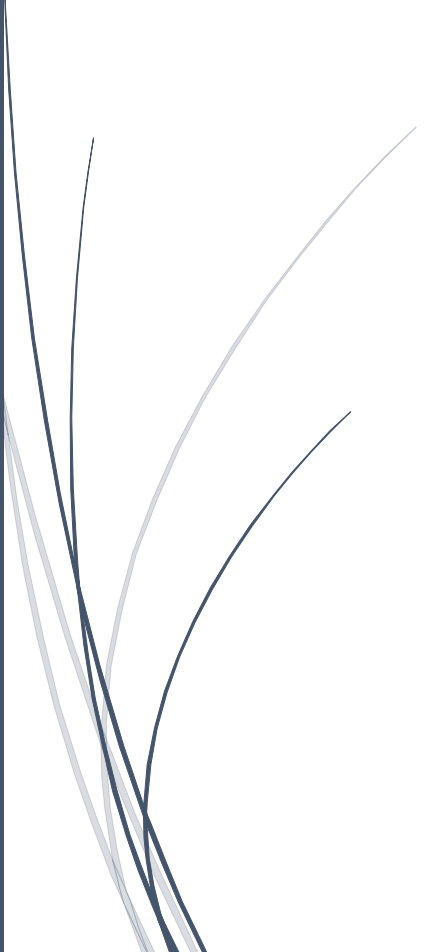


7 juli 2016

Verwachte vertraging berekenen bij afhankelijke processen

Toepassing voor OV-SAAL

Bachelor eindopdracht Civiele Techniek

An abstract graphic consisting of several thin, curved lines in shades of blue and grey, originating from the bottom left and curving upwards and to the right.

Rogier Simons
Universiteit Twente – s1496204
Ing. Rail bv.

<i>Onderzoek</i>	<i>Vertraging berekenen bij afhankelijke processen</i>
<i>Studie</i>	<i>Civiele Techniek: Bachelor eindopdracht</i>
<i>Datum</i>	<i>1-juli-2016</i>

<i>Auteur</i>	<i>Rogier Simons</i>
<i>S-nummer</i>	<i>s1496204</i>
<i>E-mail</i>	<i>r.j.simons@student.utwente.nl</i>

<i>Onderwijsinstelling</i>	<i>University of Twente</i>
<i>UT-begeleider</i>	<i>Ing. K. van Zuilekom</i>

<i>Organisatie</i>	<i>Ing. Rail bv. - Netherlands</i>
<i>Begeleider</i>	<i>Ing. A. van den Doel</i>
<i>Adres</i>	<i>Ruwkampweg 11E Postbus 3004 5203 DA 's-Hertogenbosch Nederland ingenieursbureau@ing-rail.nl +31 (0) 73 623 77 28 http://www.ing-rail.nl/nl/</i>

1. Abstract

Om bij grote bouwprojecten, zoals OV-SAAL, met vele onderlinge afhankelijkheden van tevoren te kunnen voorspellen wat de verwachte vertraging is, wordt in dit verslag een model ontwikkeld waarmee op voorhand van een project een inschatting gemaakt kan worden van de vertraging. De belangrijkste factor hierbij is de inschatting voor specifieke processen wat de kans is op te vroeg klaar zijn, op tijd klaar zijn, of vertraging oplopen. Het resultaat is dat een keten van processen eigenlijk zeer weinig kans heeft om op tijd klaar te zijn, en dat in de meeste tijd van de gevallen er een aantal uur vertraging wordt opgelopen.

Inhoudsopgave:

1. Abstract	1
2. Introductie	3
2.1. Overzicht OV-SAAL	3
2.2. Afhankelijkheid	6
3. Onderzoeksvraag.....	7
3.1. Probleemstelling.....	7
3.2. Onderzoeksvraag.....	7
3.3. Beoogd product.....	7
4. Literatuuronderzoek.....	8
4.1. “Critical path method”	8
4.2. Belangrijkste factoren voor vertragingen.....	9
5. Conceptueel model	10
5.1. Opzet model	10
5.2. Conceptueel model	11
6. Model	12
6.1. Invoerwaarden	12
6.2. Stappenplan model	14
6.3. Aantal replicaties.....	15
6.4. Gevoeligheidsanalyse	16
7. Uitkomst model.....	17
8. Toepassing op OV-SAAL.....	19
9. Conclusie	23
10. Discussie	25
11. Referenties	27
12. Bijlagen	29
Bijlage 1: OpTijd waarden voor OV-SAAL	29
Bijlage 2: MATLAB-model.....	30

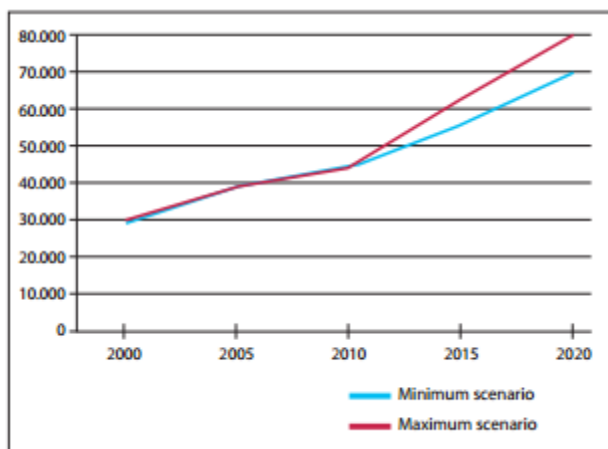
2. Introductie

Het ingenieursbedrijf Ing. Rail bv. is door ProRail gevraagd als projectondersteuner bij het project OV-SAAL, een project waarbij in week 33/34 het spoor rond Almere een week lang buitendienst wordt gesteld. De taak houdt in dat Ing. Rail bv. onder meer de processen en risico's gaat beheersen tijdens de buitendienststelling, naast taken als het verlenen van professionele assistentie aan de projectleiders en de kwaliteit van het project te waarborgen (Löring, 2009).

Een onderdeel van het beheersen van risico's, is om op voorhand te voorspellen welke reeksen van processen een grote kans hebben om vertraging op te lopen en/of wat de impact van vertraging van een proces is op de rest van het project. Om hier een handvat voor te geven, wordt in dit verslag getracht een wiskundig model te ontwikkelen waarmee op basis van een inschatting van de kans op tijdigheid van een proces, de verwachte vertraging van een reeks processen en uiteindelijk het totale proces kan worden berekend. Eerst zal het model aan de hand van twaalf onderling afhankelijke ontwikkeld worden en daarna wordt het teruggekoppeld aan het project OV-SAAL.

2.1. Overzicht OV-SAAL

Om een gevoel te krijgen voor het project OV-SAAL wordt hieronder een kort overzicht gegeven van het gehele project OV-SAAL en de verschillende sub-projecten die plaatsvinden tijdens de buitendienststelling van het spoor rond Almere in de week 33/34.



Figuur 2.1.1: Verwachte aantal treinreizigers over de Hollandse Brug (ProRail, Tracébesluit traject Weesp - Lelystad)

De spoorverbinding tussen Schiphol, Amsterdam, Almere en Lelystad (afgekort: OV SAAL) is een zeer belangrijke schakel in het Nederlandse spoorwegnet. Mede door de aanleg van de Hanzelijn, de spoorverbinding tussen Lelystad en Zwolle, waardoor reizigers uit Dronten, Kampen en Zwolle ook eenvoudig Schiphol en Amsterdam kunnen bereiken, is het aantal reizigers op deze verbinding sterk gegroeid, zie Figuur 2.1.1. Veder worden voor de komende jaren nog meer reizigers verwacht door een toename van het aantal inwoners in deze provincie.

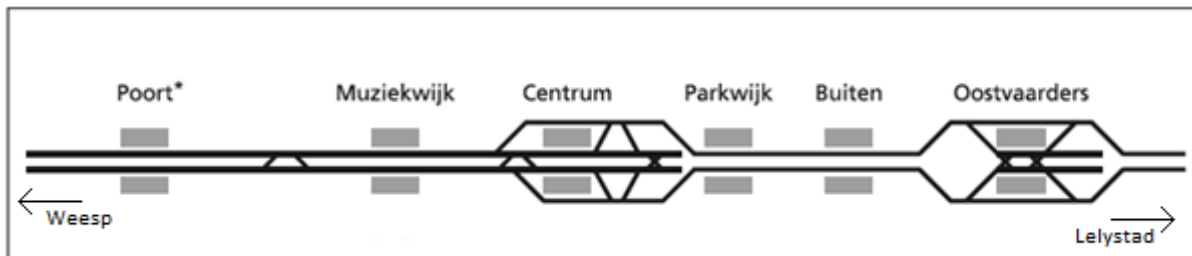
Het huidige spoor kan deze groei niet aan. Om alle toekomstige reizigers tijdig op hun bestemming te krijgen is het daarom nodig dat de spoorinfrastructuur wordt aangepast (ProRail, Folder OV SAAL, 2013). Hiervoor wordt de infrastructuur op korte termijn (2013-2016) en op de lange termijn (2020) aangepast. Op de korte termijn worden er een aantal slimme aanpassingen aan het spoor gedaan zodat het spoor efficiënter wordt gebruikt en er meer treinen per uur kunnen rijden. Op de lange termijn houdt dit een uitbreiding van het spoor, mogelijk verdubbeling, in en invoering van het beveiligingssysteem ERTMS, waardoor treinen dichter op elkaar kunnen volgen.

Een groot aantal van deze aanpassingen aan de infrastructuur voor de korte termijn vinden plaats in week 33/34 van dit jaar, 2016 in opdracht van ProRail. Hiervoor wordt het spoor vanaf Muiderberg Aansluiting tot aan Almere Oostvaarder/Lelystad een lang volledig buitendienst gesteld. Tijdens deze buitendienststelling vinden er drie sub-projecten plaats op verschillende locaties langs het spoor (Vermeer, 2016).

Sub-project

1:

Aan de oostzijde van station Almere Centrum worden twee keerspooren aangelegd om treinen te laten keren zonder op elkaar te laten hoeven wachten. Zo'n dergelijke constructie ligt reeds bij Almere Oostvaarders, zoals te zien is in onderstaand figuur, Figuur 2.1.2. De zwarte lijnen geven het spoor aan en de grijze blokken zijn de stations.



Figuur 2.1.2: Toekomstige situatie qua keerspooren rond Almere CS (Movares, 2015)

Verder wordt het spoor aan de westzijde van Almere Centrum aangepast met wisselverbindingen, zodat treinen elkaar makkelijker kunnen passeren. Ook worden de perrons bij het station verlengd met zo'n 70 meter, zodat daar langere treinen kunnen halteren.

Ten slotte vindt er tussen verschillende stations blokverdichting van de seinen plaats, zodat treinen dichter op elkaar kunnen rijden en het spoor beter benut kan worden, aangezien de aanleg van meer spoor kostbaar is en veel impact heeft op de omgeving (ProRail, Almere - Lelystad, 2015).

Sub-project

2:



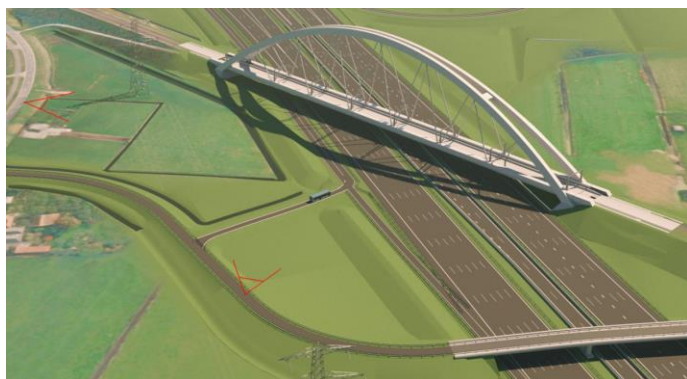
Figuur 2.1.3: Impressie geluidsschermen (ProRail, Folder OV SAAL, 2013)

De toename van het treinverkeer zorgt voor meer geluidsoverlast. Bij bebouwing dicht op het spoor kan dat veel impact op de omwonenden hebben. Om de geluidsbelasting binnen de wettelijke normen te houden, worden op verschillende locaties langs het spoor geluidsschermen langs en geluidsdempers op de rails geplaatst, waarvan een impressie te zien is in Figuur 2.1.3 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..** Dit moet leiden tot een afname van de geluidsoverlast voor omwonenden. Er zijn verschillende

hoogtes voor de geluidsschermen, voor de mate van overlast op een bepaalde plek. Ook worden op enkele stations in Almere perronoverkappingen uitgebreid en aangepast, zodat reizigers comfortabel kunnen wachten op de stations.

Sub-project 3:

Naast dat het spoor op de verbinding SAAL wordt aangepast, wordt ook de autosnelweg A1 tussen Amsterdam en Hilversum verbreed door Rijkswaterstaat om de groei over de snelweg aan te kunnen. Dit is geen onderdeel van de buitendienststelling, maar om deze verbreding van de snelweg mogelijk te maken, moet de huidige spoorbrug bij Muiderberg, die drie steunpilaren tussen de snelweg heeft staan, vervangen worden door een langere brug die de snelweg in één keer overspant (Figuur 2.1.4). Hiervoor is reeds een 255 meter lange boogbrug gerealiseerd, die ook al op tijdelijke landhoofden naast de huidige spoorbrug is geplaatst, en nog slechts op zijn plaats hoeft geschoven te worden. Dit verschuiven gaat gebeuren tijdens de buitendienststelling in week 33/34. (Rijkswaterstaat, 2015). Nadat de brug geplaatst is, moet het spoor over de brug nog aangesloten worden op het huidige tracé en moeten er veiligheidstests worden gedaan.



Figuur 2.1.4: Impressie spoorbrug over de A1 (Rijkswaterstaat, 2015)

2.2. Afhankelijkheid

Al deze sub-projecten zijn in opdracht van ProRail en zo gecoördineerd dat ze allemaal binnen één buitendienststelling van het spoor in de week 33/34 gebeuren. Naast dat al deze projecten binnen een en dezelfde week voltooid moeten zijn, hebben ze ook een grote onderlinge afhankelijkheid. Bijvoorbeeld het uiteindelijke testen van het spoor kan pas gebeuren als het spoor overal gereed is. Deze onderlinge afhankelijkheid kan een sterke negatieve invloed op het totale project hebben, dat wanneer een bepaald sub-project vertraging oploopt, dat ook de overige sub-projecten uitlopen en zo de planning van het gehele project in gedrang komt.

Het bedrijf Ing. Rail bv. is, zoals in de inleiding genoemd, projectondersteuner bij dit project om het project in de gaten te houden. Een onderdeel daarvan is om vooraf de planning van het project te bestuderen en mogelijke valkuilen op te sporen. Het vaststellen van dergelijke problemen is echter geen eenvoudige taak. Wat in dit verslag daarom geprobeerd wordt, is om een handvat te geven in de vorm van een wiskundig model waarmee voorspeld kan worden wat de kritieke processen zullen zijn en hoeveel vertraging een keten van processen wellicht gaat oplopen.

Het model wordt in meerdere stappen opgezet. Eerst wordt er een conceptueel model gemaakt. Vervolgens wordt het model uitgewerkt en opgezet voor een simpele reeks van processen. Ten slotte wordt het model zover mogelijk teruggekoppeld aan het project OV-SAAL.

3.1. Probleemstelling

Om controle te houden over een groot project met een uitgebreide planning zoals OV-SAAL, is het gewenst om vooraf een inschatting te kunnen maken welke ketens van processen mogelijk zullen uitlopen en van welke ketens vertraging een grote impact heeft op de rest van de processen.

3.2. Onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag komt voort uit de reeds genoemde probleemstelling: Is het mogelijk om bij een project met afhankelijkheid tussen processen vooraf te voorspellen hoeveel vertragingen er waarschijnlijk zal optreden?

Deze hoofdvraag kan daarvoor onderverdeeld worden in de volgens sub-vragen, eerst om inzicht te krijgen in hoe het model opgezet moet worden en daarna hoe het model toegepast kan worden:

1. Op welke manier kunnen processen aan elkaar gekoppeld zijn?
2. Wat voor factoren hebben invloed op de tijdigheid van een keten van processen?
3. Uit welke stappen bestaat het model?
4. Wat zijn de resultaten als het model teruggekoppeld wordt aan het project OV-SAAL?

3.3. Beoogd product

Het beoogde resultaat van het model is een gemiddelde verwachting van de vertraging en een verdeling van de mogelijk optredende vertraging. Een extra uitkomst is wellicht dat het kritieke pad van het project steeds geüpdatet wordt.

4.1. “Critical path method”

Een manier om de kritieke processen van het project te ontdekken, is door gebruik te maken van de “critical path method”. Dit is een veelgebruikte manier, bij bouwprojecten alsmede bij bedrijfsprocessen (Wikipedia, Critical path method, 2016). Zeker in grote projecten met honderden processen en afhankelijkheden, kan het helpen om de meest belangrijke processen te identificeren (Smartsheet, 2016)

Het kritieke pad is “die volgorde van activiteiten die de lengte van het project bepalen” (Makar, 2009). Deze volgorde is de kritieke volgorde die doorlopen moet worden om te zorgen dat het project op tijd af komt. Vertragingen op dit pad hebben direct invloed op de eindtijd van het project. Ook de consequenties van vertragingen kunnen op deze manier gevisualiseerd worden, omdat het project in verschillende processen is opgedeeld en gevisualiseerd in een flowchart of een Gantt chart (Smartsheet, 2016).

Voordelen van de methode zijn dat grote projecten op deze wijze overzichtelijk worden gemaakt, afhankelijkheden worden gevisualiseerd en de impact van wijzigingen in het proces kunnen zichtbaar worden gemaakt. Alhoewel er niet heel veel nadelen te zijn, is het goed om bewust te zijn van de sommige nadelen: als er honderden taken en afhankelijkheden zijn, kan de methode alsnog onoverzichtelijk worden (Sharma, 2015). Daarnaast moeten alle processen bekend zijn om een correct diagram te kunnen maken (Scheduling, 2016).

Volgens Smartsheet zijn er zes stappen om het kritieke pad te vinden (Smartsheet, 2016):

1. Het specificeren van alle activiteiten

Elk proces van het project wordt gedefinieerd, maar alleen de *higher-level* processen zijn van belang voor de methode, omdat het anders te gecompliceerd wordt. De eerste stap daarom is om de hoofd-processen te onderscheiden en deze daarna onder te verdelen in lagere niveaus.

2. Stel de afhankelijkheden vast

Er zijn verschillende afhankelijkheden mogelijk. Sommige processen kunnen pas beginnen of eindigen als een ander proces gestart of voltooid is. Daarom kunnen er bij elk proces drie vragen worden gesteld:

1. Welke processen moeten er voorafgaand aan dit proces plaatsvinden?
2. Welke processen moeten gelijktijdig met dit proces eindigen?
3. Welke processen kunnen beginnen als dit proces voltooid is?

3. Teken het netwerk-diagram

Afhankelijk van de in de vorige stap bepaalde afhankelijkheden kan het netwerk diagram worden gevisualiseerd. Dit is een representatie van de volgorde waarin de activiteiten moeten gebeuren.

4. Bepaal de benodigde tijd per activiteit

De tijd die benodigd is om een proces af te ronden moet geschat worden om het netwerk diagram in te vullen. Dit kan afhankelijk van het soort projecten in minuten, uren of zelfs dagen zijn.

5. Bepaal het kritieke pad

Het kritieke pad is nu de qua tijd langste reeks van activiteiten die achter elkaar moeten gebeuren. Op dit pad is het niet gewenst om vertragingen op te lopen, omdat dan de benodigde

tijd sowieso verlengd wordt. Voor paden die geen onderdeel zijn van het kritieke pad geldt dat vertraging op dit pad niet meteen betekent dat het gehele project uitloopt.

6. **Update het kritieke pad diagram om de vooruitgang te zien**

Tijdens de voortgang van het project is de werkelijke benodigde tijd van elk proces en eventuele vertraging bekend. Daarom is het belangrijk om tijdens het project dit te monitoren en het diagram te updaten.

Gebruik van deze literatuur:

De huidige planning van het project is een soortgelijke planning, waarin ook afhankelijkheden zichtbaar zijn. Daarom is deze literatuur nuttig om een goed idee te krijgen van hoe zo'n planning opgebouwd is, en waar de kritieke punten zich kunnen bevinden.

4.2. Belangrijkste factoren voor vertragingen

Er kan veel literatuur gevonden op mogelijk oorzaken van vertragingen in bouwprojecten. Dit omdat een zeer groot aantal van de bouwprojecten over de hele wereld vertragingen oploopt en hun oorspronkelijke tijd en budget overschrijden. Het is goed om mogelijke oorzaken te bestuderen om van tevoren bewust zijn over de mogelijke oorzaken. Een onderzoek (Odeh & Battaineh, 2002) heeft uit een enquête gevonden dat er 28 vaak-ondervonden oorzaken zijn, die onder te verdelen zijn in 8 categorieën, die gerankt zijn volgens de deelnemers van de enquête:

1. Cliënt gerelateerde factoren, zoals financiën en betaling van voltooid werk, inmenging van de eigenaar, trage besluitvorming en onrealistische lengtes van uitvoering;
2. Aannemer gerelateerde factoren, zoals het beheer van de bouwplaats, onjuiste planning, onvoldoende ervaring als aannemer, fouten tijdens de bouw, onjuiste wijze van bouwen en vertragingen door onderaannemers;
3. Consultant gerelateerde factoren als contractmanagement, goedkeuring van tekeningen, kwaliteitsbeheersing, en lange wachttijden voor het goedkeuren van tests en inspecties;
4. Materiaal factoren zoals kwaliteit en beschikbaarheid;
5. Arbeiders en materieel factoren zoals arbeidersaanbod, productiviteit en de beschikbaarheid en het falen van materieel;
6. Contractuele factoren zoals veranderde bestellingen, en fouten en tegenstrijdigheden in het bestek;
7. Contractuele relatie factoren zoals geschillen en onderhandelingen tijdens de bouw, ongepaste organisatiestructuur en gebrek aan communicatie;
8. Externe factoren zoals het weer, veranderingen in de regelgeving, problemen met omwonenden en omstandigheden ter plaatse;

Gebruik van deze literatuur:

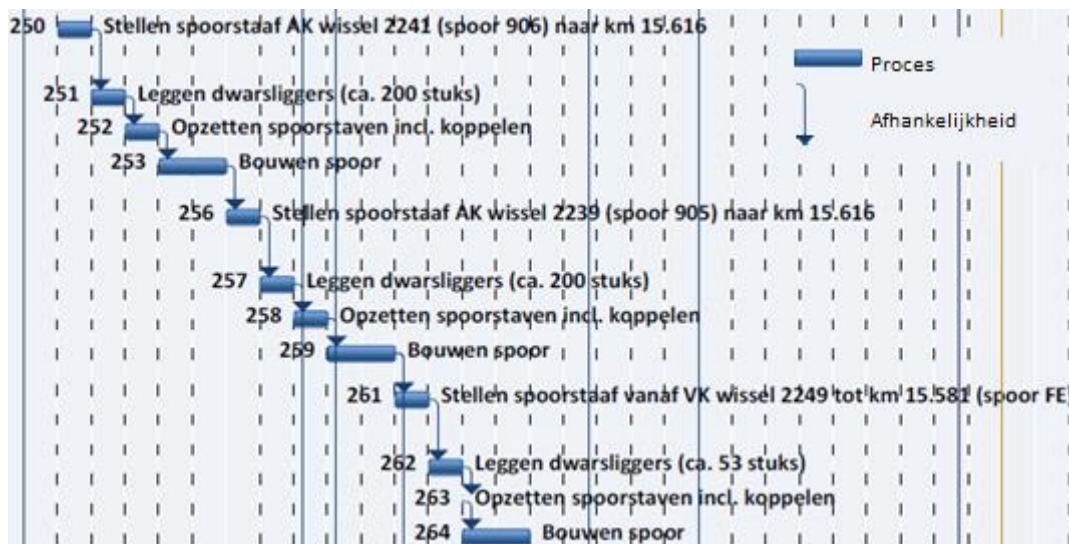
Deze categorieën geven een indicatie wat voor processen kans hebben om vertraging op te lopen, waardoor de tijdigheid van processen beter ingeschat kan worden.

5.1. Opzet model

Zoals we in het vorige hoofdstuk hebben kunnen lezen bij de literatuurstudie over de ‘critical path method’, zijn onderling afhankelijke processen, processen die een relatie hebben waardoor het ene proces pas kan beginnen als het voorgaande proces voltooid is. Het is mogelijk dat deze processen direct opéenvolgend zijn of dat hier een tijdsbuffer tussen zit (Wikipedia, Padafhankelijkheid, 2015).

Als de processen elkaar direct opvolgen, heeft vertraging in het eerste proces tot gevolg dat ook het tweede proces vertraagd is. Bij een buffer tussen de processen kan vertraging in het eerste proces daarentegen nog opgevangen worden, mits de vertraging niet groter is dan de buffer.

In het project OV-SAAL zijn er ongeveer 1000 van beide soorten relaties, met en zonder buffer tussen de processen, waarbij de ketens vaak meer dan tien of wel vijftig processen direct achter elkaar kunnen zijn. Daarnaast zijn er veel relaties tussen verschillende ketens, waardoor vertragingen dus een extra grote impact kunnen hebben. In onderstaand figuur, Figuur 5.1.1, is zo’n keten te zien. Deze keten van processen dient als voorbeeld voor het bouwen en testen van het model.



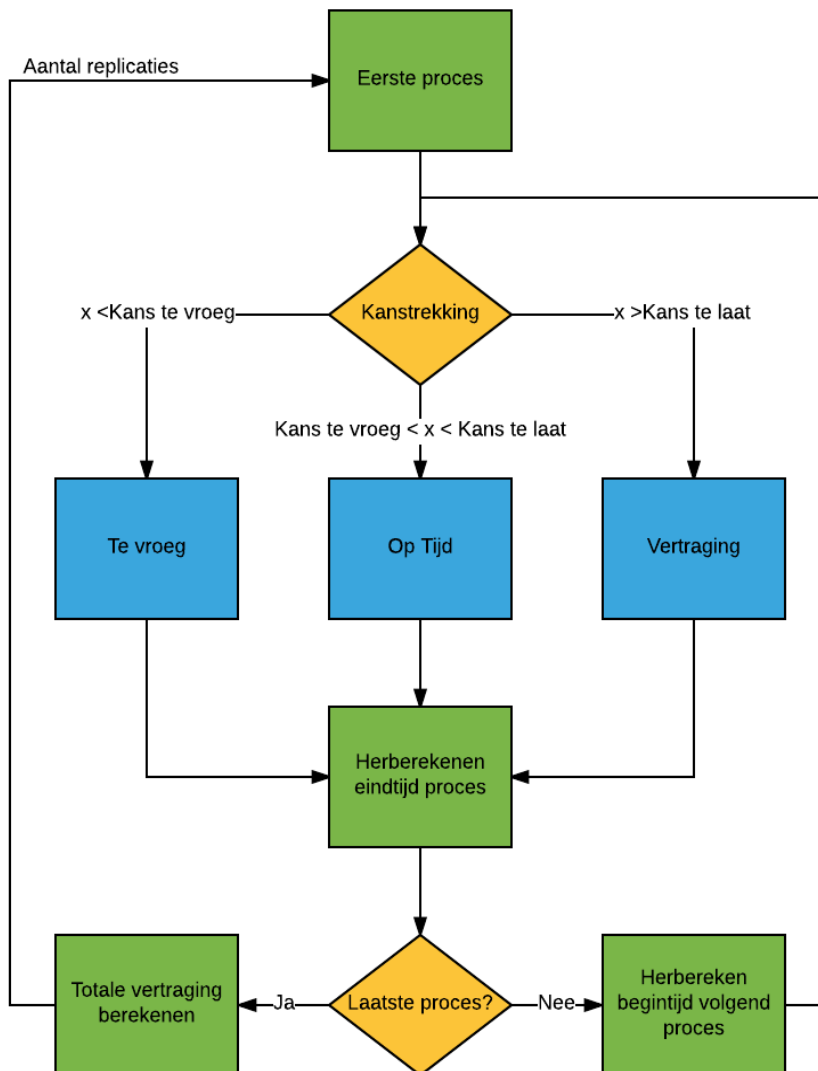
Figuur 5.1.1: Voorbeeld van serie van afhankelijkheden in OV-SAAL, waarmee het model opgezet zal worden

Het doel daarom is om voorafgaand aan de uitvoering van het project een verwachting te kunnen geven welke reeks processen een grote kans heeft om uit te lopen en wat de gevolgen zijn van vertragingen in bepaalde kern-processen, aan de hand van een vooraf ingeschatte kans dat een project op tijd is. Op deze manier kunnen de processen en reeksen van processen gevonden worden die of een grote kans hebben om uit te lopen of van welke het uitlopen een grote impact heeft op andere processen. Op deze processen kan dan extra belang worden gelegd door de betreffende aannemers om te zorgen dat ze tijdig verlopen.

5.2. Conceptueel model

De belangrijkste factor van het model is de vooraf ingeschatte kans dat een proces te vroeg klaar is, op tijd is, of vertraging oploopt. Hieromheen wordt het model gebouwd.

Conceptueel gezien ziet het model eruit als in onderstaand figuur, Figuur 5.2.1. Van het eerste proces wordt aan de hand van kansrekening bepaald of het proces vroeger klaar is dan gepland, op tijd is afgelopen of vertraging heeft opgelopen. Hierop wordt de eindtijd van het proces aangepast. Mocht hier een proces op volgen, dan wordt de begintijd van dat proces ook aangepast en wordt er weer bepaald hoe lang dit proces zal duren. Mocht dit proces het laatste proces zijn, dan wordt de totale vertraging berekend. Dit wordt voor een aantal replicaties gedaan om betrouwbare gegevens te krijgen. Het einddoel is om vooraf in te kunnen schatten wat de gemiddelde verwachting vertraging is dit het gehele proces zal oplopen.



Figuur 5.2.1: Conceptueel model

Nu het conceptueel model gemaakt is, kan het daadwerkelijke model ontwikkeld worden. Eerst wordt er een basismodel gemaakt van de twaalf processen in Figuur 5.1.1. Daarna wordt dit model zo ver mogelijk uitgewerkt voor een deel van het project OV-SAAL.

Eerst worden de invoerwaarden van het model uitgelegd, daarna de opzet van het model, vervolgens wordt de hoeveelheid benodigde replicaties bepaald die er minimaal gedaan moeten worden en wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Ten slotte worden de resultaten van het model besproken.

6.1. Invoerwaarden

Er zijn een aantal invoerwaarden voor het model. Deze zijn afzonderlijk beschreven hieronder:

Lengte van het proces

Elk proces in het gehele project heeft een eigen lengte, zoals bepaald door de aannemers die het proces gaan uitvoeren. Hoe langer een proces is, hoe groter de kans is dat dit proces mogelijk vertraging oploopt. In het basismodel is dit een lengte van 4 tijdseenheden.

Kans op tijdigheid

De eerste invoerwaarde is de waarschijnlijkheid dat een proces op tijd is, of anders gezegd: hoe groot de kans is dat een proces vertraging oploopt. Dit kan voor elk proces afzonderlijk anders zijn, afhankelijk van de lengte, complexiteit en benodigd materieel, materiaal en mankracht.

Voorbeeld hierbij is dat een proces waarbij graafwerk betrokken is, een relatief grote kans heeft om uit te lopen omdat men hierbij niet altijd weet wat er wordt aangetroffen in de bodem. Hetzelfde geldt voor processen rondom het instellen van het seinwezen, omdat deze instellingen heel gevoelig zijn. Een proces als het aanbrengen van ballast of spoor heeft daarentegen een kleine kans om uit te lopen vanwege de voorspelbaarheid van deze processen.

De eerste aanname is dat een proces in 80% van de gevallen op tijd is, en daarmee in 20% van de gevallen dus een vertraging oploopt. Dit zal gebruikt worden bij het basismodel. In het uitgebreide model zullen verscheidene processen een afwijkende waarde hebben.

In “Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.” is een overzicht genomen van processen tijdens OV-SAAL die van deze 80% afwijken, en dus meer of minder kans hebben om op tijd te zijn, met een verduidelijking van de reden (Doel, 2016).

Kans op een bepaalde vertraging

Een andere aanname is de vertraging die een proces exact uitloopt, waarbij de uiterste vertraging een verdubbeling van de procestijd is, en dat er geen grotere vertraging kan worden opgelopen dus dan de verdubbeling van de lengte.

Tussen de 80% (geen vertraging) en de 100% (verdubbeling van de lengte van het proces) wordt een lineair verband aangenomen voor de vertraging. In de werkelijkheid zal er waarschijnlijk meer een verband zijn als in (het rechterdeel van) Figuur 6.1.1, waarbij vooral de kans op kleinere vertragingen groter is. Gevolg hiervan is dat er vaker grotere vertragingen optreden. Het werkelijke verband is daarentegen nog steeds een onzekere factor, waarover geen verdere literatuur is gevonden, waardoor de exacte vorm niet te verifiëren is.

6.2. Stappenplan model

De opbouw van het model bestaat uit verschillende stappen:

1. Initiëren van de oorspronkelijke begin- en eindtijden van de processen;
2. Per proces de mogelijke vertraging uitrekenen;
3. De begintijd van het aansluitende proces aanpassen;
4. Stap 2 en 3 herhalen voor de gehele keten;
5. De totale vertraging berekenen;
6. Stap 2 tot 5 een aantal keer herhalen om een gemiddelde verwachting van de vertraging te kunnen bepalen;

Stap 1:

In deze stap worden de processen zoals ze van tevoren bepaald zijn in het project overgenomen. Dit kan er bijvoorbeeld zo uit zien:

Proces 1 = [0 , 4], Proces 2 = [4 , 8], Proces 3 = [8 , 12];

Stap 2:

Hier wordt de kans gedefinieerd dat een proces op tijd is. De standaard aanname hierbij is 80% (0,8), maar dit kan per proces verschillen. Omdat een proces een bepaalde kans heeft om op tijd te zijn, wordt er een trekking gedaan uit de getallen tussen 0 en 1. Is dit getal gelijk aan of kleiner dan 0,8, dan is de vertraging van het desbetreffende proces 0. Mocht dit getal groter zijn dan 0,8, dan is de vertraging het percentage van de lengte van het proces, zoals aangegeven in Figuur 6.1.1.

Stap 3:

Mocht proces 1 in bovenstaande stap een vertraging van 1 hebben opgelopen, dan kan proces 2 pas beginnen op tijdstip 5 en niet op tijdstip 4. Daarom wordt in deze stap de starttijd van het volgende proces opnieuw ingesteld.

Stap 4:

Stap 2 en 3 worden herhaald voor alle processen totdat de vertraging van alle processen bekend is.

Stap 5:

Omdat van alle processen de vertraging bekend is, is ook van het laatste proces de uiteindelijke eindtijd bekend.

Ten voorbeeld: proces 1 heeft een vertraging van 1 opgelopen en proces 2 en 3 allebei geen vertraging, dan is de eindtijd van proces 3 op tijdstip 13 in plaats van tijdstip 12. De totale vertraging is in dit geval dus één tijdseenheid.

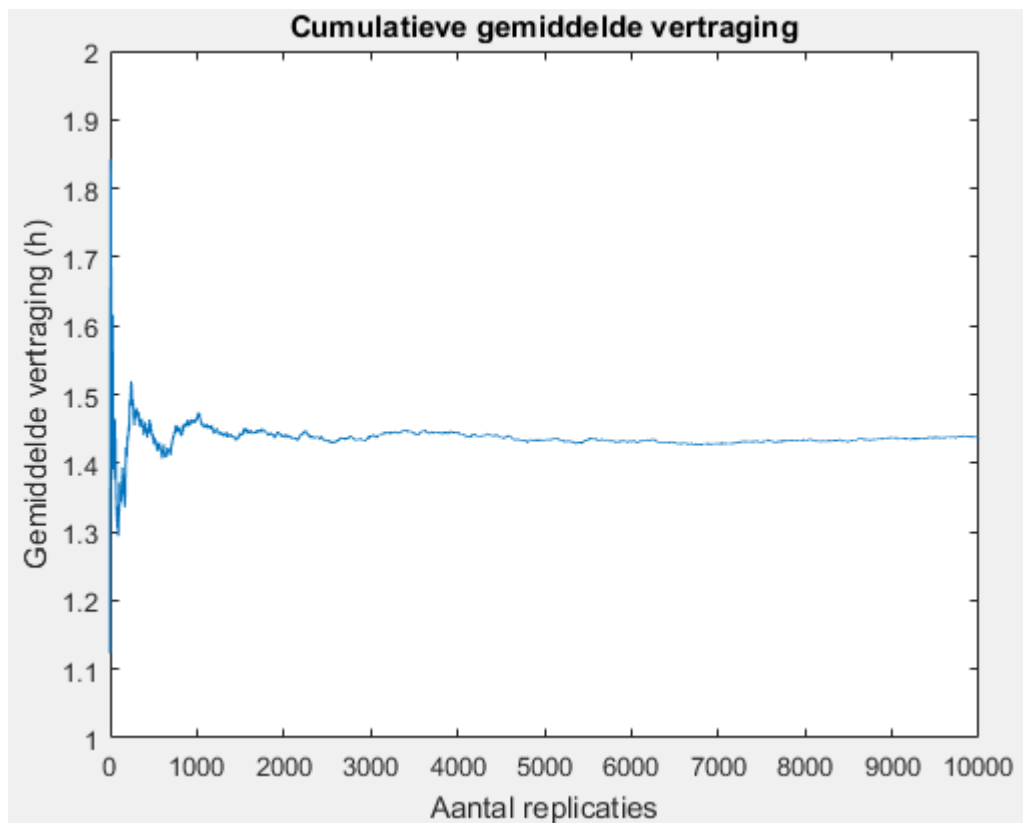
Stap 6:

Omdat er kansrekening betrokken is bij het bepalen van de vertraging, wordt het hele proces meerdere malen gedaan om zo op een betrouwbare wijze de mogelijke vertraging te bepalen. De hoeveelheid replicaties die gedaan moeten worden zijn hieronder beschreven.

6.3. Aantal replicaties

Om een juiste nauwkeurigheid van de resultaten te verkrijgen, is er een minimaal aantal replicaties benodigd (Diaz-Emparanza, 1996). Er zijn meerdere manieren om het aantal benodigde replicaties te bepalen (Robinson, 2014). Een van de manieren is de grafische methode. Hierbij wordt het cumulatieve gemiddelde van de output grafisch weergegeven van een heel aantal replicaties. Hoe meer replicaties er worden gedaan, hoe vlakker de lijn zal gaan lopen (weinig variabiliteit en geen op- of neerwaartse trend). Het benodigd aantal replicaties is gedefinieerd als het punt waarop de lijn vlak wordt. Het doen van meer replicaties geeft hierna geen marginale verbeteringen. Om tot een juiste bepaling te komen, wordt er 1x een lange run gedaan met heel veel replicaties.

De cumulatieve gemiddelde verwachte vertraging wordt berekend door een eenvoudige rekensom: de som van de uitkomsten van alle uitgevoerde replicaties, gedeeld door het aantal replicaties zelf.



Figuur 6.3.1: Cumulatieve gemiddelde verwachte vertraging

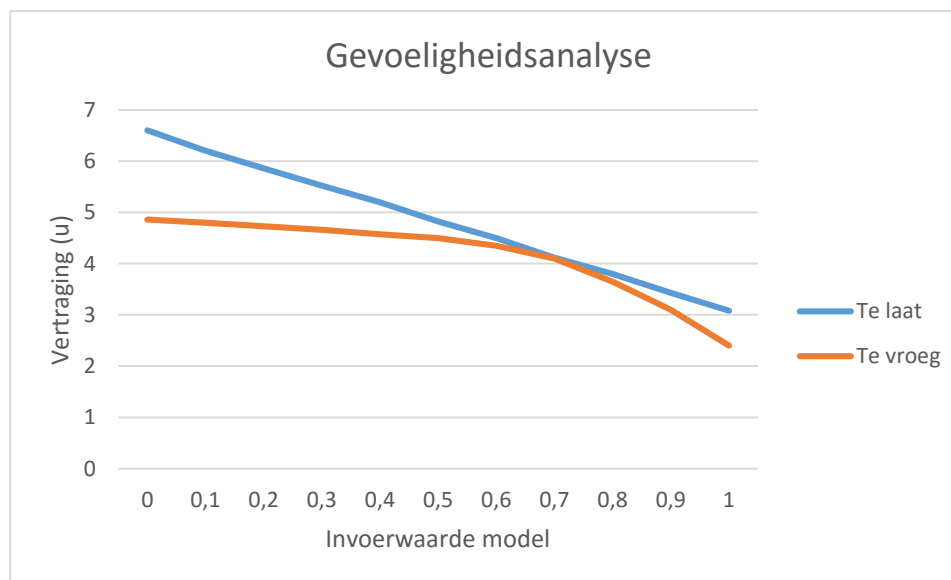
In Figuur 6.3.1 is de cumulatieve gemiddelde verwachte vertraging te zien, waarbij te zien is dat de output tot aan ongeveer 2500 replicaties nog veel schommelt. Vanaf 3000 replicaties is de lijn bijna constant vlak, dus 3000 replicaties is ongeveer het minimaal benodigd aantal replicaties. Robinson zegt echter dat omdat er na de 3000 replicaties ook nog kleine schommelingen zijn, het wellicht verstandiger is om de conservatieve beslissing te maken om meer replicaties uit te voeren. Om deze reden en om betere resultaten te krijgen, zal er verder gerekend worden met 4000 replicaties.

6.4. Gevoeligheidsanalyse

Om te kijken hoe gevoelig het model is voor verandering aan de parameters, wordt er een gevoeligheidsanalyse gedaan voor de parameters. Ook wordt hierbij de robuustheid van het model getest, het vermogen van het model om bij veranderingen van de parameters alsnog zijn geloofwaardigheid te houden (Investopedia, sd).

De lengte van de processen is een vast gegeven voor de invoer van het model en daarom wordt deze parameter niet meegenomen in de gevoeligheidsanalyse. Ook de afhankelijkheden tussen processen zijn een vast gegeven. De kansen dat een proces te laat of te vroeg is, zijn echter de aannames waardoor de uitkomst van het model kan veranderen.

De gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd door een heel aantal verschillende waarden te kiezen voor de gekozen parameters en te zien wat het effect hiervan is op de uitkomst. Voor de Te laat- en Te vroeg factor zijn voor een enkel proces in het basismodel de decimale waarden tussen 0 en 1 genomen en geplot in onderstaand figuur.



Figuur 6.4.1: Gevoeligheidsanalyse

Wat we hierin kunnen zien is dat het model zeer gevoelig is voor de Te laat factor. Een verandering van één decimaal in de invoerwaarde verschuift de uitkomst met ongeveer 0,4. De Te laat factor heeft een veel kleinere invloed, zeker omdat deze waarde nooit boven de 0,5 zal liggen, het deel van de grafiek waar de lijn het steilst loopt.

Omdat verandering van de Te laat factor een grote invloed heeft op de uitkomst van het model, is het belangrijk om een juistere inschatting van die factor te kunnen maken dan nu gebeurd is in dit model. Nu wordt er gerekend met waardes op basis van inschattingen, maar het zou beter zijn om met empirische waarden te kunnen rekenen.

7. Uitkomst model

Nu de basis van het model is gelegd, kan het model uitgebreid worden naar het project OV-SAAL, aan de hand van de zes stappen genoemd in Stappenplan model.

249	Spoor 906 (kopspoor machinistenperron)	39,5 uur	zat 20-08-16 18:30	maa 22-08-16 10:00
250	Stellen spoorstaaf AK wissel 2241 (spoor 906) naar km 15.616	1 uur	zat 20-08-16 18:30	zat 20-08-16 19:30
251	Leggen dwarsliggers (ca. 200 stuks)	1,5 uur	zat 20-08-16 19:30	zat 20-08-16 21:00
252	Opzetten spoorstaven incl. koppelen	1 uur	zat 20-08-16 21:00	zat 20-08-16 22:00
253	Bouwen spoor	2 uur	zat 20-08-16 22:00	zon 21-08-16 0:00
254	Plaatsen stootjuk	4 uur	maa 22-08-16 6:00	maa 22-08-16 10:00
255	Spoor 905 (kopspoor machinistenperron)	5,5 uur	zon 21-08-16 0:00	zon 21-08-16 5:30
256	Stellen spoorstaaf AK wissel 2239 (spoor 905) naar km 15.616	1 uur	zon 21-08-16 0:00	zon 21-08-16 1:00
257	Leggen dwarsliggers (ca. 200 stuks)	1,5 uur	zon 21-08-16 1:00	zon 21-08-16 2:30
258	Opzetten spoorstaven incl. koppelen	1 uur	zon 21-08-16 2:30	zon 21-08-16 3:30
259	Bouwen spoor	2 uur	zon 21-08-16 3:30	zon 21-08-16 5:30
260	Spoor FE - VK wsl 2249	3,5 uur	zon 21-08-16 5:30	zon 21-08-16 9:00
261	Stellen spoorstaaf vanaf VK wissel 2249 tot km 15.581 (spoor FE)	0,5 uur	zon 21-08-16 5:30	zon 21-08-16 6:00
262	Leggen dwarsliggers (ca. 53 stuks)	1 uur	zon 21-08-16 6:00	zon 21-08-16 7:00
263	Opzetten spoorstaven incl. koppelen	0,5 uur	zon 21-08-16 7:00	zon 21-08-16 7:30
264	Bouwen spoor	1,5 uur	zon 21-08-16 7:30	zon 21-08-16 9:00

Figuur 6.4.2: Planning van de twaalf processen

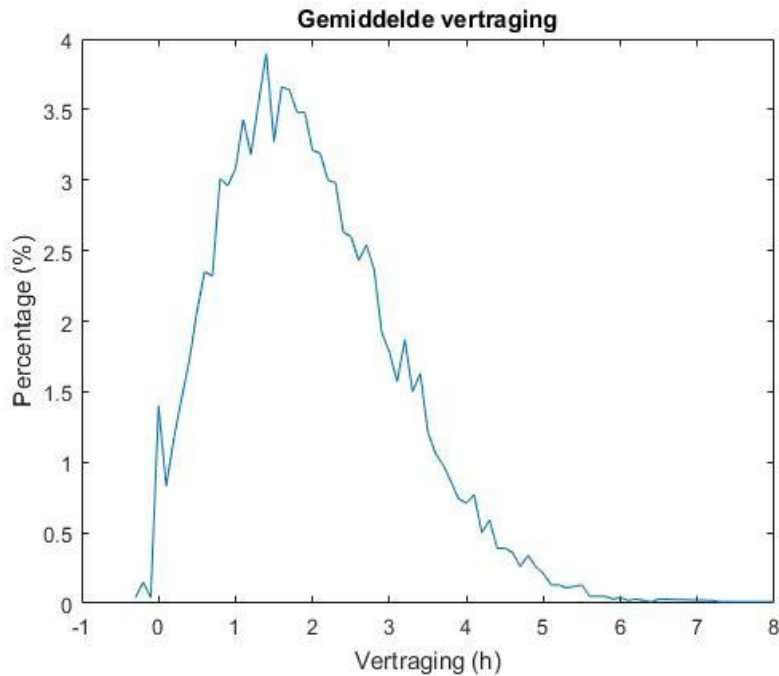
In Figuur 5.1.1 is een voorbeeld gegeven van één afhankelijke keten binnen OV-SAAL, waarbij 12 processen direct achter elkaar zijn gepland zonder buffer. Voor al deze processen geldt een kans van tijdigheid van 80%, aangezien ze niet in een categorie als in “Bijlage 1: OpTijd waarden voor OV-SAAL” vallen. De kans dat ze vroeger dan gepland klaar zijn, is bij allemaal 20%.

De lengte van deze twaalf processen is weergegeven in Figuur 6.4.2. De totale lengte van de keten is 14,5 uur. Proces 254 valt buiten de keten van processen omdat deze geen afhankelijkheid heeft met de overige processen.

De uitkomst van de simulatie van het model is dat de gemiddelde verwachte vertraging ongeveer 2 uur is, met een maximum vertraging van ongeveer 8 uur. Percentueel is dit een gemiddelde verwachte vertraging van 15% en een maximum van 70%. Van de uitkomst kan ook een verdeling worden gemaakt, zoals te zien in Figuur 6.4.3. Hierin is te zien dat in slechts 1,5% van de gevallen de verwachting is dat de totale keten van processen op tijd eindigt, en dat in de meeste tijd de vertraging tussen de 1 en 3 uur ligt.

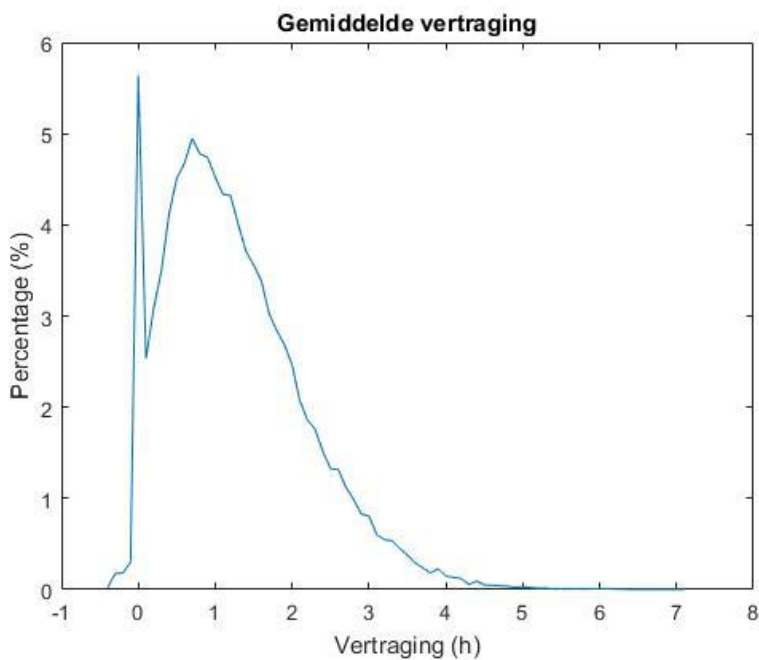
Wat we uit deze figuur kunnen halen is dat in slechts 1,5% van de gevallen de keten van processen volledig op tijd zal zijn, ondanks dat alle twaalf processen 80% kans hebben om tijdig te verlopen. Dit is een vrij verrassende uitkomst, aangezien het negatiever is dan wat in eerste instantie verwacht zou worden. Als dit niet overeenkomt met de werkelijkheid, dan kan het zijn dat deze waarde van 80% gevalideerd moet worden bij experts in dit gebied, die een betere inschatting kunnen maken van de tijdigheid van processen.

Daarnaast is er ook nog een kleine kans dat de keten van processen vroeger dan gepland klaar is. Deze kans is echter heel klein omdat dan zowel het laatste proces te vroeg klaar moet zijn als dat alle elf voorgaande processen niet te laat afgelopen zijn.



Figuur 6.4.3: Gemiddelde vertraging voor de keten van processen (80% kans op tijdigheid)

Wat als we daarentegen van al deze processen de kans op tijdigheid veranderen naar 90%? Dan komt de hele grafiek er veel positiever uit te zien, zie Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.. Hierbij is in bijna 6% van de gevallen de reeks van processen op tijd, en is de gemiddelde verwachte vertraging gedaald tot 1,25 uur vertraging.



Figuur 6.4.4: Gemiddelde vertraging voor de keten van processen (90% kans op tijdigheid)

Het verschil tussen deze twee grafieken laat echter zien hoe gevoelig het model is voor de juiste inschatting van de tijdigheid van processen.

8. Toepassing op OV-SAAL

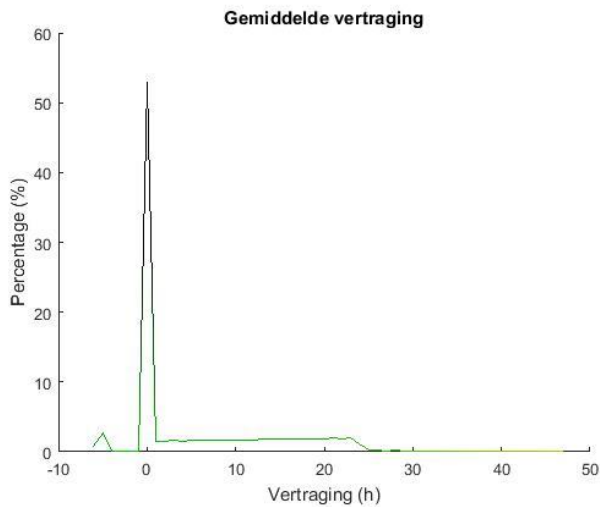
Voor twee werklocaties van het project OV-SAAL zijn een aantal kritieke paden doorgerekend op de verwachte vertraging. Een aantal hiervan zijn ketens waar een aantal buffers in zitten. De laatste is er een waarbij er heel veel processen dicht op elkaar zitten. Hiermee kan dus ook vergeleken worden wat de invloed is van buffers.

De eerste paar zijn reeksen van processen op werklocatie 6, die door Movares wordt uitgevoerd, te beginnen met een aantal processen voor het aanbrengen van kapconstructies op Almere Parkwijk. De reeks processen bestaat uit het aanbrengen van materialen en materieel, kolommen en liggers plaatsen, het monteren van dakpanalen, de luifel van de glaspanelen en de installaties. Een overzicht van de processen is te zien in onderstaande tabel. Deze reeks heeft waarschijnlijk een hele grote kans om op tijd te eindigen omdat er grote buffers aanwezig zijn tussen de processen. Slechts vertraging in de laatste twee parallelle processen zal grote invloed hebben op de vertraging aan het einde.

Tabel 1: Overzicht van processen aanbrengen overkapping station Parkwijk

Proces	Duur (u)	Begin	Tijdigheid
Aanvoer spiering kraan	3	19-08 12:00	90%
Aanvoer materialen	2	19-08 15:00	90%
Kolom en raatligger plaatsen	12	20-08 7:00	80%
Spanten en dakligger plaatsen	12	21-08 7:00	80%
Goot en randligger plaatsen	12	22-08 7:00	80%
Dakpanelen monteren	36	23-08 7:00	80%
Monteren luifel glaspanelen	24	25-08 7:00	80%
Monteren installaties	24	25-08 7:00	80%

De uitkomst is te zien in onderstaand figuur. Omdat dus alleen vertraging in de laatste twee processen meespeelt voor de uitkomst, is de grafiek niet te vergelijken met de grafiek uit het voorbeeld. Zoals verwacht is meer dan 50% van de gevallen de gehele keten op tijd, wat komt door de aanwezigheid van



buffers waardoor vertragingen niet kunnen doorwerken. De kans op vertragingen is verder constant omdat er momenteel een lineaire relatie tussen de kans en de vertragingen wordt aangenomen waardoor de kans op een grote vertraging even groot is als de kans op een grote vertraging.

Figuur 6.4.5: Verwachte gemiddelde vertraging overkapping station Parkwijk

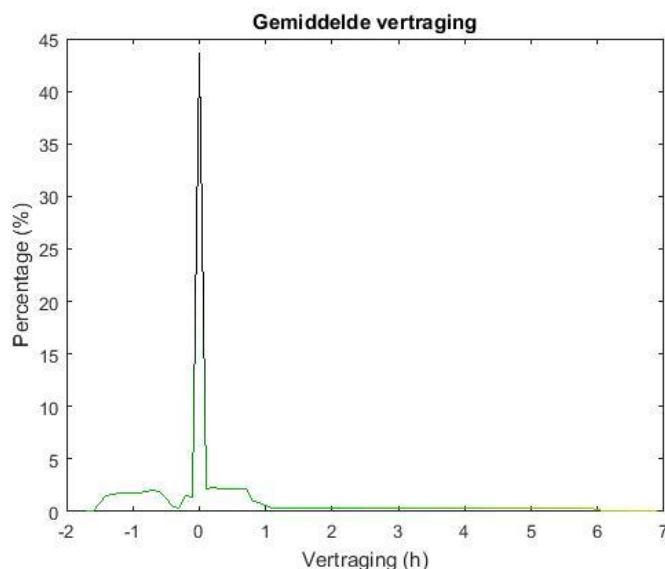
De volgende reeks bestaat uit 13 processen omtrent de montage van geluidsschermen, verspreid over 4 dagen waarbij op elke dag eerst de kraan wordt omgesteld en daarna wordt het transparante bovendeel van de geluidsschermen gemonteerd. Het opstellen van de kraan is zeer eenvoudig werk en kan worden berekend met een kans op tijdigheid van 90%.

Tabel 2: Overzicht processen monteren geluidsschermen

Proces	Duur (u)	Begin	Tijdigheid
Dag 1 aanvoer en opstellen kraan	1	22-08 9:00	90%
Monteren transparante bovenbouw	9	22-08 10:00	80%
Monteren transparante bovenbouw	3	23-08 7:00	80%
Dag 1 omstellen kraan	1	23-08 10:00	90%
Monteren transparante bovenbouw	8	23-08 11:00	80%
Monteren transparante bovenbouw	4	24-08 7:00	80%
Dag 2 omstellen kraan	1	24-08 11:00	90%
Monteren transparante bovenbouw	7	24-08 12:00	80%
Monteren transparante bovenbouw	5	25-08 7:00	80%
Dag 3 omstellen kraan	1	25-08 12:00	90%
Monteren transparante bovenbouw	6	25-08 13:00	80%
Monteren transparante bovenbouw	6	26-08 7:00	80%
Dag 4 afvoeren kraan	1	26-08 13:00	90%

De uitkomst is redelijk vergelijkbaar met het vorige pad, waarbij in bijna de helft van de gevallen de reeks van processen op tijd zal zijn. Dat de uitkomst redelijk hetzelfde is, komt weer door de aanwezigheid van buffers, waardoor in dit geval slechts de laatste twee processen eigenlijk invloed hebben op de uitkomst.

Door de aanwezigheid van de buffers tussen de processen heeft eigenlijk alleen vertraging in de laatste 2 processen directe invloed op de totale vertraging. Dit is uiteindelijk de vertraging die door zal werken naar de reiziger op het traject. Vertraging tussendoor heeft daarentegen zeker ook nog invloed. Dit is niet voor de reizigers merkbaar maar wel voor de werkploegen.

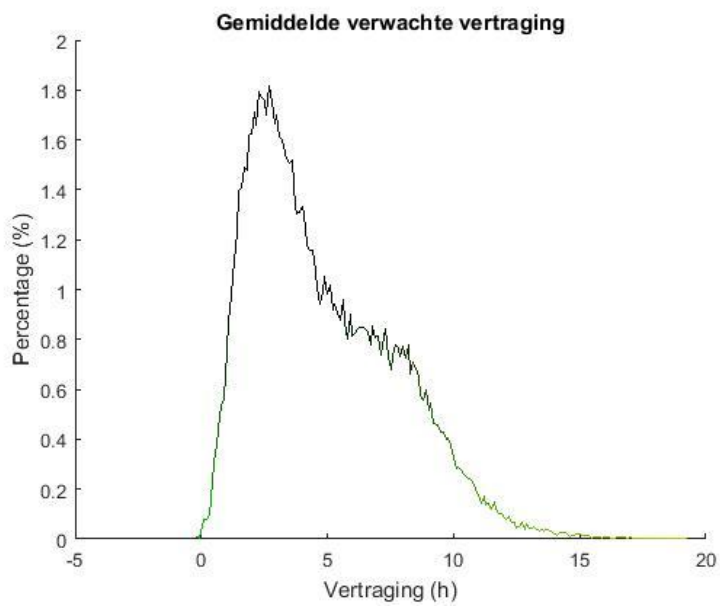


Figuur 6.4.6: Verwachte gemiddelde vertraging montage geluidsschermen

Het laatste pad bevindt zich in het sub-project van het plaatsen van de brug, werklocatie 7. Bij deze reeks zijn meerder partijen betrokken, wat de impact van vertragingen nog belangrijker maakt. Op dit pad bevinden zich 19 afzonderlijke processen. De eerste negen processen worden uitgevoerd door Mammoet Holding B.V., welk de SPMT-trailers die nodig zijn voor het verplaatsen van de brug opstellen. Dit bij elkaar duurt 9 uur, met een ingeschatte kans op tijdigheid van 80%. Hierna volgen twee processen voor het slopen van het landhoofd van de spoorbrug, uitgevoerd door Vlasman b.v. Dit duurt 8 uur samen, met een kans op tijdigheid van 90%, omdat slopen eenvoudig werk is. Direct nadat het slopen van de landhoofden is gebeurd, volgt het inschuiven van de nieuwe spoorbrug door Civiele Technieken deBoer bv. Hiervoor staat 6 uur gepland, maar omdat dit zeer riskant werk is, heeft dit 50% kans om uit te lopen. Als laatste volgen hierop negen verschillende werkzaamheden rondom de landhoofdblokken, uitgevoerd door Van Eerd Grondverzet. Bij elkaar duurt dit ook negen uur, met een kans op tijdigheid van 70%. De kansen dat processen te vroeg is ook bijgesteld als de kans op te laat afwijkt. Als een proces 90% kans heeft om op tijd te zijn, is er in plaats van 20%, 30% kans om te vroeg te eindigen. Aangezien het verplaatsen van de brug maar 50% kans heeft om tijdig te verlopen, is de kans dat dit proces te vroeg klaar is bijgesteld naar slechts 5%. Dit alles is samengevat in onderstaande tabel.

Proces	Duur (u)	Begin	Tijdigheid
Oversteek SPMT trailers	0,75	21-08 0:15	80%
Opstellen SPMT trailers dek noord	2,75	21-08 1:00	80%
Oversteek dek 1-3 noord	0,75	21-08 3:45	80%
Oversteek SPMT trailers	0,5	21-08 4:30	80%
Afzetten brugdek 1-3 noord	1	21-08 5:00	80%
Opstellen SPMT trailers dek zuid	2,75	21-08 6:00	80%
Oversteken dek 1-3 zuid	0,5	21-08 8:45	80%
Slopen landhoofden P1	6	21-08 9:15	90%
Sloopwerk spoorbrug	2	21-08 15:15	90%
Schuiven spoorbrug	7	21-08 17:15	50%
Maatvoeren tafels	1	22-08 0:15	70%
Hijsen tafels	1	22-08 1:15	70%
Uitvullen tafels	1	22-08 2:15	70%
Hijsen tafels	1	22-08 2:15	70%
Hijsen plaat	1	22-08 3:15	70%
Dichten voegen tafels	1	22-08 3:15	70%
Ondergieten tafels	2	22-08 4:15	70%
Vlechten tafels	2	22-08 6:15	70%
Storten beton tafels	1	22-08 8:15	70%

Nu alle invoerwaarden van het model bekend zijn, kan het model doorgerekend worden, zoals beschreven in de vorige hoofdstukken. In Figuur 6.4.7 is de uitkomst te zien van het model. De gemiddelde verwachting vertraging is ongeveer 5 uur en de maximale vertraging ligt rond de 20 uur. Wat net als in hoofdstuk 7 te zien is, is dat in bijna geen enkel deel van alle gevallen de keten van processen op tijd voltooid zal zijn, maar dat de gemiddelde vertraging ongeveer 4,5 uur is. Verder zijn er niet alleen veel vertragingen tot ongeveer 5 uur maar zijn er ook veel uitschieters waarbij wel 15 uur vertraging opgelopen kan worden.



Figuur 6.4.7: Gemiddelde verwachte vertraging voor werklocatie 7

9. Conclusie

In dit hoofdstuk zal antwoord worden gegeven op de vier sub-vragen naar welke onderzoek is gedaan in dit verslag. In hoofdstuk 3 zijn de vier hieronder genoemde onderzoeksvragen verder uitgelegd.

1. Op welke manier kunnen processen aan elkaar gekoppeld zijn?
2. Wat voor factoren hebben invloed op de tijdigheid van een keten van processen?
3. Uit welke stappen bestaat het model?
4. Wat zijn de resultaten als het model teruggekoppeld wordt aan het project OV-SAAL?

Sub-vraag 1

Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee soorten koppelingen tussen processen: de eerste is dat er geen buffer aanwezig is en dat proces B direct aan het einde van proces A begint. De andere koppeling is de aanwezigheid van een tijdsbuffer. Hierbij zit er enige tijd tussen het einde van proces A en het begin van proces B. Als er een buffer aanwezig is, is het mogelijk om eventuele vertragingen op te vangen. Bij de eerste soort koppeling heeft vertraging die optreedt in proces A direct invloed op proces B.

Sub-vraag 2

Een aantal factoren hebben invloed op de totale vertraging van een keten van processen, namelijk: de kans dat een proces vroeger dan gepland klaar is, op tijd is of vertraging oploopt. De volgende factor is de aanwezigheid van buffers, welke zoals gezegd vertragingen kunnen opheffen. Wat blijkt is dat de aanwezigheid van buffers een redelijk grote invloed heeft op de tijdigheid, zoals gebleken is in hoofdstuk 6. Mogelijk zijn er nog meer factoren die invloed hebben op de mogelijke vertraging van een keten van processen, maar die zijn niet in dit model meegenomen.

Sub-vraag 3

Het model bestaat uit zes stappen, waarvan de verdere uitleg benoemd staat in hoofdstuk 6.

1. Initiëren van de oorspronkelijke begin- en eindtijden van de processen;
2. Per proces de mogelijke vertraging uitrekenen;
3. De begintijd van het aansluitende proces aanpassen;
4. Stap 2 en 3 herhalen voor de gehele keten;
5. De totale vertraging berekenen;
6. Stap 2 tot 5 een aantal keer herhalen om een gemiddelde verwachting van de vertraging te kunnen bepalen;

Sub-vraag 4

Van twee werklocaties voor OV-SAAL zijn verschillende keten van processen doorgerekend.

Hieruit is gebleken dat voor verschillende reeksen van werklocatie 6, uitgevoerd door Movares, de kans op vertraging zeer klein is en dat in meer dan de helft van de gevallen het project op tijd of zelfs te vroeg klaar zal zijn. Dit komt vooral door de aanwezigheid van verscheidene buffer die de vertragingen kunnen opheffen. Voor de tijdigheid van het algehele project OV-SAAL is het daarom slechts van belang om de

laatste paar processen tijdig te laten eindigen, alhoewel vertraging tussendoor vervelend voor de planning van de diverse werkploegen en aannemers.

Op werklocatie 7, uitgevoerd door meerdere partijen, bevindt zich een keten van processen die redelijk gevoelig is gebleken voor vertragingen. Dit zijn verschillende processen omtrent het inschuiven van de nieuwe spoorbrug over de A1. Naast het feit dat in deze reeks alle processen direct op elkaar zijn gepland waardoor vertragingen niet kunnen worden opgelopen, zijn er ook redelijk wat processen waarbij de kans op tijdigheid lager ligt dan gemiddeld. Deze beide feiten zorgen ervoor dat de gemiddelde verwachte vertraging rond de 5 uur ligt, waarbij uitschieters tot vertragingen van 15 uur ook nog reëel zijn.

In dit hoofdstuk zal besproken worden op welke manier dit verslag verbeterd had kunnen worden en wat had kunnen bijdragen ter verbetering.

De inschatting van de kans op tijdigheid is de belangrijkste factor van het model en daarom ook de factor die zoals te lezen is in de gevoeligheidsanalyse, een grote invloed op de uitkomst van het model kan hebben. Tot zover zijn deze waarden redelijk grof aangenomen. Hierdoor zijn de resultaten nog geen werkelijke afspiegeling van de werkelijkheid maar zijn ze slechts te gebruiken om onderling de relatieve verschillen te kunnen bepalen. Om een juiste afspiegeling van de werkelijkheid te krijgen, moet daarom verder onderzoek gedaan worden naar of deze waarden exacter bepaald kunnen worden, aan de hand van de ervaring van aannemers en dergelijken. Zij hebben al vaker dezelfde of soortgelijke processen gedaan en weten daarom waarschijnlijk goed in te schatten welke processen vaak goed gaan of juist vaker fout gaan.

Verder zijn er wellicht bij het modelleren een aantal verkeerde aannames gedaan. De belangrijkste is waarschijnlijk het verband tussen de kans en de mogelijke vertraging, dan wel de kans op te vroeg zijn. Hierbij is een lineair verband aangenomen zoals weergegeven als in Figuur 6.1.1, maar waarschijnlijk is het meer een parabolisch verband. Hierdoor is de kans op een kleine vertraging even groot als de kans op een grote vertraging, terwijl in werkelijkheid kleinere vertragingen vaker voorkomen dan grote vertragingen. Het gevolg hiervan is dat er te vaak een te negatieve vertraging wordt aangenomen.

Ook is de maximale vertraging gelimiteerd tot een mogelijke verdubbeling van de proceslengte, en de maximale tijd die ingehaald kan worden door te vroeg zijn een kwart van de proceslengte. Deze waarden zijn voortgekomen uit aannames die gemaakt zijn, omdat dit lastige waarden zijn om achter te komen, aangezien er ook geen literatuur over is gevonden. Hiervoor is verder onderzoek nodig naar de opgedane vertraging van een heel aantal soortgelijke processen. Met deze vertragingen zou een verdeling gemaakt kunnen worden van de mogelijk optredende vertraging, welke ter verbetering als invoerwaarde voor dit model gebruikt zou kunnen worden in plaats van de aannames. Dit is mijn voornaamste voorstel voor vervolgonderzoek.

Een verder aandachtspunt is dat nu voor elk proces steeds opnieuw een willekeurig nummer wordt getrokken en aan de hand hiervan wordt bepaald wat de mogelijke vertraging is, maar dat als een proces vertraging oploopt het ook zeer aannemelijk is dat het volgende proces reden heeft om uit te lopen. Een voorbeeld hiervan zijn weersomstandigheden die meerdere processen achter elkaar kunnen laten uitlopen. Een ander voorbeeld is het mogelijke ontbreken van genoeg materieel en arbeidskracht, wat hoogstwaarschijnlijk niet slechts invloed heeft op een enkel proces.

De laatste potentiële verbetering zou het tussendoor monitoren zijn van de vertragingen in plaats van slechts de vertraging aan het einde. De vertraging aan het einde zegt wel iets over de overlast voor de treinreizigers op het traject, maar vertragingen tussendoor zijn evengoed niet wenselijk voor de verschillende werkploegen. Het kan namelijk zo zijn dat ze of pas later kunnen beginnen met werken en dan ook waarschijnlijk langer moeten doorwerken.

Figuur 2.1.1: Verwachte aantal treinreizigers over de Hollandse Brug (ProRail, Tracébesluit traject Weesp - Lelystad)	3
Figuur 2.1.2: Toekomstige situatie qua keerspooren rond Almere CS (Movares, 2015)	4
Figuur 2.1.3: Impressie geluidsschermen (ProRail, Folder OV SAAL, 2013)	4
Figuur 2.1.4: Impressie spoorbrug over de A1 (Rijkswaterstaat, 2015)	5
Figuur 5.1.1: Voorbeeld van serie van afhankelijkheden in OV-SAAL, waarmee het model opgezet zal worden	10
Figuur 5.2.1: Conceptueel model	11
Figuur 6.1.1: Kans op een bepaalde vertraging	13
Figuur 6.3.1: Cumulatieve gemiddelde verwachte vertraging	15
Figuur 6.4.1: Gevoeligheidsanalyse	16
Figuur 6.4.2: Planning van de twaalf processen	17
Figuur 6.4.3: Gemiddelde vertraging voor de keten van processen (80% kans op tijdigheid)	18
Figuur 6.4.4: Gemiddelde vertraging voor de keten van processen (90% kans op tijdigheid)	18
Figuur 6.4.5: Verwachte gemiddelde verwachting overkapping station Parkwijk	19
Figuur 6.4.6: Verwachte gemiddelde vertraging montage geluidsschermen	20
Figuur 6.4.7: Gemiddelde verwachte vertraging voor werklocatie 7	22

11. Referenties

- Almere, G. (2011). *Ruimtelijke plannen*. Opgehaald van Planviewer:
http://files.planviewer.nl/ruimtelijkeplannen/00/0034/NL.IMRO.0034.BP2Z06-on01/t_NL.IMRO.0034.BP2Z06-on01.html
- Diaz-Emparanza, I. (1996, December 16). Selecting the number of replications in a simulation study. Bilbao, Spanje.
- Doel, A. v. (2016, Juni 8). Tljdigheid van processen. (R. Simons, Interviewer)
- Investopedia. (sd). *Robust*. Opgehaald van Investopedia:
<http://www.investopedia.com/terms/r/robust.asp>
- Löring, H. (2009, Juni). Projectondersteuning door professionals. IPMA Project Magazine.
- Makar, A. (2009, September 10). *Why critical path is critical to project management*. Opgehaald van TechRepublic: <http://www.techrepublic.com/blog/tech-decision-maker/why-critical-path-is-critical-to-project-management/>
- Movares. (2015). *SAAL A Almere bouw keersporen*. Opgehaald van Movares: <https://movares.nl/saal-almere-bouw-keersporen/>
- Odeh, A., & Battaineh, H. (2002, January 1). *Causes of construction delay: traditional contracts*. Opgehaald van Sciencedirect:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786300000375>
- ProRail. (2013, Oktober). *Folder OV SAAL*. Opgehaald van ProRail:
https://www.prorail.nl/sites/default/files/folder_ov-saal_almere-web_0.pdf
- ProRail. (2015). *Almere - Lelystad*. Opgehaald van ProRail: <https://www.prorail.nl/projecten/almere-lelystad>
- ProRail. (sd). Tracébesluit traject Weesp - Lelystad.
- Rijkswaterstaat. (2015). *Wat en waarom spoorbrug Muiderberg*. Opgehaald van Online Bezoekerscentrum Rijkswaterstaat:
<https://bezoekerscentrum.rijkswaterstaat.nl/SchipholAmsterdamAlmere/waarom-spoorbrug-muiderberg/#.VvEvxSdFNUM>
- Robinson, S. (2014). *Simulation*. Hampshire: Palgrave macmillan.
- Scheduling, C. (2016). *Advantages and disadvantages in the implementation of CPM*. Opgehaald van CPM scheduling: <http://www.cpm scheduling.com/critical-path-method/advantages-and-disadvantages-in-the-implementation-of-cpm>

Sharma, R. (2015, Juni 29). *Advantages and disadvantages of critical path method*. Opgehaald van Bright Hub Project Management: <http://www.brighthubpm.com/project-planning/60960-advantages-and-disadvantages-of-critical-path-method/>

Smartsheet. (2016). *The ultimate guide to the critical path method*. Opgehaald van Smartsheet: <https://www.smartsheet.com/critical-path-method>

Vermeer, D. (2016, April 15). Draaiboek week 33/34 - 2016 Projectdocument OV-SAAL Korte termijn (2013-2016). Almere.

Wikipedia. (2015, Juli 4). *Padafhankelijkheid*. Opgehaald van Wikipedia: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Padafhankelijkheid>

Wikipedia. (2016, February 8). *Critical path method*. Opgehaald van Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_path_method

Bijlage 1: OpTijd waarden voor OV-SAAL

Proces	OpTijd waarde	Reden
Alles wat sloopwerk bevat	90%	Zeer eenvoudig werk
Draagkabels ophangen	70%	Complexe planning
Ombouw relaishuis	60%	Recentelijk bij Utrecht Centraal Station fout gegaan
LSR aanbrengen bekabeling	60%	Momenteel onderbezetting van personeel
Branden van het spoor	90%	Gaat altijd goed
Ontgraven cunet	60%	Mogelijke kabels in de grond
Verdichten onderbaan	75%	Mogelijke vervorming bij slappe onderbaan
Inbrengen stukken voor wissels	75%	Volgende van voorbereiding is belangrijk
Schiften spoor	70%	Inzet van storing-gevoelige stopmachines
Afwerken	100%	Als het niet af komt, kan het blijven liggen
Thermietlassen wissels	70%	Vanwege volgorde van lassen
Graven	70%	Mogelijke onverwachte objecten in de grond
Opstorting maken	70%	Geprefabriceerde onderdelen
Jukken	75%	Zeer nauwkeurig werk
Werkingstest wissels	75%	Gevoelige wissels
Instellen spoor	70%	Informatie afhankelijk
Aanvoer ballast	70%	Productie mogelijk niet hoog genoeg
Aanbrengen overgangsconstructie	70%	Graven van een diep gat
Plaatsen platen	70%	Risicant werk
Functietest	60%	Nauwkeurig werk
Tractie energievoorziening	70%	
Movares testen	60%	
Verkeersmaatregelen	90%	Geroutineerd werk
Landhoofden aanbrengen	70%	
Spoorbrug schuiven	50%	Risicant werk

Bijlage 2: MATLAB-model

```
clear,clc
OpTijd = 0.8; %Standaard kans op tijdigheid
Lengte_proces = 4; %Standaard proceslengte
XFactor = Lengte_proces/(1-OpTijd); %Standaard vertragingfactor
AantalRuns = 4000; %Aantal replicaties
Vertraging = zeros(1,AantalRuns);

%Procestijden definiëren
Proces1_oorsp = [0,Lengte_proces];
Proces2_oorsp = [Proces1_oorsp(2),Proces1_oorsp(2)+Lengte_proces];
Proces3_oorsp = [Proces2_oorsp(2)+4,Proces2_oorsp(2)+4+Lengte_proces];
Proces4_oorsp = [Proces3_oorsp(2),Proces3_oorsp(2)+Lengte_proces];
Proces5_oorsp = [Proces4_oorsp(2),Proces4_oorsp(2)+Lengte_proces];

%Proces zonder buffer
ProcesDEZE = [ProcesVORIGE(2),ProcesVORIGE(2)+Lengte_proces]; %Herdefiniëren
OpTijd = 0.8; %Kans op tijdigheid
XFactor = Lengte_proces/(1-OpTijd); %Vertragingfactor berekenen
Kans = rand(1); %Getal tussen 0 en 1
if Kans < OpTijd %Vertraging berekenen
    VertragingDEZE = 0;
else VertragingDEZE = (Kans - OpTijd)*XFactor;
end
ProcesDEZE = [ProcesDEZE(1),ProcesDEZE(2)+VertragingDEZE]; %Eindtijd aanpassen

%Proces met buffer
if ProcesVORIGE(2) > ProcesDEZE_oorsp(1) %Herdefiniëren
    ProcesDEZE = [ProcesVORIGE(2),ProcesVORIGE(2)+Lengte_proces];
else ProcesDEZE = ProcesDEZE_oorsp;
end
OpTijd = 0.8; %Kans op tijdigheid
XFactor = Lengte_proces/(1-OpTijd); %Vertragingfactor berekenen
Kans = rand(1); %Getal tussen 0 en 1
if Kans < OpTijd %Vertraging berekenen
    VertragingDEZE = 0;
else VertragingDEZE = [Kans - OpTijd]*XFactor;
ProcesDEZE = [ProcesDEZE(1),ProcesDEZE(2)+VertragingDEZE]; %Eindtijd aanpassen
end

%Vertraging plotten
Afgerond = round(Vertraging,1);
Tab = tabulate(Afgerond);
x = Tab(:,1);
y = Tab(:,3);
plot(x,y,'b')
```