part I: General theory, Part II: Queuing at freeway bottlenecks, Part III: Multi-destination flows, *Transportation Research Part* B, Vol. 27, pp. 281-313.

Train, K.E. (2009) Discrete Choice Methods with Simulation – second edition, *University of California, Berkeley and Nera – Cambridge University Press*

Yuan, J (2006) Stochastic modelling of train delay propagation in stations, *Trail Thesis Series no T2006/6, The Netherlands Trail Research School*.

[2] Een stop-door systeem zorgt ervoor dat spoorbomen niet sluitein voor een trein die op een station stil staat.