

Bachelor Eind Project

Invoering railgebonden voertuig op historische spoorlijn van de Veluwsche Stoomtrein Maatschappij

Door Annemijn van Niekerk

Januari 2022

Technische Universiteit Delft

Studienummer: 4940717

Thesis commissie:	ir. J.M. Engels	Mott MacDonald
	ir. R. Meester	Mott MacDonald
	Dr. ir. E. Schrik CEng	Mott MacDonald
	Dr. V.L. Markine	TU Delft
	Prof. Dr. Z. Li	TU Delft

Voorwoord

Dit onderzoek is onderdeel van mijn Bachelor eind project van de Technische Universiteit Delft aan de faculteit Civiele Techniek. Het onderzoek gaat in op de inpassing van een railgebonden voertuig op de historische spoorlijn van de VSM in de regio Apeldoorn – Dieren.

Graag bedank ik Jan Engels, Rutger Meester en Eelco Schrik voor hun begeleiding vanuit Mott MacDonald in dit proces. Jullie tips en de discussies hebben me vaak nieuwe inzichten gegeven. Verder bedank ik Dr. Valeri Markine en Prof. Dr. Zili Li voor hun begeleiding vanuit de Technische Universiteit Delft. Tot slot bedank ik Ronald Bresser en Sander Willer voor hun deskundige kennis die zeer waardevol was.

Annemijn van Niekerk

Delft, januari 2022

Samenvatting

In het gebied Apeldoorn – Dieren ligt een oude spoorlijn van de Veluwsche Stoomtrein Maatschappij die op dit moment alleen nog voor toeristisch gebruik wordt geëxploiteerd. Om de bereikbaarheid van het gebied te vergroten wordt er onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om hier een railgebonden voertuig op de introduceren. Dit leidt tot de vraag; “Hoe kan in het gebied Apeldoorn – Dieren een railgebonden voertuig worden geïntroduceerd op de oude spoorlijn van de VSM?” Om deze vraag te beantwoorden is er gekeken naar verschillende aspecten. Het gaat hier om de aanwezige infrastructuur, soorten railgebonden voertuigen, relevante referentieprojecten, verschillende technische aspecten, duurzame energietoevoer en aanpassingen die nodig zijn aan de infrastructuur om dit te realiseren.

De lijn bestaat uit de stations Apeldoorn, Beekbergen, Loenen, Eerbeek en Dieren. De stoomtrein heeft een eigen dienstregeling en rijdt in het hoogseizoen ongeveer twee keer per dag. De huidige infrastructuur geeft beperkingen voor de introductie van een railgebonden voertuig. Zo ligt er enkelspoor en is de maximale snelheid op de lijn 40 km/h.

Voor het railgebonden voertuig is gekozen voor een light rail voertuig. Dit is een licht voertuig wat snel kan accelereren. Verder mag er om de historische waarde van de VSM lijn te behouden, geen bovenleiding worden aangelegd. Om deze reden is er onderzoek gedaan naar verschillende soorten energietoevoer. Vanwege duurzaamheidsredenen en de aanwezige infrastructuur is er gekozen voor een batterij. De energie zal komen van windmolens die in de provincie geplaatst worden.

Met behulp van de referentieprojecten zijn er verschillende technische aspecten uitgelicht. Hieruit is voort gekomen dat het van belang is dat de wissels en wielen goed op elkaar afgestemd zijn. Wanneer de wielen te klein of te groot zijn voor de wissels, kan dit zorgen voor ontsporingen, zoals gebeurd is bij de RandstadRail. Verder zijn de perronhoogte, seinen en communicatie tijdens de uitvoering van het project van belang om conflicten te voorkomen.

Kijkend naar en rekening houdend met deze aspecten zijn er verschillende aanpassingen nodig aan de lijn om een railgebonden voertuig daarop te introduceren. Dit betreft onder andere de laadinfrastructuur op de perrons van Dieren en Apeldoorn. Verder zijn er ook verscheidene aanpassingen langs de lijn zelf nodig. Denk hierbij aan het verlengen van perrons en het plaatsen van wissels en extra stukken rails. Met behulp van deze aanpassingen is het mogelijk om een voertuig te introduceren wat er 35 minuten over doet om van Apeldoorn naar Dieren rijdt en andersom. Deze zal één keer per ruim half uur rijden.

Echter, reflecterend op het onderzoek zijn er verscheidene aannames gemaakt die het niet reëel maken om een railgebonden voertuig op deze lijn te introduceren. Er is al een buslijn aanwezig met dezelfde frequentie die er een kwartiertje langer over doet. Voor de aanpassingen die gemaakt moeten worden aan de infrastructuur weegt dit niet op tegen de gevonden resultaten. Verder is er geen onderzoek gedaan naar de bereikbaarheid en is het niet bekend of de aanname dat deze verhoog moet worden, juist is.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting.....	iii
1. Inleiding	6
2. Huidige infrastructuur VSM.....	8
2.1 Omgeving en infrastructuur VSM lijn	8
2.1.1 Opbouw traject.....	10
2.1.2 Technische specificaties VSM lijn	10
2.1.3 Veiligheid	12
2.1.4 Dienstregeling.....	13
3. Railgebonden voertuigen	14
3.1 Mogelijkheden.....	14
3.2 MCA railgebonden voertuig	15
4. Light rail voertuig.....	17
4.1 Constructief technisch.....	17
4.2 Light rail voertuigen.....	17
4.2.1 Stadler GTW.....	17
4.2.2 Stadler FLIRT	18
4.2.3 Urbos 100	19
4.2.4 Coventry Very Light Rail	19
4.3 Opslag.....	20
4.4 Logistiek.....	21
4.5 Conclusie	21
5. Referentieprojecten	22
5.1. RandstadRail.....	22
5.1.1. Aanpassingen infrastructuur	22
5.1.2. Conflicten	23
5.2. Karlsruhe.....	23
5.2.1. Aandachtspunten	24
5.3. Conclusie	25
6. Energietoevoer	26
6.1. Soorten energietoevoer	26
6.1.1. Conclusie	28
6.2. Benodigde capaciteit.....	28
6.2.1. Laadinfrastructuur.....	29
6.3. Mogelijkheden energieopwekking.....	30

6.3.1.	Zonne-energie	30
6.3.2.	Windenergie	30
6.3.3.	Infrastructuur provincie Gelderland.....	30
6.3.4.	Stroomnet.....	32
6.4.	Conclusie	32
7.	Afweging en aanpassingen	33
7.1.	Veiligheid	33
7.1.1.	Overwegen	33
7.2	Energietoevoer	34
7.2.1	Energieopwekking	34
7.3	Opslag light rail voertuigen	35
7.3.1	Rails	35
7.4	Dienstregeling en infrastructuur	35
7.5	Mogelijkheden aanpassing infrastructuur	36
7.6	MCA aanpassingen infrastructuur.....	38
7.7	Voertuig.....	41
8.	Conclusie en aanbevelingen.....	42
9.	Discussie	44
10.	Literatuurlijst	45
	Bijlage 1: Specifieke dienstregeling.....	52
	Bijlage 2: Overwegen.....	53
	Bijlage 3: Specificaties railgebonden voertuigen	58
	Bijlage 3: Informele communicatie Ronald Bresser	60
	Bijlage 4: Interview Sander Willer	62
	Bijlage 5: Krachtenbalans	65

1. Inleiding

In Nederland zijn er verschillende oude spoorlijnen die op dit moment geen onderdeel zijn van het hoofdspoor, om deze reden wordt er geen dagelijks gebruik meer van gemaakt in het openbaar vervoer. Ook in het gebied Apeldoorn – Dieren ligt een historische spoorlijn, de Veluwsche Stoomtrein Maatschappij, aangelegd in 1887. Vroeger werd de lijn volop gebruikt voor zowel goederen als passagiersvervoer. Het passagiersvervoer is stil komen te liggen in 1947 en het goederenvervoer in '84. Tegenwoordig is de lijn een museumlijn geworden die is geopend in 1975. Op dit moment wordt deze lijn alleen nog voor toeristisch gebruik geëxploiteerd.

In het omliggende gebied (Arnhem en Zutphen) wordt minimaal gebruik gemaakt van openbaar vervoer. Als passagiers van Dieren naar Apeldoorn willen, kan dit alleen met de trein via Zutphen of met de bus. De bus die er rijdt heeft een reistijd van een klein uur voor een af te leggen afstand van 22 kilometer. Dit is erg lang en om deze reden wordt er aangenomen dat de bereikbaarheid van dit gebied met behulp van openbaar vervoer, verhoogd moet worden.

Om de bereikbaarheid in het gebied te verhogen wordt er in dit onderzoek gekeken of het mogelijk is om een railgebonden voertuig te introduceren op de historische spoorlijn. De hoofdvraag van dit onderzoek luidt als volgt; "Hoe kan, in het gebied Apeldoorn – Dieren, een railgebonden voertuig geïntroduceerd worden op de historische spoorlijn van de VSM?" Om deze vraag te beantwoorden, worden de volgende sub vragen gesteld;

- Wat is de huidige aanwezige infrastructuur op de VSM lijn?
Deze vraag wordt beantwoord om verschillende eisen op te stellen waar het railgebonden voertuig aan moet voldoen en wat voor mogelijke aanpassingen er moeten worden gemaakt.
- Welke railgebonden voertuigen zijn mogelijk geschikt op de VSM lijn?
Deze vraag wordt beantwoord om te inventariseren welke voertuigen er tegenwoordig gebruikt worden en zo geen alternatieven over het hoofd worden gezien.
- Wat zijn relevante referentieprojecten?
Bij de invoering van het railgebonden voertuig is het van belang om alle technische aspecten mee te nemen. Om hierbij geen onderdelen te missen en te inventariseren waar er mogelijk uitdagingen liggen, verdiept dit onderzoek zich in verschillende referentieprojecten. Het resultaat hiervan geeft de volgende vraag;
- Wat zijn de technische aspecten waar rekening mee moet worden gehouden?
De verschillende technische aspecten van zowel de infrastructuur als van het railgebonden voertuig moeten uiteindelijk de mogelijkheden bieden om verschillende alternatieven in kaart te brengen.
- Welke aanpassingen moeten aan de huidige infrastructuur worden gedaan om het railgebonden voertuig te introduceren op de historische lijn, maar wel met het behoud van de huidige waarde van de VSM lijn?
Om tot een resultaat te komen moet er geïnventariseerd wat er aan de huidige infrastructuur aangepast kan worden zonder het verlies van de huidige staat van de VSM lijn.
- Hoe kan het railgebonden voertuig zo duurzaam mogelijk worden geïntroduceerd?

Duurzaamheid wordt een steeds belangrijkere eis. Om de introductie zo toekomstbestendig mogelijk te maken wordt er gekeken naar verschillende duurzame opties.

Met het beantwoorden van deze vragen wordt er gekeken naar hoe het op technisch en duurzaam vlak haalbaar is om een railgebonden voertuig te laten rijden op het huidige spoor. Het gaat hierbij om de technische inpassing van het voertuig op de huidige lijn. Hierbij is aangenomen dat de bereikbaarheid met behulp van openbaar vervoer omhoog moet en de huidige staat van de VSM lijn behouden moet blijven. Of dit daadwerkelijk het geval is valt buiten de scope van dit onderzoek. Deze vragen zullen voornamelijk beantwoord worden op basis van literatuuronderzoek. Daarnaast zullen ook deskundigen benaderd worden.

Om de hoofdvraag te beantwoorden wordt er in Hoofdstuk 2 in kaart gebracht wat er aan infrastructuur op de huidige VSM lijn ligt. Vervolgens wordt er in Hoofdstuk 3 ingegaan op verschillende mogelijkheden die er zijn voor railgebonden voertuigen. Hieruit wordt met behulp van een multi criteria analyse een voertuig gekozen dat het best geschikt is om te introduceren op de historische lijn. De hoeveelheid benodigde energie en de opties om zo duurzaam mogelijk te blijven zullen worden toegelicht in Hoofdstuk 4. In Hoofdstuk 5 wordt er gekeken naar referentieprojecten van het gekozen voertuig en de bijkomende aandachtspunten. De technische specificaties van het voertuig worden toegelicht in Hoofdstuk 6. In Hoofdstuk 7 zullen afwegingen en keuzes worden gemaakt met betrekking tot de invoering van het railgebonden voertuig. Denk hierbij aan de infrastructuur, aspecten van het voertuig, wat de energietoevoer zal zijn en hoe de dienstregeling eruit zal zien. De conclusies zullen in Hoofdstuk 8 worden gegeven.

2. Huidige infrastructuur VSM

In dit hoofdstuk zal de huidige infrastructuur van de VSM uitgelicht worden. Allereerst zal een globale omschrijving van de omgeving volgen waarna dieper ingegaan zal worden op de technische details, de veiligheid en de dienstregeling van de spoorlijn. De technische specificaties zijn mede verkregen door een gesprek dat met Ronald Bresser (hoofd infra bij de VSM) is gevoerd. Verder is ook gebruik gemaakt van de resultaten van het rapport van Ooijevaar (2021) over het toekomstbeeld van het openbaar vervoer.

2.1 Omgeving en infrastructuur VSM lijn

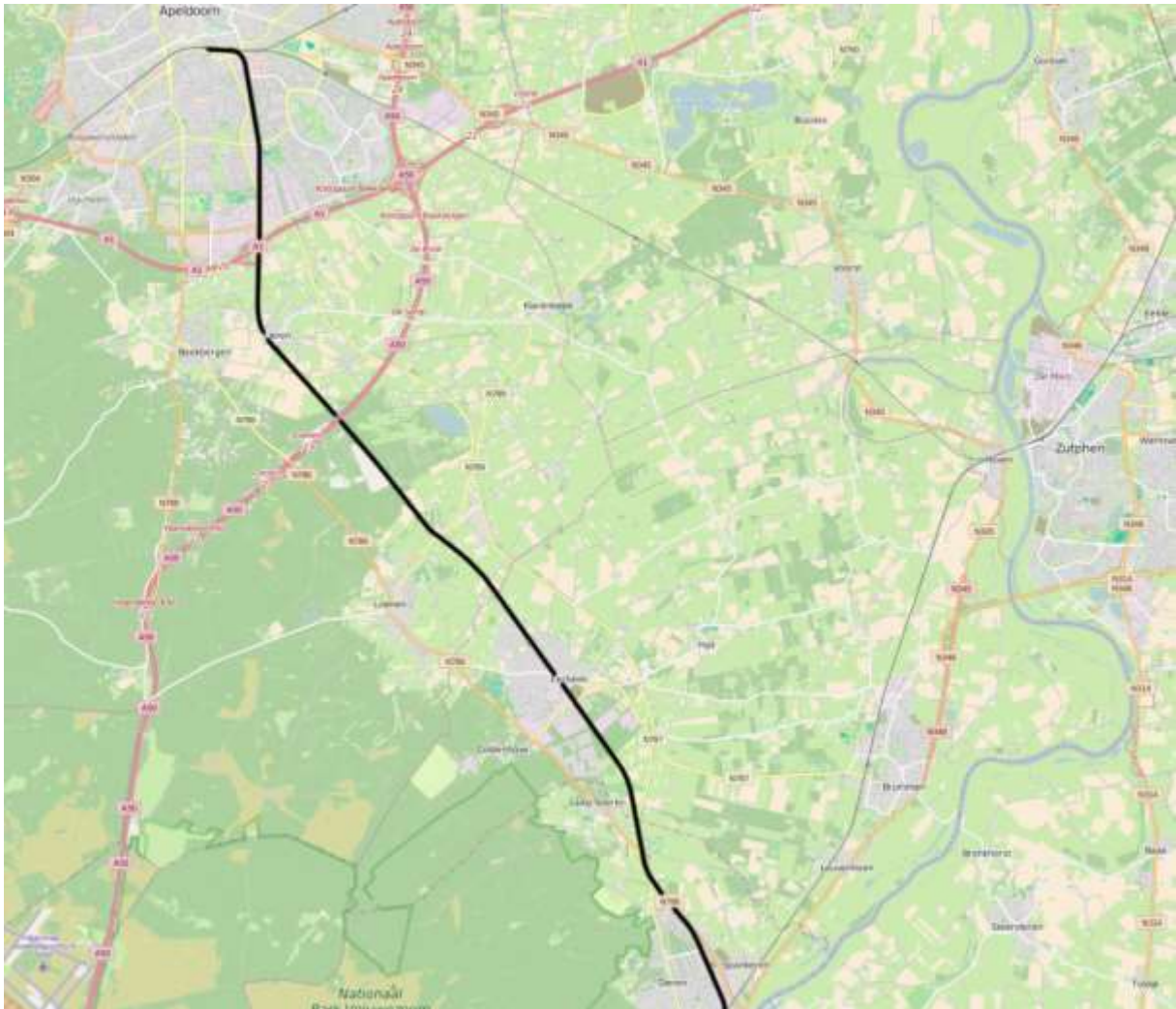
De Veluwsche Stoomtrein Maatschappij is een lijn in de provincie Gelderland die de stad Apeldoorn en het dorp Dieren met elkaar verbindt. De lijn wordt ook wel de ‘Koningslijn’ genoemd. De spoorlijn loopt door verschillende soorten landschappen, bossen en weilanden. En het traject bevat de stations Apeldoorn, Beekbergen, Loenen, Eerbeek en Dieren. Om een indruk te krijgen van de omgeving wordt er een klein overzicht per stads- en dorpskern gegeven.

Het aantal inwoners per stads- en dorpskern verschilt sterk. Een overzicht is weergegeven in tabel 1.

	Aantal inwoners
Apeldoorn	165 453
Beekbergen	4 955
Loenen	3 385
Eerbeek	9 630
Dieren	16 645

Tabel 1: Aantal inwoners stads- en dorpskernen (Centraal bureau van Statistiek, z.d.)

Apeldoorn is het grootst en heeft een directe treinverbinding naar Amersfoort, Deventer en Zutphen. Beekbergen, Loenen en Eerbeek zijn kleinere dorpjes die ten zuiden van Apeldoorn liggen, zijn alleen bereikbaar met de bus en hebben geen directe treinverbinding. Dieren heeft meer inwoners en heeft ook een treinverbinding. Deze ligt op de lijn Arnhem – Zutphen. De verbindingen tussen de dorpen, inclusief de VSM lijn, zijn weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: VSM lijn (OpenStreetMap, z.d.)

Om van Dieren naar Apeldoorn te reizen via Eerbeek, Loenen of Beekbergen met het openbaar vervoer moet men bus 43 nemen. De volledige rit hiervan duurt 53 minuten en de bus rijdt één keer in het half uur. Om te kijken wat voor mogelijkheden een railgebonden voertuig op de VSM lijn als alternatief voor openbaar vervoer kan bieden, wordt er gekeken naar de opbouw en verschillende technische specificaties van het traject.

2.1.1 Opbouw traject

De historische lijn is bijna op het hele traject enkelspoor. Dit houdt in dat er maar één trein op de spoorlijn kan rijden. Bij de stations is het spoor overal dubbelspoor. Dit geeft de treinen ruimte om waar nodig elkaar in te halen. Dit gebeurt voornamelijk wanneer er naast de huidige dienstregeling ook nog externe treinen rijden. Hierbij gaat het bijvoorbeeld over gezelschapsritten die buiten het standaard aanbod gereserveerd kunnen worden, of over onderhoudstreinen. Een schematisering van het traject waarin het dubbelspoor te zien is, is weergegeven in figuur 2. Verder is hier ook duidelijk het opstelterrein bij station Beekbergen zichtbaar.



Figuur 2: Schematisering VSM lijn (SporenplanOnline, 2021)

Een spoorlijn is opgedeeld in baanvakken. Het traject Apeldoorn – Dieren wordt gezien als één baanvak. Om veiligheid te waarborgen en treinen op het spoor te reguleren wordt het baanvak opgedeeld in blokken. Het baanvak van de VSM is opgedeeld in de volgende vijf blokken (Railverkeersleiding Noordoost Zwolle, Veluwsche Stoomtrein Maatschappij, 2002);

- Blok A: Apeldoorn – Apeldoorn VAM
- Blok B: Apeldoorn VAM – Beekbergen
- Blok C: Beekbergen – Loenen
- Blok D: Loenen – Eerbeek
- Blok E: Eerbeek – Dieren

2.1.2 Technische specificaties VSM lijn

Uit het informele gesprek met Ronald Bresser zijn verschillende technische details naar voren gekomen. Hij vertelde onder andere dat de rails in goede staat is. De afgelopen 20 jaar is er onderhoud aan de rails verricht. Daarnaast is het doel van de Veluwsche Stoomtrein Maatschappij om elk jaar een deel van het spoor van onderhoud te voorzien. De rails zelf slijt normaal gesproken niet snel. De houten

dwarsslagers onder de rails slijten het snelst. Deze worden tegenwoordig vervangen door betonnen dwarsslagers. Deze zijn minder kwetsbaar en gaan daardoor langer mee.

Om te kijken of de VSM lijn eventueel geschikt is voor een ander soort railgebonden voertuig worden er verschillende technische specificaties op een rijtje gezet. Hierbij is van belang om te kijken naar de benodigde eisen om een railgebonden voertuig in te voeren. Wanneer de spoorwijdte bijvoorbeeld een afwijkende maat heeft wordt de invoering een probleem. Daarnaast wordt er gekeken naar onderlinge afstanden van stations en de hoogte en lengte van perrons. Dit geeft inzicht in de eisen voor een voertuig of voor de aanpassingen die aan het spoor moeten worden gedaan. Verder wordt er gekeken naar wat de eigenschappen van de locomotieven en rijtuigen van de VSM zijn om zo te kijken of het mogelijk is om de voertuigen bijvoorbeeld gelijktijdig op de rails te laten rijden.

Technische specificaties;

- De spoorwijdte is 1435 mm. Dit is de maat die in Nederland wordt gehanteerd voor reguliere railgebonden voertuigen.
- De onderlinge afstand tussen de stations is als volgt;
 - Apeldoorn – Apeldoorn VAM 1.77 km
 - Apeldoorn VAM – Beekbergen 2.60 km
 - Beekbergen – Loenen 4.34 km
 - Loenen – Eerbeek 4.12 km
 - Eerbeek – Dieren 6.45 km
- De hoogte van de perrons is 38 cm. De standaard maat voor heavy rails volgens de EU richtlijnen is tegenwoordig 76 of 55 cm.
- De lengtes van de verschillende perrons zijn als volgt;
 - Beekbergen 120 m
 - Loenen 120 m
 - Eerbeek 140 m
 - Dieren 110 m
- Er bevindt zich geen treindetectie op het spoor. Het is van belang dat de voertuigen onderling van elkaar weten waar welke trein rijdt op welk moment. Om deze reden moet er nagedacht worden over het waarborgen van de veiligheid wanneer meerdere voertuigen gebruik maken van de rails.
- Op de gehele lijn wordt er op zicht gereden. Dit heeft invloed op de manier van het beveiligen van overwegen. Met 'op zicht' rijden wordt bedoeld dat er niet op seinen wordt gereden maar dat de bestuurder zelf de weg in de gaten houdt. Het CROW (2007) schrijft dat "voor een veilige afwikkeling van tramverkeer en kruisend auto- en langzaam verkeer moeten de zichtomstandigheden goed zijn: zowel van de tram op de nadering van kruisend verkeer als andersom." Met een snelheid van 40 km/h geldt een stopzichtafstand van 27 meter (CROW, 2007).
- Er zitten wissels bij de overgangen van enkelspoor naar dubbelspoor rails, om welke wissels het hier gaat is terug te vinden in de spoorbladen van het traject. In totaal zijn dit er 15.
- De kleinste boogstraal is groter dan 250 m (Bresser, persoonlijke communicatie, 2021). Dit heeft gevolgen voor het profiel van vrije ruimte dat aangehouden moet worden.
- Voor details van het profiel van vrije ruimte voor een traject met een boogstraal die groter is dan 250 meter, zie figuur 3. "Het profiel van vrije ruimte is een afgesproken ruimte om het spoor, waarbinnen zonder toestemming geen vaste voorwerpen mogen worden geplaatst." Haltes en perrons zijn hier een uitzondering op (Scheepmaker, 2004).

Om de veiligheid te waarborgen en te voorkomen dat de treinen botsen geeft de machinist altijd via een telecom door wanneer de trein vertrekt vanaf een station. Bij aankomst wordt dit wederom gedaan. Op die manier zijn de machinisten van elkaar op de hoogte waar de treinen zich op de rails bevinden.

Er worden verschillende seinen gebruikt en langs het spoor. De oude spoorlijn maakt gebruik van borden langs de rails. Deze geven bijvoorbeeld het baanvak, overwegen en maximale snelheden aan.

Overwegen:

Over de gehele lijn zijn in totaal 42 overwegen. Dit getal omvat ook alle kleine overwegen in de minder druk bewoonde gedeelten. In Apeldoorn en Dieren zijn de spoorwegen beveiligd met een AHOB (automatische halve overwegbomen) overweg met onder andere lichten. Dit is te verklaren aan het feit dat deze gebieden dichter bevolkt zijn. In Beekbergen, Loenen en Eerbeek is de rails bij het station dubbelspoor. In Loenen en Eerbeek zijn alle enkelsporige overgangen onbewaakt. In Dieren loopt de VSM lijn parallel aan de NS lijn en is daardoor ook beter beveiligd. Verder zijn veel overwegen die aan de VSM lijn zitten onbeveiligd. Dit komt onder andere doordat een enkelspoor lijn vanwege het wet lokaalspoor, waar de spoorlijn met implementatie van light rail voertuigen onder valt (Roodenburg, 2021), niet strenger beveiligd hoeft te zijn. Dit houdt in dat de trein bij verschillende overwegen zijn snelheid moet minderen tot 10 km/h. Een overzicht van wat bij welke spoorovergang de eisen zijn, is terug te vinden in Bijlage 2: Overwegen.

De maximale snelheid op de gehele historische lijn is 40 km/h. Dit komt door de civieltechnische omgeving waar de lijn op is gebouwd. Zo is de ondergrond niet sterk genoeg om een trein er met een hogere snelheid overheen te laten rijden en zijn verschillende delen langs de lijn te smal voor een hogere snelheid, denk aan bebouwing die dicht op de lijn staat. Mocht men de snelheid op de lijn willen verhogen “moet er praktisch een nieuwe spoorlijn gebouwd worden” (Bresser, persoonlijke communicatie, 2021).

Tot slot zijn ook de zichtlijnen voor de veiligheid van groot belang. Er mogen niet zomaar bomen of hekken langs de rails gebouwd worden waardoor vanuit de auto niet meer zichtbaar is of er een trein aan komt.

2.1.4 Dienstregeling

Er is sprake van een vaste dienstregeling waar de stoomtrein maatschappij zich jaarlijks aan houdt. Deze wordt ook gepresenteerd op de site van de VSM. De dienstregeling is wisselvallig gedurende het jaar. Het hoogseizoen is in de maanden augustus en juni, dan rijdt de stoomtrein gemiddeld zes dagen per week. Verder wordt er in de wintermaanden niet of nauwelijks gereden.

De VSM maakt onderscheid tussen verschillende soorten dienstregelingen en deze worden met kleuren aangeduid. De ritten die hebben plaatsgevonden in 2021 houden het volgende in;

- Groene rit; dit is de meest voorkomende en kan worden gezien als de ‘standaard’ rit. Hierbij rijdt de stoomtrein van Apeldoorn naar Eerbeek en weer terug. Daarbij wordt er langer gestopt in Beekbergen zodat toeristen een bezoek kunnen brengen aan het museum.
- Gele en rode rit; hieronder vallen speciale ritten en evenementen zoals de Sinterklaas-Pepernoten of Christmas expres.

De dienstregelingen verschillen per jaar. Op welke dagen welke dienstregeling voor het jaar 2021 gold, is terug te vinden in Bijlage 1: Specifieke dienstregeling. Naast deze tripjes, heeft de VSM ook een samenwerking met een externe partij die toeristen van boottochtjes voorziet. Hierbij kan men

opstappen bij station Dieren. Deze extra arrangementen hebben invloed op de dienstregeling. Zo zal de stoomtrein zowel bij Dieren als Beekbergen langer stil staan.

De dienstregeling wordt ongeveer drie maanden van tevoren vastgelegd. Dit kan verschillen omdat de VSM de mogelijkheid biedt om gezelschapsritten te reserveren. Verder is er ook onderhoud nodig aan de locomotieven en rytuigen waardoor er bijvoorbeeld rangeerlocomotieven op de rails staan die ook in de dienstregelingen dienen te worden meegenomen.

3. Railgebonden voertuigen

Het is van belang een weloverwogen keuze te maken in welk voertuig te introduceren op de VSM lijn. Een railgebonden voertuig heeft veel invloed op de infrastructuur en wanneer deze niet volwaardig gebruikt wordt, brengt dit veel kosten met zich mee. In tegenstelling tot een buslijn die niet meer wordt gebruikt kan een rails niet zomaar opgeheven worden. In dit hoofdstuk zal allereerst het verschil tussen de verschillende voertuigen worden toegelicht waarna vervolgens op basis van een multi criteria analyse gekozen zal worden welk voertuig het meest geschikt is om in te voeren op de oude spoorlijn.

3.1 Mogelijkheden

Er zijn verschillende soorten railgebonden voertuigen die in aanmerking komen om te introduceren op de historische lijn. De meest bekende zijn de trein, metro en de tram. Een ander voertuig dat tegenwoordig steeds vaker terug komt, is het light rail voertuig. In deze paragraaf zal er kort ingegaan worden op de verschillende soorten railgebonden voertuigen.

Trein:

Allereerst wordt er gekeken naar een trein. Er zijn verschillende soorten treinen. Treinen worden onder andere ingezet op de hoofdspoorwegnetten van de Nederlandse Spoorwegen, verbinden verschillende steden met elkaar en maken gebruik van conflictvrije banen. Hierop kan gereden worden met een stoptrein, sneltrein of een intercity. Hij kan grote afstanden afleggen en de haltes liggen vaak wat verder uit elkaar dan bij een tram of een metro. Verder maakt de trein ook gebruik van een bovenleiding via welke hij wordt aangedreven. Om te kijken of de mogelijkheid bestaat om een trein te laten rijden op de huidige VSM lijn, zijn verschillende technische specificaties opgesteld die een trein karakteriseren. Deze zijn te vinden in Bijlage 3: Specificaties railgebonden voertuigen. Hoe de trein zich tegenover de andere railgebonden voertuigen op de VSM lijn verhoudt, wordt geanalyseerd in de MCA in Paragraaf 3.2.

Tram:

Los van het hoofdspoorwegennet zijn er in de centra van steden, kleinere stroomnetten. Hier rijdt de tram op. De tram maakt net als de trein gebruik van een bovenleiding. Het net ligt op de openbare weg waardoor de tram tussen het andere verkeer rijdt. Trams komen in stedelijke gebieden voor en zorgen voor de lokale verbindingen. Verder rijdt een tram op zicht wat betekent dat er nauwelijks gebruik wordt gemaakt van seinen. Hier wordt alleen gebruik van gemaakt wanneer het zicht beperkt is. De technische specificaties van de tram zijn te vinden in Bijlage 3: Specificaties railgebonden voertuigen.

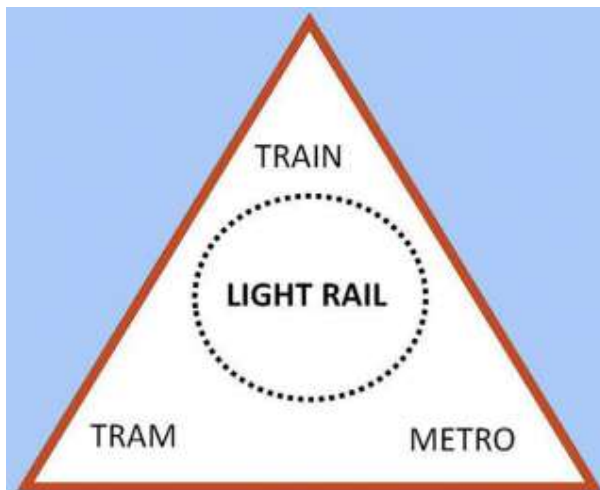
Metro:

Als derde wordt er gekeken naar de metro. De metro is een spoorwegvoertuig dat net als de trein gebruik maakt van een conflictvrije baan. Hierdoor rijdt hij vaak ondergronds en heeft hij geen last van het andere verkeer. De metro verbindt geen centra met elkaar zoals een trein, maar zorgt voor betere bereikbaarheid binnen de stad zelf. Hij rijdt regelmatig en heeft daardoor een hoge capaciteit. De

metro rijdt in tegenstelling tot een tram en trein niet op een bovenleiding maar wordt er gebruik gemaakt van een derde rails. Dit is een starre staaf die geplaatst wordt aan de zijkant of in het midden van de rails. Zie Bijlage 3 voor de technische specificaties van de metro.

Light Rail voertuig:

Tot slot wordt er gekeken naar een light rail voertuig. Een 'light rail voertuig' is een overkoepelende term voor een voertuig dat veel weg heeft van zowel een tram, een trein als een metro. Volgens Van der Bijl et al. (2018) is de positie van een light rail goed weergegeven in figuur 4.



Figuur 4: Definitie light rail (Van der Bijl et al. (2018))

Daarnaast stelt Van der Bijl et al. (2018) dat “een light rail voertuig een railgebonden vorm van openbaar vervoer is die wordt gebruikt op de schaal van het stadgewest en de stad. In tegenstelling tot trein en metro leent een light rail voertuig zich voor integratie tot op zekere hoogte in de openbare ruimte en, indien gewenst, voor menging met het reguliere verkeer” (p. 19).

Een light rail voertuig is dus net als een trein in staat om verschillende centra met elkaar te verbinden. Echter is hij veel lichter, heeft een lagere capaciteit en een beperktere maximum snelheid dan een trein. Net als een metro rijdt een light rail voertuig deels op een conflictvrije baan maar kan ook in de openbare ruimte rijden zoals een tram doet. Light rail voertuigen rijden voornamelijk op het tramspoor en wanneer ze worden ingezet op het heavy rail traject, moeten er verschillende aanpassingen worden gedaan (Van der Bijl et al., 2018).

3.2 MCA railgebonden voertuig

Om te kijken welk voertuig het best geschikt is voor de invoering op de VSM lijn, is er met behulp van de technische specificaties in Bijlage 3 een multi criteria analyse opgesteld. Deze wordt toegepast op de huidige infrastructuur van de historische VSM lijn en is weergegeven in tabel 2.

In de multi criteria analyse worden onderdelen gewogen op een schaal van 1 – 4 met behulp van plussen (+) en minnen (-). Hierbij heeft een + de waarde 1 en een - de waarde -1. De spoorwijdte weegt het zwaarst. Wanneer de spoorwijdte van het voertuig verschilt ten opzichte van de rails van de VSM lijn en de voertuigen die er al op rijden wordt het onmogelijk om het voertuig te introduceren. Verder wordt er waarde gehecht aan de optreksnelheid, het gewicht van het voertuig en de energiebron. Hoe lichter het voertuig, hoe minder energie er nodig is voor het voertuig om snelheid te maken en te behouden. Wanneer de optreksnelheid hoog is, doet het voertuig er minder lang over om van station naar station te gaan. Zeker wanneer er veel stations op de lijn zitten wordt hier veel waarde aan

gehecht. Verder wordt er ook gekeken naar of het voertuig is bestemd om de afstand tussen de perrons te overbruggen.

	Gewicht	Trein	Metro	Tram	Light rail
Spoorwijdte	4	++	++	++	++
Optreksnelheid	3	--	+	+	++
Afstand	2	+-	-	-	+
Gewicht	3	--	-	+	+
Energiebron	3	-	-	-	-
Max snelheid	1	++	+	+-	+
Eindscore		2	8	9	18

Tabel 2: MCA railgebonden voertuigen

De verschillende beoordelingen van elk aspect zullen apart worden toegelicht.

Spoorwijdte:

Allereerst is het van belang dat het voertuig past op het spoor wat er ligt. De VSM heeft de standaard Nederlandse spoorwijdte waardoor alle vier de soorten railgebonden voertuigen op de rails passen.

Optreksnelheid en afstand:

De afstanden tussen de stations liggen ongeveer tussen de twee en zes *km*. Voor een trein zijn deze afstanden te kort. Voor een metro en tram te lang. Omdat de afstanden niet dusdanig groot zijn en er veel overwogen op het traject zitten waar de snelheid geminderd moet worden, is de optreksnelheid van belang.

Gewicht:

Het gewicht van de trein is het grootst. De andere drie voertuigen hebben een vergelijkbaar gewicht. Omdat het spoor van de VSM lijn is ontworpen voor heavy rail voertuigen, waar een trein onder valt, oogt deze geschikt. Later in het onderzoek wordt er ingegaan op de mogelijke effecten van het invoeren van een light rail voertuig op de infrastructuur voor heavy rail voertuigen. Een voordeel van een licht voertuig in het algemeen is dat deze minder energie nodig heeft om in beweging te komen. Hierop is het criterium gesteld en daarom scoren een light rail en een tram hier het best.

Energiebron:

Verder is er geen bovenleiding aanwezig waardoor een tram en trein al snel uitgesloten worden. Om zo milieuvriendelijk mogelijk te blijven moet er gebruik gemaakt worden van een duurzame energiebron. Een derde rails, voor elektrische energietoevoer, is ook niet aanwezig op de lijn. Dit maakt dit aspect een punt van aandacht omdat dit veronderstelt dat er een nieuw stuk infrastructuur aangelegd moet worden of dat er gekeken moet worden naar een ander innoverend alternatief.

Maximum snelheid:

Een trein heeft de hoogst haalbare snelheid maar omdat de maximale snelheid op de VSM lijn 40 *km/h* bedraagt is de snelheid die de verschillende railgebonden voertuigen halen van ondergeschikt belang. Alle vier de genoemde voertuigen zijn in staat om deze snelheid te halen.

Met behulp van het gewicht en de gegeven waardes in de multi criteria analyse scoort het light rail voertuig het best. Op basis hiervan is er gekozen om deze te introduceren op de historische lijn van 22 kilometer.

4. Light rail voertuig

Omdat er is gekozen om een light rail voertuig te introduceren op de VSM lijn, wordt hier dieper op ingegaan. Zoals eerder genoemd is 'light rail' een brede en veel omvattende term. Zo valt de RandstadRail onder light rail maar zijn dit eigenlijk de Haagse trams en de metro's van Rotterdam die samen rijden. De lijn in Karlsruhe, in Duitsland, valt ook onder light rail. Hier rijdt een voertuig dat zowel gebruik maakt van heavy rail als van de tramlijnen. In het hoofdstuk referentieprojecten zal hier dieper op ingegaan worden. In dit hoofdstuk zal er eerst worden gekeken naar de technische aspecten die bij light rail in het algemeen voorkomen.

4.1 Constructief technisch

Er zijn verschillende punten waarbij bij de invoering van een light rail voertuig op een heavy rail rekening moet worden gehouden.

Slijtage:

Allereerst is het opvallend dat een light rail voertuig veel lichter is dan een trein. Door de invoering van het lichte voertuig slijt de rails, die normaalgesproken is bedoeld voor een heavy rail veel sneller. Dit komt door de grotere hoeveelheid trillingen die wordt veroorzaakt door een licht voertuig op een (dikke) rails. Doordat er ook over de rechte rails met een hogere snelheid gereden kan worden, slijt het oppervlak nog sneller. Hierbij moet ook gedacht worden aan de invloed die de trillingen, het snel optrekken en de remvertraging hebben op het passagierscomfort (TU Delft, 2021). Echter heeft dit geen problemen veroorzaakt bij zowel de RandstadRail als de lijn in Karlsruhe. Daarnaast geldt er een maximum snelheid op de VSM lijn waardoor dit niet van toepassing zal zijn. Volgens Willer (2021) liggen de voornaamste uitdagingen bij het gebruik van de juiste wielen op het spoor. Dit is ook terug gekomen bij de RandstadRail.

Wielen

De grootste uitdagingen van een light rail voertuig op een heavy rails is zoals net genoemd, het gebruik van de wissels (Willer, persoonlijke communicatie, 2021). Vanwege de kleinere wielen die tram-treinen hebben, om zo ook op het tramspoor te kunnen rijden, zijn deze te klein voor de wissels op het heavy rail spoor. Het is mogelijk om de wissels of de wielen onder het voertuig aan te passen. Omdat het light rail voertuig op de VSM lijn alleen op een heavy rails zal rijden, en niet op een tramspoor, wordt er voor gekozen om de wielen van het light rail voertuig aan te passen op de rails van de VSM lijn.

4.2 Light rail voertuigen

Er zijn veel verschillende soorten light rail voertuigen. Om een beeld te krijgen bij de verschillende mogelijkheden zullen er twee worden toegelicht. Voorbeelden van voertuigen die gebruikt worden zijn een Spurt, een Flirt, een Urbos 100 en een conventry very light rail. Het gaat hierbij om voertuigen die potentie hebben om op batterijen te rijden. Er zitten verschillende voor en nadelen aan de type voertuigen. Ieder voertuig heeft zijn eigen aanpassingen nodig om te kunnen functioneren op de VSM lijn. Omdat aan elk light rail voertuig dat wordt gekozen wel een paar aanpassingen nodig zijn voor de introductie op de VSM lijn en veel technische informatie over voertuigen vertrouwelijke informatie is, wordt er in dit rapport geen aanbeveling gedaan over het type voertuig. Er wordt een beeld gegeven over de verschillende mogelijkheden die er zijn.

4.2.1 Stadler GTW

Een GTW is een speciaal type light rail. Hierbij zit de aandrijving in het midden. Ieder rijtuig heeft aan de ene kant een verbinding met de aandrijving en aan de andere kant een draaistelsel. Een voorbeeld van een Stadler GTW die in Nederland rijdt is een Spurt. Een Spurt is een type GTW stelsel van de

Zwitserse fabrikant Stadler Rail. Er zijn verschillende varianten Spurts. Ze bestaan zowel in diesel als in elektrische vorm (Treinenweb, 2017). Dat maakt het voor dit onderzoek interessant om te onderzoeken. Een voorbeeld van een Spurt die op dit moment in Friesland rijdt is weergegeven in onderstaand figuur.



Figuur 5: Treinstel GTW type (Spurt) (Oosterhuis, 2006)

Het voordeel van de Spurt is dat de aandrijving in het midden vervangen kan worden. Het is mogelijk om een Spurt zowel op diesel als op batterijen te laten rijden.

De Spurts van Arriva zijn aangepast naar de Nederlandse perronhoogte. Echter was er op het traject in Groningen waar de Spurt was ingevoerd een probleem. De perronhoogtes waren niet allemaal even hoog. Hierdoor trad er schade op aan de uitschuif trede (Het treinenhoekje, z.d.).

4.2.2 Stadler FLIRT

De FLIRT is een voorbeeld van een treinstel dat wordt ingezet als sprinter en rijdt op de Nederlandse Spoorwegen. Het heeft een lage vloer met een uitschuifbare treeplank wat het toegankelijker maakt voor minder valide mensen. De FLIRT rijdt op elektrische stroom dat wordt geleverd door een bovenleiding. Ook deze treinstellen zijn gebouwd door de Zwitserse fabrikant Stadler Rail.



Figuur 6: Stadler Flirt (Stadler rail, z.d.)

4.2.3 Urbos 100

De Urbos 100, voorheen de Urbos 3, is een sneltram die op dit moment op de Uithoflijn in Utrecht rijdt. Het is een 7-delig voertuig met een 100% lage vloer. Het voertuig wordt elektrisch aangedreven door een bovenleiding maar kan ook remenergie genereren. Hierdoor kan hij sommige stukken zonder bovenleiding rijden. De sneltram rijdt op de Uithoflijn sinds 2019 en zal in de toekomst ook ingezet worden op de Nieuwegeinlijn (Provincie Utrecht, 2016). Doordat het voertuig erg licht is zijn er een aantal ontsporingen geweest als het gevolg van een botsing. Een voorbeeld hiervan is zichtbaar in figuur 8 (NOS, 2021).



Figuur 7: Urbos 100 op Uithoflijn (De Groot, 2021)



Figuur 8: Ontsporing Urbos 100 (NOS, 2021)

4.2.4 Coventry Very Light Rail

Het coventry very light rail voertuig is een heel licht zelfrijdend voertuig dat aangedreven wordt door batterijen. De ontwikkelingen hiervan zijn nog gaande en het voertuig wordt geïntroduceerd in 2024. Het doel is om het voertuig te laten rijden op de rails van de Birmingham tram en vervolgens ook in Coventry in te zetten. Ook dit voertuig zal een lage vloer hebben en zal geen bovenleiding nodig hebben omdat hij wordt aangedreven door batterijen (Mullen, 2019). Een voorbeeld van dit voertuig is zichtbaar in figuur 9.



Figuur 9: Coventry Very Light Rail (railway-technology, 2020)

4.3 Opslag

Het is van belang dat er een opslag plek komt voor de light rail voertuigen waar zij gestald en onderhouden kunnen worden. Het is gemakkelijk om deze te plaatsen bij een van de uiteinde stations waar ze ook opgeladen kunnen worden. Omdat Apeldoorn rondom het spoor wat drukker bebouwd is met perrons en infrastructuur van de NS, ligt het voor de hand om te kijken in de omgeving van Dieren. Aan het uiteinde van de lijn bij Dieren is geen bebouwing en ligt er op dit moment een open veldte.



Figuur 10: Omgeving Dieren (Google Maps, 2021)

Het mogelijke gebied ligt achter Hofstaete. Dit is een verzorgingstehuis. Naast dit open veldte ligt de provinciale weg de N348.

4.4 Logistiek

Het is van belang dat de VSM zo veel mogelijk in zijn huidige staat behouden blijft. Om dit te bereiken wordt gekeken naar hoe de dienstregeling van het light rail voertuig er zo veel mogelijk om heen gepland kan worden. Met het juiste energie gebruik wordt gekeken waar energiebronnen geplaatst moeten worden en hoe hiermee omgegaan moet worden betreft de dienstregeling.

Als het light rail voertuig met een hogere snelheid over de lijn wil, moeten de overwegen zwaarder beveiligd worden zodat een hogere snelheid aangehouden kan worden. In Bijlage 2: Overwegen staat een overzicht van alle overwegen.

4.5 Conclusie

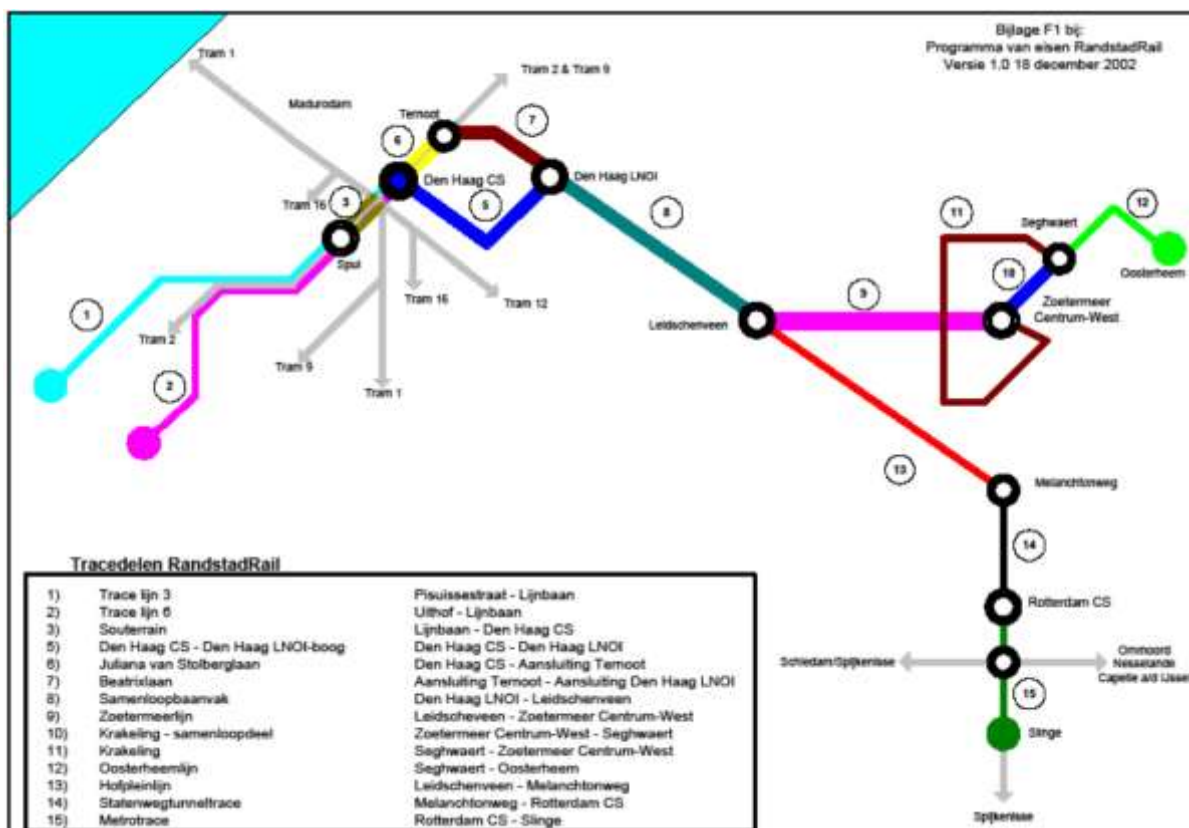
Light rail is een alomvattende term en is een verzamelnaam voor wat tussen een trein, metro of tram in ligt. Een light rail voertuig kan dus kenmerken hebben van alle drie de genoemde voertuigen. Een eigenschap die zowel positieve als negatieve gevolgen heeft is het lichte gewicht. Hierdoor kan de heavy rails waarop het voertuig rijdt sneller slijten. Verder verschillen de wielen van een light rail voertuig ten opzicht van die van een trein. Voorbeelden van lichte heavy rail voertuigen zijn een Spurt of een Flirt met beide hun eigen karakteristieken. Zo bevindt de aandrijving van een Spurt zich in het midden van het voertuig en is een Flirt toegankelijk voor minder valide mensen. Een voorbeeld dat meer richting de tram gaat is de Urbos 100. Het conventry very light rail voertuig is zelfrijdend en zal in de toekomst ook op trambanen ingezet worden.

5. Referentieprojecten

Om te kijken naar wat verschillende aandachtspunten zijn met het introduceren van een light rail voertuig wordt er ingegaan op verschillende referentieprojecten. Allereerst zal er gekeken worden naar de RandstadRail tussen Rotterdam en Den Haag. Vervolgens zal de lijn in Karlsruhe in Duitsland worden toegelicht.

5.1. RandstadRail

De RandstadRail is de eerste lijn in Nederland waarop het light rail voertuig is geïmplementeerd op oude infrastructuur. Het is de lijn die Rotterdam en Den Haag met elkaar verbindt en de voertuigen worden ook wel de 'interregiotrams' genoemd. Dit referentieproject is interessant omdat het lang heeft geduurd voordat de werking van het traject op orde was en er een aantal conflicten zijn geweest die inzicht geven in mogelijke uitdagingen. Het traject van de RandstadRail is weergegeven in figuur 11.



Figuur 11: Tracédelen RandstadRail (Koppenjan et al., 2008)

5.1.1. Aanpassingen infrastructuur

Voor het aanleggen van deze rail zijn verschillende aanpassingen aan de infrastructuur gedaan. Allereerst moest de RandstadRail losgekoppeld worden van het huidige spoorwegnet. Verder moest het spanningsstelsel aangepast worden. Deze is verlaagd van 1500 V naar 750 V. Ook zijn de wisselverbindingen verwijderd en zijn perrons verhoogd (Koppenjan et al., 2008). Dit was nodig omdat de RET in Rotterdam en de HTM in Den Haag gebruik maakten van verschillende soorten voertuigen die ook verschillen in vloerhoogte.

Verder moesten conflicten tussen de heavy en light rail voertuigen voorkomen worden. Om die reden is er een ongelijkvloerse kruising gemaakt waardoor ze elkaar kunnen passeren zonder ontwrichting van het systeem. Een andere ingreep om botsingen te voorkomen is de invoering van de automatische

remingreep. Hier is een metro-ATB systeem geïnstalleerd. Dit is een systeem waardoor seinen automatische waargenomen worden.

Daarnaast is de spoorbeveiliging aangepast waardoor een light rail voertuig nu automatisch remt wanneer deze de maximum snelheid van 70 km/h overschrijdt. Ook zijn er hekken langs de rails geplaatst en wordt er gebruikt gemaakt van het spoorbeveiligingssysteem die telt hoe veel trams er op een bepaald moment rijden (Koppenjan et al., 2008). Het signaleringssysteem dat gebruikt wordt is gebaseerd op de bezetting van bloksecties. Er wordt gebruik gemaakt van een blokstelsel omdat rijden op zicht niet mogelijk is. De bloksecties worden gescheiden door seinen. Een sein geeft de bevoegdheid aan voor het inrijden op het volgende blokgedeelte (Jongorius, 2014). De seinen die bij de RandstadRail worden gebruikt zijn te vinden in bijlage 3. Met de invoering van een light rail voertuig op een heavy rails, zoals ook op de VSM lijn, is het van belang om na te denken over de verschillende beveiligingssystemen die gebruikt kunnen worden.

5.1.2. Conflicten

Doordat er niet genoeg bewegingsruimte tussen de wielen en de rails was is het light rail voertuig in 2006 ontspoord. Dit vond plaats bij het station Forepark. De oorzaak van de ontsporing was een defecte wissel. De zogenaamde wisseltongen wezen de verkeerde kant op en hij was losgebroken van de wisselteller wat resulteerde in verkeerde informatie aan het beveiligingssysteem (Koppenjan et al., 2008). Ook ontstond op sommige delen spoorverkanting, dit is helling in het spoor, maar dit was niet de enige oorzaak voor de ontsporing. Onder andere het communicatiesysteem tussen de verkeersleiders en de bestuurders was niet goed. Daarnaast speelde een onterechte spoorbezetmelding een rol.

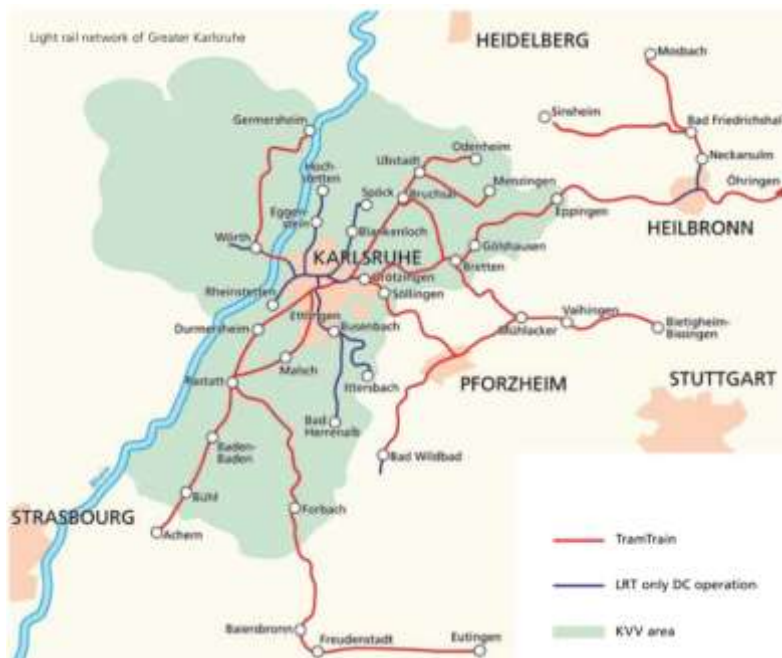
Het project is moeilijk op gang gekomen. Dit kwam voornamelijk door slechte communicatie tussen verschillende partijen en onduidelijkheden en aanpassingen over de verschillende eisen. Een punt waarin dit naar voren kwam was het profiel van vrije ruimte dat in het ene document onderdeel was van de hoofdtekst en in het andere document onderdeel van de bijlage (Koppenjan et al., 2008). Dit soort kleine onderdelen kunnen dus veel invloed hebben op het verloop van het project.

Om dit soort conflicten te voorkomen is het van belang dat er gekeken wordt naar de wissels en het beveiligingssysteem. Om projecten als deze goed op te starten en goed te laten verlopen is juiste communicatie tijdens het project van belang.

5.2. Karlsruhe

In Duitsland wordt gebruik gemaakt van twee verschillende railsystemen. Dit zijn de tramlijn of de light rail en het regionale netwerk, het Duitse Railsysteem (DB AG). Wanneer je als passagier het centrum in wilt, moet je normaal gesproken gebruik maken van de tram. Buiten het centrum wordt er gebruik gemaakt van de DB AG lijn.

In Karlsruhe hebben ze hier een oplossing voor bedacht. Hier rijden op dezelfde lijn zowel light als heavy rail voertuigen. Karlsruhe is de eerste waar dit tot uitvoering is gebracht. De lijn is zichtbaar in figuur 12. De resultaten van dit project zijn zeer positief. Mede hierdoor is het invoeren van een light rail voertuig hedendaags internationaal populair geworden (Zuiderveen, 2009). Omdat dit ook bij de VSM lijn het geval zal zijn, is dit een interessant project om verder toe te lichten.



Figuur 12: Traject tram-train Karlsruhe (AVG, 2015)

5.2.1. Aandachtspunten

De punten waar bij de lijn in Karlsruhe naar zal worden gekeken zijn; de sterkte van de voertuigen, de elektrificatie, perronhoogte en de seinen.

Sterkte voertuigen:

Er zitten verschillen tussen de heavy en light rail voertuigen met ieder zijn eigen voor- en nadeel. Dit betreft onder andere het gewicht en de daarbij komende sterkte van een voertuig. Een light rail voertuig is veel lichter dan een conventioneel spoorvoertuig waardoor deze minder sterk is en gevoeliger is voor botsingen (Willer, persoonlijke communicatie, 2021). Dit is ook veel terug gekomen in Utrecht bij de Urbos 100. Hierbij zijn verschillende voertuigen van de lijn gedrukt door botsingen met light rail voertuigen en busjes.

Technisch is het niet haalbaar om de lage massa van een light rail voertuig te behouden en die even botsveilig te maken als de conventionele treinen. Om deze reden is er een risicobeperkingsstrategie nodig om de risico's voor een botsing zo laag mogelijk houden (Novales et al., 2002). Met de invoering van een light rail voertuig op de VSM lijn en de huidige stoomtreinen die er rijden, zal dit een punt zijn waar goed over nagedacht moet worden.

Elektrificatie:

Omdat een voertuig gebruik maakt van twee verschillende soorten netwerken komt er een extra uitdaging bij kijken. Dit is het elektrificatiesysteem. Op het tramspoor is de spanning gelijk aan 750 V, op de DB AG lijn is deze gelijk aan 1500 V. Er is een oplossing gezocht om een connectie te vinden binnen deze twee verschillende tracks. Dit is een elektronisch stroomsysteem geworden wat bestaat uit een transformator en een gelijkrichter wat onderdeel is van het voertuig. Deze verlagen de 1500 V naar 750 V en voeden de gelijkstroomapparatuur van het voertuig. De machinist moet het voertuig in de neutrale stand zetten waarna het vervolgens automatisch de nieuwe spanning detecteert en zich daaraan aanpast (Novales et al., 2002). Dit wordt ook wel het dual-system voertuig genoemd. Dit systeem is voor het eerst gelanceerd in 1991 (Drechsler, 1996).

Perronhoogte:

De perronhoogtes van heavy rail stations verschillen met die van de trams. In Karlsruhe is er voor gekozen om een voertuig te kiezen met een gemiddelde vloerhoogte. Hierdoor is bij sommige tramhaltes de toegankelijkheid nog steeds niet goed voorzien. Sommige perrons zijn deels opgehoogd wat de lengte van het perron verkort. Een voorbeeld hiervan is zichtbaar in figuur 13.



Figuur 13: Verhoogd perron Karlsruhe (Willer, 2018)

Op de VSM lijn hebben de perrons dezelfde hoogte. Hierdoor zullen deze uitdagingen niet van toepassing zijn op de lijn. Het is wel van belang dat de vloerhoogte van de voertuigen die op de VSM lijn gaan rijden, aansluiten op het perron.

Seinen:

Ondanks de verschillende soorten voertuigen rijden deze wel op dezelfde soort seinen. Dit is nodig om te voorkomen dat de voertuigen op elkaar klappen. Verder is de marge van het treinsysteem van belang voor de veiligheid (Willer, persoonlijke communicatie, 2021). Dit is ook iets om rekening mee te houden bij de VSM lijn. Twee verschillende soorten voertuigen kunnen op dezelfde lijn niet op verschillende soorten seinsystemen rijden.

5.3. Conclusie

Uit de referentieprojecten zijn verschillende aspecten naar voren gekomen. Zo blijkt uit het project van de RandstadRail dat goede communicatie een vereiste is om een project in goede banen te leiden. Verder zijn de wielen van het voertuig in combinatie met de juiste wissels een punt van aandacht om conflicten te voorkomen. Belangrijke aandachtspunten voor de VSM lijn, wat onder andere terug is gekomen bij de lijn in Karlsruhe, zijn de complicaties die kunnen voorkomen bij de verschillende perron hoogtes en de verschillende sterktes van de voertuigen.

6. Energietoevoer

Voordat er ingegaan wordt op de verschillende mogelijkheden en afwegingen die gemaakt zullen worden bij de VSM lijn, zal er gekeken worden naar de verschillende mogelijkheden voor de energietoevoer van het te introduceren voertuig op de VSM lijn. De energie die gebruikt wordt voor het aandrijven van de light rail voertuigen kan van een externe bron komen, zoals een derde rail of een bovenleiding. Beide zijn op de VSM lijn niet aanwezig en om de waarde van de historische lijn te waarborgen is er besloten deze ook niet aan te leggen. Om deze reden wordt er gekeken naar een ander soort energiebron. Er zijn verschillende mogelijkheden voor de energietoevoer van een light rail voertuig. Om het voertuig zo toekomst bestendig mogelijk te maken wordt er nagedacht over een duurzame energiebron. Verschillende mogelijkheden voor energietoevoer zijn inductie voeding, biodiesel, waterstof, batterijtreinen, supercondensator en het vliegwiel (Van Berge Henegouwen et al., 2016). De verschillende soorten energietoevoer zullen kort worden toegelicht.

6.1. Soorten energietoevoer

Inductie voeding:

Inductieve vermogensoverdracht is een vorm van draadloos aandrijven. Het omvat de toepassing van een magnetisch veld en inductieve technieken om energie over te brengen over relatief korte afstanden, meestal minder dan 1 meter (Jang, 2018). Met deze vorm van energietoevoer zijn er verschillende uitdagingen. Er moet bijvoorbeeld een 'zender eenheid' geplaatst worden die de stroom levert. Bij bussen zit deze vaak onder de grond, wanneer dit bij een rails geplaatst moeten worden zal dit veel kosten met zich mee brengen (Jang, 2018). Verder is deze vorm van energietoevoer nieuw en nog niet veel gebruikt. Om deze reden is het niet aannemelijk om deze energievoorziening in werking te stellen voor de VSM lijn.

Biodiesel:

Biodiesel wordt geproduceerd uit organisch materiaal, waardoor het gezien kan worden als groene energie, en is een alternatief voor de brandstof die wordt geproduceerd vanuit fossiele brandstoffen zoals olie en gas. Om deze reden is het duurzamer dan de fossiele brandstoffen. Een probleem dat kan optreden bij het gebruik van biodiesel is het residu in de brandstof dat verstoppingen in injectoren kan veroorzaken. Verder is hier nog weinig ervaring mee in de praktijk (Van Berge Henegouwen et al., 2016).

Om de VSM lijn in het algemeen te verduurzamen kan er in overweging worden genomen om de stoomtreinen van de VSM lijn op biodiesel te laten rijden in combinatie met kolen. Op dit moment rijden deze treinen op kolen wat slecht is voor het milieu. Het rijden op biodiesel is groener en geeft nog wel de toeristische waarde waar de Veluwsche stoomtrein maatschappij veel waarde aan hecht. Omdat hier nog geen ervaring mee is vereist dit wel nader onderzoek.

Waterstof:

Verder zijn er de afgelopen jaren verschillende ontwikkelingen geweest in zowel waterstof als brandstof. Waterstof is volledig CO₂-vrij en is daarom een duurzame optie. Verder is het enige bijproduct dat wordt gemaakt bij de opwekking van deze energie, water (Toyota Nederland, 2021). Een groot voordeel van waterstof voertuigen is het bereik wat het voertuig heeft zonder al te lang hoeven op te laden. Daarnaast zijn de kosten op dit moment nog erg hoog maar deze dalen gestaag. Er zijn echter ook een aantal nadelen. Dit zijn bijvoorbeeld de betrouwbaarheid van het systeem en de investeringen die gedaan moeten worden op het gebied van de infrastructuur, productie, opslag en distributie van de waterstof en waterstof treinen (Van Berge Henegouwen et al., 2016). Om deze reden

is het voor alsnog geen reële optie om het voertuig te laten aandrijven op waterstof. Echter wordt waterstof wel gezien als een goede mogelijkheid voor de toekomst.

Verder zijn er verschillende onderzoeken gaande naar het gebruik van waterstofauto's en treinen. Op dit moment doet het Dreamteam 'Eco-Runner' van de Technische Universiteit Delft onderzoek naar een waterstof auto. Een ander voorbeeld van een waterstoffrein waar op dit moment mee getest wordt is de Coradia iLint Regional Train. Deze trein wordt al toegepast in Duitsland en getest voor de invoering ervan in Nederland zijn bezig in Groningen. De testritten worden gebruikt om de dienstregeling te optimaliseren. Het doel is om de treinen in 2024 op het spoor te introduceren (Van Gompel, 2020).

Batterijtreinen:

Batterijtreinen maken gebruik van een accu die de trein aandrijft. Deze batterij heeft een noodzakelijke omvang en een bepaald vermogen. Dit is afhankelijk van het gewicht van het voertuig en de afstand die deze moet afleggen. Verder is er een vereiste laadinfrastructuur nodig om de batterij op te laden, deze is veel verder in ontwikkeling dan die voor waterstof en komt in de huidige infrastructuur al veel voor. De aandrijving zou via bovenleidingen waardoor de trein deels geëlektrificeerd is, of door middel van bijvoorbeeld laadpalen, gerealiseerd kunnen worden. Een nadeel van het gebruik van een batterij is het gewicht. Wanneer de benodigde omvang groot wordt zal de batterij ook erg zwaar worden. Verder heeft een batterij veel tijd nodig om op te laden voor een relatief beperkte afstand.

Afgelopen september heeft het bedrijf Alstom in Duitsland demonstraties gegeven van de Coradia-batterij trein. Deze trein kan zowel op een bovenleiding als op accu's rijden. Een groot deel van de lijnen in Duitsland waarop dieseltreinen worden geëxploiteerd, zijn relatief kort. Om deze reden is het mogelijk om op deze lijn batterijtreinen in te zetten. Er hoeven namelijk geen grote aanpassingen aan de bestaande infrastructuur te worden uitgevoerd. Het doel is om deze treinen vanaf 2023 in dienst te stellen (Clinnick, 2021).

Supercondensator:

Een supercondensator is vergelijkbaar met een batterij maar kan in hele korte tijd, grote energiehoeveelheden opslaan. Een nadeel is dat, in tegenstelling tot batterijen, de accu van een condensator geen constante spanning kan leveren maar lineair af neemt met de lading. Daarnaast werkt een supercondensator voornamelijk bij trams en metro's omdat deze kortere afstanden afleggen dan een trein. Voor treinen is het werkende gebruik hiervan ook nog niet aangetoond. Volgens Dirk Jan Brakel in het onderzoek van Roodenburg (2021, p.48) kan men maximaal vier kilometer rijden op een supercondensator. Voor het traject tussen Apeldoorn en Dieren brengt dit complicaties met zich mee.

Vliegwielen:

Een vliegwielen kan gebruikt worden voor het opslaan van de remenergie die vrij komt wanneer het railgebonden voertuig remt (Van Berge Henegouwen et al., 2016). Dit kan goed samen in combinatie met een van de andere duurzame energiebronnen. Om deze reden wordt er besloten om een vliegwielen te plaatsen in het light rail voertuig dat op de VSM lijn zal gaan rijden. Echter zal voor de implementatie hiervan nader onderzoek gedaan moeten worden.

6.1.1. Conclusie

Op basis van de analyse en de conclusie in het onderzoek van Van Berge Henegouwen et al. (2016) wordt er een conclusie getrokken voor de te gebruiken energietoevoer. De gebruikt MCA is weergegeven in figuur 14.

	Inductieve voeding	LNG	BioDiesel	Waterstof	Batterijtrein met partiele elektrificatie	Super conductor	Vliegwiel
CO ₂ reductie t.o.v. dieseltrein	+	0	-	+	+	+	0
Theoretische haalbaarheid	-	+	+	+	+	-	+
Praktijk ervaring regionaal vv	-	-	0	-	-	-	-
Rijperformance t.o.v. dieseltrein	0	-	0	+	0	+	0

Figuur 14: Overzicht stand van de techniek (Van Berge Henegouwen et al., 2016)

De rijperformance ten opzichte van de dieseltrein zal op de VSM lijn niet van groot belang zijn omdat de maximale snelheid op de lijn 40 km/h bedraagt. Een waterstof of batterij trein is op basis van de MCA van Van Berge Henegouwen et al. (2016), het meest toekomstbestendig. Omdat men al verder is met de ontwikkeling van batterijtreinen en de infrastructuur dit beter toe laat, wordt er voor gekozen om een batterijtrein in te introduceren op de VSM lijn.

6.2. Benodigde capaciteit

Om te kijken hoeveel energie de trein nodig heeft per afstand van station naar station, is er een krachten balans opgesteld. Hiermee kan de benodigde capaciteit van de batterij bepaald worden en zo ook hoe dit de infrastructuur van de VSM lijn beïnvloedt. De gebruikte balans is terug te vinden in

Bijlage 5: Krachtenbalans. Er wordt aangenomen dat de maximale snelheid 40 km/h is en dat het light rail voertuig tussentijds geen vaart hoeft te minderen en weer opnieuw moet optrekken. De resultaten zijn sterk afhankelijk van de orde van grootte van de rolweerstand. Dit heeft zo veel invloed op het verloop van de powercurves dat hier meer onderzoek naar moet worden gedaan. Later, in paragraaf 6.2.1. zal er een benadering worden gedaan voor de benodigde hoeveelheid energie.

6.2.1. Laadinfrastructuur

Er wordt gekeken naar de invoering van een batterijtrein. Om te kunnen rijden moet deze opgeladen worden. De ideale situatie zou zijn als de trein alleen aan het begin en eind van het traject opgeladen hoeft te worden zodat er tussentijds geen vertraging optreedt. Om te kijken of dit haalbaar is wordt er gekeken naar de oplaadsnelheid van verschillende laadpalen. Voor deze laadinfrastructuur wordt gebruik gemaakt van het aanbod van Heliox.

Heliox biedt producten aan die bestemd zijn voor E-trucks, elektrische auto's of voor marine gerelateerde voertuigen. Om te benaderen wat ongeveer het benodigde vermogen voor een light rail voertuig is wordt een auto als uitgangspunt genomen. Een auto weegt ongeveer 1200 kilogram (Seijlhouwer, 2021) en bereikt een hogere snelheid dan een light rail voertuig op de VSM lijn zal doen, ongeveer 110 km/h ten opzichte van 40 km/h. Wanneer er een constante snelheid bereikt wordt is de versnelling gelijk aan 0. Hierdoor zal het benodigde vermogen alleen afhangen van P_{roll} , zie

Bijlage 5: Krachtenbalans. Deze hangt af van de massa van het voertuig, de snelheid die wordt bereikt en de rolweerstand. De rolweerstand van staal op staal zijn veel kleiner dan die van rubber op asfalt, wat bij een auto het geval is. Dit komt onder andere doordat het contact oppervlak van de wielen op de grond veel kleiner is in het geval van de trein dan van de auto. Er wordt aangenomen dat de massa van de trein 40 keer groter, de rolweerstand 0.1 keer groter en de snelheid 0.4 keer groter is dan de auto. Met deze gegevens kan bepaald worden dat het benodigde vermogen voor het light rail voertuig dat dezelfde afstand af legt een factor 1.6 keer groter wordt om een afstand van 122 kilometer af te leggen (Heliox, z.d.). Dit geeft een vermogen van 60 kW. Voor de afstand van de VSM lijn, 22 kilometer geldt dan een vermogen van 15 kW om een enkele rit af te leggen. De producten van Heliox laden 50 kW volledig op binnen één uur (Heliox, z.d.). Het light rail voertuig heeft dus ongeveer 20 minuten nodig om op te laden voor een rit van Apeldoorn naar Dieren.

Om zo energieneutraal mogelijk te zijn wordt er gekeken of de gebruikte hoeveelheid stroom ook *terug gegeven* kan worden aan het elektriciteitsnetwerk. Is er bijvoorbeeld ruimte rond de gemeente Dieren en Apeldoorn om groene stroom op te wekken en zijn hier al mogelijke plannen voor? Om hier dieper op in te kunnen gaan wordt er gekeken naar mogelijke vormen voor de opwekking van energie en naar de omliggende omgeving.

6.3. Mogelijkheden energieopwekking

De meest voorkomende mogelijkheden voor het opwekken van energie zijn zonne-, en windenergie. De hoeveelheid energie die deze kunnen opwekken en de huidige plannen die hiervoor in Gelderland al op tafel liggen zullen kort worden toegelicht.

6.3.1. Zonne-energie

Allereerst wordt er gekeken naar zonne-energie. Eén zonnepaneel levert 7.13 kWh aan energie op per dag (Vattenfall, z.d.). Wanneer er 30 ritjes gereden zouden worden per dag, heeft men 450 zonnepanelen van 1 x 2 meter nodig. Dit geeft een totaal oppervlak van 900 x 450 meter. In de buurt zijn niet zo veel daken geschikt en beschikbaar om die te beleggen met zonnepanelen. Daarbij zijn de stakeholders nog niet in kaart gebracht. Een andere optie is om onbebouwde grond te beleggen met zonnepanelen. Echter neemt dit veel waardevol land oppervlakte in gebruik. Een andere optie waar naar gekeken wordt is windenergie.

6.3.2. Windenergie

Een windmolen levert binnen één rondje 20 kWh op. Dit is beduidend meer dan een zonnepaneel kan leveren. Echter waait het niet altijd waardoor de opbrengst niet maximaal is. Het *verlies* hiervan is ongeveer 50%. Dit geldt echter alleen voor grote windmolens met een tiphoogte van 250 meter of meer (Eenvandaag, 2021). In totaal levert een windmolen, afhankelijk van de plek en de hoogte, ongeveer 6,5 miljoen kWh aan energie op (User, 2020).

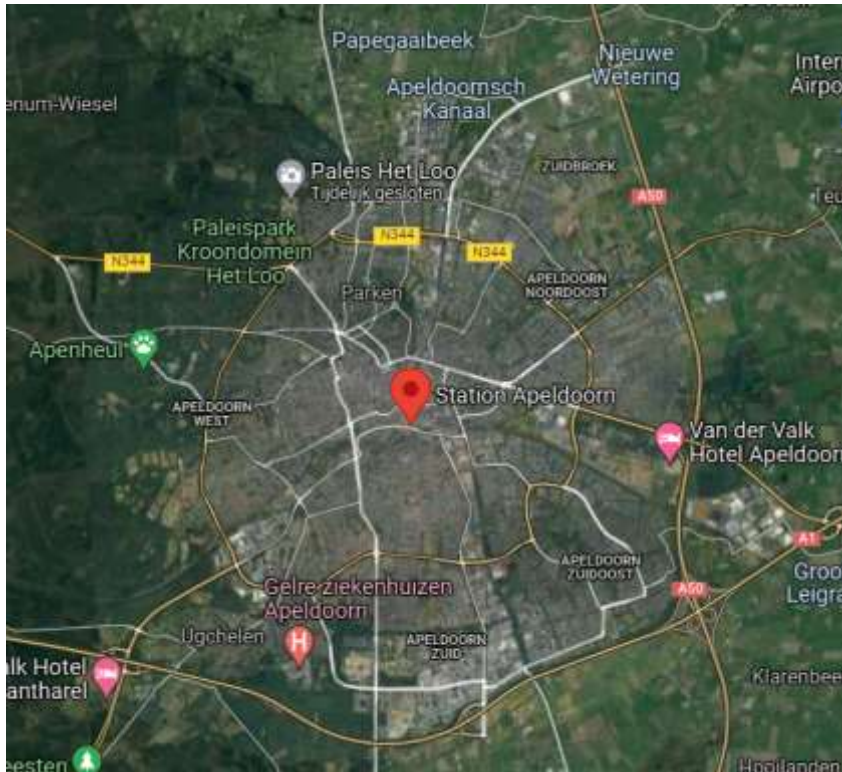
Windmolens moeten op een bepaalde minimale afstand van elkaar staan. Vuistregel is; vijf keer de diameter van de rotor. Een kleinere onderlinge afstand heeft tot gevolg dat de windturbines niet optimaal profiteren van de wind. Ze mogen niet in elkaars luwte staan (Tegenwind Zijderveld, 2019).

6.3.3. Infrastructuur provincie Gelderland

Voor de opwekking van energie wordt als eerste gekeken naar de gebieden rondom Apeldoorn en Dieren. Dieren ligt ten oosten van de Veluwe en ten westen van rivier de IJssel.

Apeldoorn is onderdeel van de zogenaamde 'stedendriehoek' samen met Deventer en Zutphen. Daarnaast is Apeldoorn een belangrijk werkgelegenheidscentrum voor dit gebied. Verder staat Apeldoorn bekend om zijn groene stadsparken (Gemeente Apeldoorn, z.d.).

Het station Apeldoorn, wat het eind station is van de VSM lijn, ligt midden in het centrum. Om deze reden is er geen ruimte voor eventuele groene voorzieningen, of deze zouden ver buiten het stadscentrum geplaatst moeten worden zoals te zien is in figuur 15. Om deze reden wordt er gekeken naar een groter gebied en het gebied rondom Dieren. In figuur 16 is de omgeving rondom Dieren weergegeven.



Figuur 15: Omgeving Apeldoorn (Google Maps, z.d.)



Figuur 16: Omgeving Dieren (OpenStreetMap, z.d.)

Aan de oostkant van Dieren, over de IJssel, liggen verschillende weilanden. Deze hebben een oppervlakte van ongeveer 36 vierkante kilometer. Dit is een gebied waar mogelijk windmolens geplaatst kunnen worden voor de energietoevoer van de batterij van de trein. Op de gehele route langs het spoor liggen veel open weilanden die op het eerste oog een geschikte locatie lijken voor windturbines. De provincie heeft zelf ook verschillende onderzoeken gedaan om zo groen mogelijk te worden. Verschillende bevindingen zullen worden toegelicht.

De provincie Gelderland heeft verschillende ideeën over wat wel en wat geen geschikte plekken zijn voor windmolens. Ten westen van Dieren, in de Veluwe wordt als optie gezien om eventueel windmolens te plaatsen. Echter zal dit hoogstwaarschijnlijk invloed hebben op de dieren in de omgeving. Om dit uit te zoeken is een ecologisch onderzoek aangekondigd. De belangenafweging tussen de natuur en de energietransitie zal gemaakt moeten worden (Bijlsma, 2020). Na een brede verkenning is geconcludeerd dat de Veluwe niet geschikt is voor windmolens omdat deze het leefgebied van een beschermde roofvogel zouden beperken. Om deze reden moet er worden uitgeweken naar ander gemeenten. Verder wordt er gesteld dat er beperkingen gelden tot aan 8 kilometer van de Veluwe verwijderd (Barneveldse Krant, 2021). Dit heeft invloed in de omgeving die mogelijk geschikt is voor windmolens.

Verder wordt er gekeken naar de gemeente Bronckhorst. Deze ligt ten oosten van Dieren. De gemeente heeft een ambitieus energieplan wat zowel zonnepanelen als windturbines bevat. Verder wonen hier nauwelijks mensen en is er veel open vlakte. In de gemeente is onderzoek gedaan naar hoe de bewoners over de komst van windmolens denken. Dit is relatief positief maar men denkt ook aan de omgeving. Om deze reden is er een maximum hoogte van 150 meter aan de windmolens gesteld. Daarnaast geldt een ruimte van minimaal tien keer de as-hoogte rondom de dorpskernen waar geen windmolens geplaatst mogen worden (Overheid.nl, 2021).

6.3.4. Stroomnet

Een bijkomende uitdaging is om de opgewekte energie toegang te geven tot het stroomnet. Op dit moment is er op een aantal gebieden al een tekort aan transportcapaciteit. Wanneer er grotere hoeveelheden stroom worden opgewekt moet dit toegang hebben tot het energienet. Om deze reden moet de transportcapaciteit op het elektriciteitsnetwerk verhoogd worden (Heller, 2021). Tot de tijd dat de capaciteit van het netwerk verhoogd is, wordt er gezocht naar tijdelijke oplossingen.

Verder moet er nagedacht worden over de opslag van de opgewekte energie. De opwek en de vraag lopen niet gelijk. Daarnaast is de opwek ook seizoensgebonden, dit vereist kostbare apparatuur om de energievraag op te slaan. Dit is onder andere nodig omdat de beschikbare capaciteit om energie, die te veel is opgewekt, terug te leveren een maximum heeft bereikt in Gelderland (Liander, 2021).

6.4. Conclusie

De benodigde energie voor het aandrijven van het light rail voertuig kan komen van verschillende bronnen. Er is op de VSM lijn geen bovenleiding aanwezig en om de waarde van de VSM lijn te waarborgen wordt deze ook niet aangelegd. Daarom wordt in dit onderzoek gekozen voor een batterij. In tegenstelling tot waterstof is de infrastructuur op dit moment daar al beter geschikt voor. Daarnaast zal er gekeken worden of er gebruik gemaakt kan worden van een vliegwiel. Op deze manier kan remenergie gegenereerd worden waardoor er zo min mogelijk energie verloren gaat. Als duurzame energiebron is er gekeken naar de plaatsing windmolens en zonnepanelen. De hoeveelheid energie die opgewekt en ruimte die in beslag wordt genomen verschilt sterk. In Hoofdstuk 7 afweging en aanpassingen zal een afweging voor deze keuze gemaakt worden.

7. Afweging en aanpassingen

In dit hoofdstuk zullen verschillende afwegingen worden gemaakt met betrekking tot het invoeren van een light rail voertuig op de VSM lijn. Er zal gekeken worden naar de veiligheid, mogelijkheden voor aanpassingen aan de infrastructuur en vereisten die nodig zijn bij het in te voeren voertuig.

7.1. Veiligheid

Er is geen treindetectie op de VSM lijn. Voor de veiligheid is het van belang dat treinen onderling van elkaar weten waar op het spoor een trein zich bevindt. Een beveiligingssysteem kan qua kosten snel omhoog lopen (Willer, persoonlijke communicatie, 2021). Op de VSM lijn wordt gebruik gemaakt van trein separatie. Dit houdt in dat een trein pas mag vertrekken als het te betreden baanvak leeg is. Anders gezegd; de tweede trein mag pas vertrekken van het eerste station als de eerste trein is aangekomen bij het tweede station. Het telecomsysteem waarborgt deze separatie. Via de telecom wordt doorgegeven als een trein is aangekomen bij een station.

Het is mogelijk om bij het invoeren van het light rail voertuig dit systeem te blijven gebruiken. Echter zal het gebruik van de lijn niet overzichtelijker worden. Wanneer dit systeem in gebruik blijft wordt er druk gelegd op de machinist. Het is van belang dat hij weet of een baanvak vrij is of niet. Omdat het lastiger te waarborgen is wanneer er meerdere voertuigen tegelijk op de VSM lijn rijden wordt er nagedacht over alternatieven. Voor seinen is het van belang dat ze op hetzelfde systeem rijden zodat machinisten niet in de war kunnen raken (Willer, persoonlijke communicatie, 2021).

Verschillende voorbeelden en manieren van communicatie zijn;

- Token; dit is een ouderwets systeem dat gebruik maakt van een fysiek object dat de machinist moet zien voordat hij een bepaald stuk enkelspoor oprijdt. Dit is heel ouderwets en wordt nauwelijks meer gebruikt.
- Cabinesignalering; dit is een soort communicatie die via signalen binnen de cabine gaat. Hierdoor zijn signalen langs het spoor niet nodig. Deze manier van signalering is wel erg kostbaar. Een voordeel hiervan is dat de historische waarde van de VSM behouden blijft (Roodenburg, 2021).
- Bloksignalering; hier is gebruik van gemaakt bij de RandstadRail. Het is een veilig en duidelijk systeem wat ook goed zou kunnen werken op de VSM lijn. Echter gaat de waarde van het historische aspect hierdoor achteruit. De seinen waar nu gebruik van wordt gemaakt zouden vervangen moeten worden (Jongerijs, 2014).

De keuze die gemaakt moet worden gaat tussen de kosten en de waarde van de VSM lijn. In samenwerking en overleg met de VSM lijn zal hier een keuze op gebaseerd moeten worden.

7.1.1. Overwegen

Zoals eerder vermeld is het door de omliggende omgeving niet mogelijk om de snelheid op de lijn te verhogen. Wel zijn er nog verscheidene overwegen waar het voertuig op dit moment nog snelheid moet minderen. Om de maximum snelheid van 40 km/h te waarborgen is het van belang dat de overwegen waar snelheid geminderd moet worden, automatisch worden beveiligd. Het gaat hierbij om de volgende acht overwegen;

Gemeente	Overweg
Rheden	Oude School
Rheden	Badhuislaan
Brummen	Doonweg
Brummen	Soerensezand

Brummen	Bachstraat
Brummen	Ringlaan
Apeldoorn	Broekseweg
Apeldoorn	Wittekruisweg

Tabel 3: Te beveiligen overwegen

Er zijn verschillende manieren om de lijn te beveiligen. Dit kunnen bijvoorbeeld verkeerslichten, waarschuwingslichten of slagbomen zijn. Verkeerslichten worden gebruikt wanneer ander verkeer ook gebruik maakt van de lijn. Slagbomen zijn nodig wanneer de overweg zwaar beveiligd moet worden. Dit is bijvoorbeeld als er harder dan 70 km/h gereden kan worden op de lijn. Dan moet het voertuig gaan rijden op seinen in plaats van op zicht.

Op de VSM lijn wordt volledig op zicht gereden en niet op seinen. Het is mogelijk om waarschuwingslichten te plaatsen voor deze overgangen. Deze waarschuwingslichten kunnen worden toegepast bij de volgende situaties (CROW, 2007);

- Goede zichtafstanden moeten worden gewaarborgd. Op deze manier kunnen weggebruikers op elkaar anticiperen.
- Er geldt een maximum snelheid van 40 km/h of lager op het traject.
- Op de lijn zijn relatief lage kruisende verkeersintensiteiten.
- Bij een kruising met gebied ontsluitingswegen en erftoegangswegen.

De bovengenoemde overwegen vallen onder de genoemde situaties. Daarom worden deze overwegen extra beveiligd met waarschuwingslichten. Wel zullen er volgens Ronald de Zutter in het onderzoek van Roodenburg (2021) extra afwegingen moeten worden gemaakt met betrekking tot de zichtlijnen.

7.2 Energietoevoer

Uit de collectie van Heliox is er gekozen voor de Rapid 50 kW all-in-one laadpaal. Deze zal geplaatst worden op station Dieren, station Apeldoorn en in de opslag voor het light rail voertuig. Er is ongeveer 15 kWh nodig om het light rail voertuig op te laden om 22 kilometer af te leggen. Met de Rapid 50 kW All-in-one laadpaal is dit haalbaar binnen 20 minuten. Dit is een grove benadering en gebaseerd op de berekende factor en de eigenschappen van een light rail voertuig, die van een auto en die de van de laadpaal. Het precieze aantal af te leggen kilometers dat de laadpaal kan leveren, varieert. Dit hangt bijvoorbeeld af van de temperatuur en de levensduur het gebruik van de batterij (Heliox, z.d.).

7.2.1 Energieopwekking

Voor de opwekking van de energie is er naar twee gebieden gekeken. De omgeving Apeldoorn is dichter bebouwd dan het gebied rondom Dieren. Beide laadpalen zullen worden aangesloten op het elektriciteitsnetwerk en zullen beide grote stroomafnemers zijn. Om de gebruikte energie op te wekken is er gekeken naar twee alternatieven, zonne-, en windenergie. Ten eerste zijn kleinschalig en verspreid liggende zonneparken minder voordelig voor de kosten en de aansluiting op het netwerk (Overheid.nl, 2021). Ten tweede levert een zonnepaneel minder energie op dan een windturbine en ten derde neemt een zonnepaneel meer ruimte in beslag ten opzichte van een windmolen. Om deze reden wordt er gekozen voor windenergie. Een groot nadeel van windturbines is de rol die deze spelen in de omgeving. Deze kunnen negatieve gevolgen hebben voor verschillende vogelsoorten en belemmert het uitzicht.

Er wordt voor gekozen om verschillende windturbines te plaatsen in de gemeente Bronckhorst waarvoor nu ook plannen op tafel liggen bij de gemeente. Echter is de opbrengst van een windmolen zo veel groter dan wat er afgenomen wordt dat één windmolen genoeg is om de light rail voertuigen

van energie te voorzien. In overleg met de gemeente en het netbeheer zal de aanvraag gedaan moeten worden om gebruik te mogen maken van de stroom die de windmolens zullen opleveren.

7.3 Opslag light rail voertuigen

's nachts zullen de voertuigen aan hun eigen laadpaal staan en zal er één voertuig in de opslag staan en daar worden opgeladen. Om de kwaliteit en de 'levensduur' van het voertuig te waarborgen is het van belang dat de voertuigen opgeslagen kunnen worden en wanneer nodig voorzien van onderhoud. Om deze reden is het van belang dat er een opslagplek gerealiseerd wordt.

Apeldoorn heeft een groter werkgelegenheidscentrum dan Dieren. Er zullen dus meer mensen die langs de VSM lijn wonen, in Apeldoorn werken dan in Dieren. Om deze reden zal de opslag voor de light rail voertuigen in Dieren staan zodat de eerste rit van Dieren richting Apeldoorn zal gaan in plaats van andersom. Verder is Apeldoorn drukker bevolkt dan Dieren, is in Dieren meer ruimte voor de opslag van de light rail voertuigen en zullen ook minder mensen hier last van hebben.

Het is ook een mogelijkheid om de light rail voertuigen te stallen op de opbergplaats van de VSM lijn, deze zijn hier, in Beekbergen, al aanwezig en er wordt veel onderhoud verricht aan de rijtuigen en locomotieven. Echter zal dit het historische beeld van de VSM lijn verstoren en zullen daar extra laadpalen geplaatst moeten worden. Om deze reden wordt er gekozen om de opslag bij Dieren te plaatsen.

7.3.1 Rails

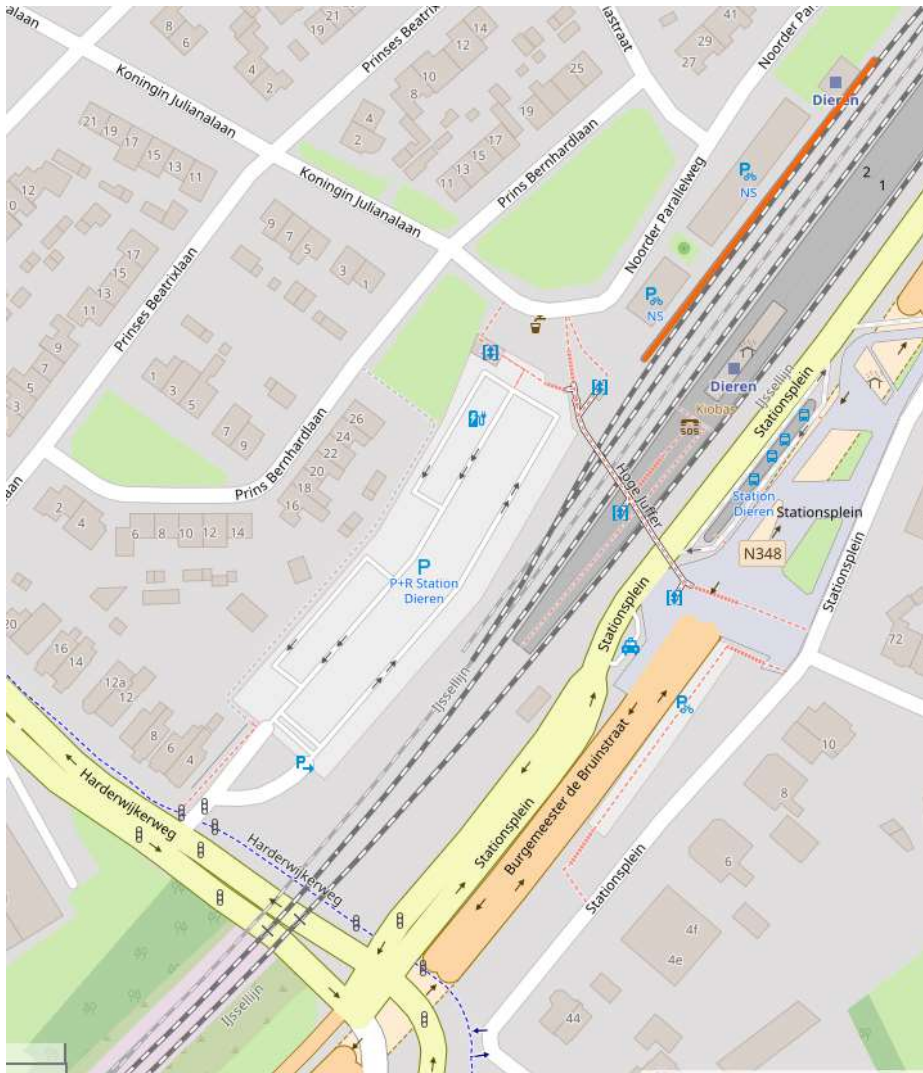
De rails van de VSM lijn is in goede staat. Het onderhoud wat er nu aan gedaan wordt, één keer per jaar een deel oppakken, zal ook voortgezet moeten worden. Wel zal de rails extra in de gaten gehouden moeten worden wanneer er meer gebruik gemaakt van zal worden. Daarnaast zal er een extra stuk spoor nodig zijn om de aansluiting te maken naar de opslag plek voor het light rail voertuig.

7.4 Dienstregeling en infrastructuur

De grootste uitdaging is om het light rail voertuig tussen de dienstregeling van de VSM te laten doorrijden. Op de dagen dat de stoomtrein niet rijdt kan het light rail voertuig zelfstandig rijden zonder dat er conflicten ontstaan met de huidige dienstregeling. Echter moet er wel nagedacht worden over de oplaadplek van het light rail voertuig en de bijkomende infrastructuur. Over een lengte van ongeveer 22 kilometer zal een light rail voertuig met de maximale snelheid van 40 km/h en een stop van één minuut bij de stations Eerbeek, Loenen en Beekbergen, er zonder de stoomtreinen ongeveer 35 minuten over doen om van Dieren naar Apeldoorn te komen en andersom. De langste rit is van Dieren naar Eerbeek. Deze duurt 10 minuten. De andere drie ritten doen er ruim zes minuten over.

Om zo optimaal mogelijk gebruik te maken van de energietoevoer en een optimale dienstregeling aan te houden wordt zal er allereerst gekeken worden naar het gebruik van drie light rail voertuigen. Daarvan zal er één op het traject rijden en de andere twee gestald staan bij station Dieren en Apeldoorn. Wanneer het eerste voertuig aankomt bij station Apeldoorn zal het tweede voertuig vertrekken richting Dieren. Wanneer vervolgens het tweede voertuig aankomt bij Dieren zal het derde voertuig vertrekken richting Apeldoorn. Op deze manier heeft het voertuig 54 minuten de tijd om op te laden om een afstand van 22 kilometer af te leggen. Er zijn verschillende mogelijkheden om dit te bewerkstelligen. Hiervoor moet met verschillende factoren rekening gehouden worden. Om te kijken wat de beste oplossing is wordt er gemaakt van een multi criteria analyse. Hierin zullen verschillende opties worden gewogen.

Er komen uitdagingen bij kijken om dit in werking te stellen. Zoals bijvoorbeeld de opgeladen trein om de niet opgeladen trein heen laten manoeuvreren om weg te komen. De infrastructuur moet er zo op ingericht zijn dat mensen kunnen uit en instappen. Station Dieren ziet er als volgt uit;



Figuur 17: Station Dieren (OpenStreetMap, z.d.)

Hierin is de oranje lijn het perron van de VSM lijn. Wanneer er een trein aan komt om op te laden zal deze in de weg staan voor de trein die opgeladen is om weg te komen. Er zijn verschillende opties om dit probleem op te lossen. De verschillende opties zullen worden toegelicht in Paragraaf 7.5 en worden gewogen in de multi criteria analyse in Paragraaf 7.6.

7.5 Mogelijkheden aanpassing infrastructuur

Dieren, optie 1:

Allereerst kan men de trein die aan komt en opgeladen moet worden via de binnenste rails iets verder door laten rijden over de wissels, van rails wisselen en dan vervolgens een klein stukje terug rijden om naast het perron uit te komen. Echter zijn hier nadelen aan verbonden omdat deze manoeuvre dan wordt uitgevoerd met passagiers in de trein. Deze hebben namelijk nog niet de mogelijkheid gehad om ergens uit te stappen.

Dieren, optie 2:

Een andere mogelijkheid is om een extra perron op de lijn te plaatsen die niet gebruikt wordt. Dit is de lichtgrijze rails in de figuur. Echter is er te weinig ruimte om hier een perron aan te leggen. Daarnaast moeten er dan twee oplaadpalen geplaatst worden in plaats van één wat extra kosten met zich mee brengt.

Dieren, optie 3:

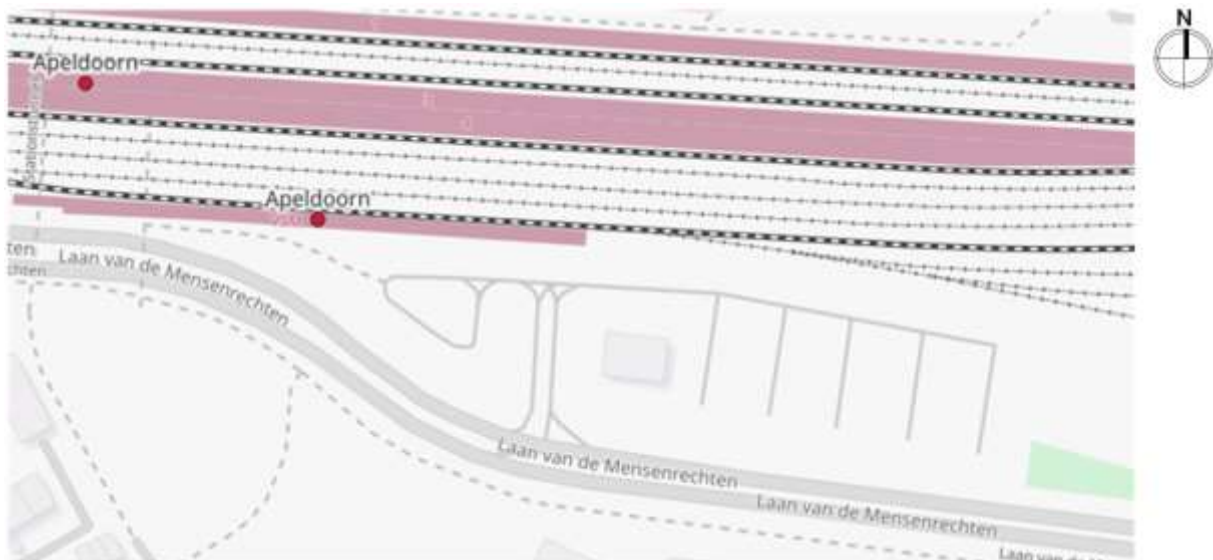
Een derde optie is om een extra wissel aan te brengen halverwege de hoogte van het perron. Op deze manier kan de trein via de binnenste wissel direct naast het perron komen. Nu zijn de passagiers in staat om uit te stappen. Wanneer de passagiers uitgestapt zijn en de opgeladen trein weg is gereden, kan het light rail voertuig een stukje naar voren rijden naast het perron. Zo is het voertuig in staat om op te laden en kunnen passagiers via het perron instappen.

Dieren, optie 4:

Wanneer er te weinig ruimte voor de light rail is om te manoeuvreren tussen de stations kan er voor een andere optie gekozen worden. Dit is om de trein die opgeladen moet worden iets verder te laten doorrijden. Er moet immers toch een extra stuk rails aangelegd worden om de light rails naar de opslagplaats te vervoeren. De trein rijdt zo ver door tot hij ongeveer parallel staat aan de parkeerplaats net voor de kruising met de Harderwijkerweg. Op deze plaats staat de infrastructuur, mits er wat aanpassingen worden gedaan, het toe om een extra perron te plaatsen. Dan kan dit het 'uitstapperron' worden en het huidige perron het 'instap' en 'opladperron'.

Apeldoorn, optie 5:

In Apeldoorn zou een extra stuk spoor aangelegd kunnen worden aan de andere kant van het perron, de zuidkant. Het perron zou iets verlengd moeten worden om zodat de rails niet in aanraking komt met de ingang van de NS lijn. Die is aangegeven met de stippellijn ten zuiden van het VSM perron. Op deze manier hoeven er geen draai manoeuvres gemaakt te worden maar kan het light rail voertuig blijven staan. Een laadpaal kan midden op het perron worden geplaatst zodat beide kanten stroom kunnen krijgen.



Figuur 18: Station Apeldoorn (OpenStreetMap, z.d.)

Beekbergen/Eerbeek, optie 6:

Een laatste optie zou zijn om de light rail voertuigen op een bepaald tijdstip te laten vertrekken waardoor ze elkaar inhalen bij station Beekbergen of station Eerbeek. Hierdoor hebben ze iets minder lang de tijd om op te laden maar zijn de stations wel vrij als de light rail voertuigen aankomen. Zo voorkomt men dat er extra ingrepen in de infrastructuur bij Apeldoorn en Dieren gedaan moeten worden. Bij zowel Beekbergen als Eerbeek moet ook een extra perron worden aangelegd, anders is er

voor één van de richtingen geen mogelijkheid om passagiers te laten uit- of instappen. Er kan ook gekozen worden om halverwege het perron een wissels te plaatsen waardoor men de helft van het perron voor de light rail richting Dieren gebruikt en de andere helft voor de light rail richting Apeldoorn. Bij deze perrons hoeft geen laadinfrastructuur te worden aangebracht. Een ander nadeel van deze optie is dat bij Beekbergen het museum station van de VSM zich bevindt. Als dit de plek is waar de light rail voertuigen elkaar passeren kunnen ze daar grotere hinder van ondervinden. Deze methode vergt veel nauwkeurigheid om op precies het juiste moment elkaar te passeren.

7.6 MCA aanpassingen infrastructuur

De MCA is weergegeven in tabel 2. Hierin is G. het gewicht van elke beschouwde criterium op een schaal van 1 tot 4. Het comfort van de passagiers wordt het zwaarst gewogen. Wanneer men het comfort van de auto boven het comfort van het light rail voertuig plaatst zal men sneller de auto nemen en heeft het weinig zin om een light rail voertuig te introduceren op de VSM lijn. Ook het behoud van de historische waarde van de VSM wordt gewogen met een 4. De VSM brengt veel toeristische waarde naar het gebied en het is van belang dat deze behouden blijft. Verder wordt ook de veiligheid en kwetsbaarheid zwaar gewogen. Het invoeren van een light rail voertuig moet veilig kunnen gebeuren. De kans op ongelukken moet zo klein mogelijk zijn.

Verder wordt het aanleggen van een benodigde extra rail of wissel niet zo zwaar gewogen. Dit heeft weinig invloed op de infrastructuur en gaat relatief makkelijk. Dit in tegenstelling tot het aanpassen of aanleggen van een nieuw perron, wat meer werkzaamheden vergt.

De oplaadtijd wordt gewogen met een 3. Wanneer men van volwaardig openbaar vervoer wil kunnen spreken is het van belang dat de treinen vaak genoeg rijden. De oplaadtijd heeft hier invloed op.

	G.	Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4	Optie 5	Optie 6
Benodigde rails	1	-	++	+-	+-	-	++
Benodigd perron	2	++	--	++	--	--	++
Behoud waarde VSM	4	+	+	+	+	+	+-
Comfort passagiers	4	--	++	+-	+-	++	+
Vereiste manoeuvres lr.	3	--	++	+-	+-	++	+-
Veiligheid/kwetsbaarheid	4	+	--	+	+	+	-
Oplaadtijd	3	-	-	-	-	-	+
Eindscore		-6	-7	9	1	14	9

Tabel 4: MCA opties aanpassing infrastructuur/dienstregeling

Op basis van de MCA scoort optie 5 voor Apeldoorn het best. Deze optie gaat samen met optie 3 voor Dieren. Optie 6 is aantrekkelijk voor de werking voor hoogwaardiger openbaar vervoer. Deze MCA betreft maar drie railgebonden voertuigen. Verder in deze paragraaf zal ingegaan worden op de mogelijkheid om meerdere voertuigen op de lijn te introduceren.

Voor bij het gebruik van drie light rail voertuigen is er gekozen voor de combinatie van optie 3 en 5 en extra wissels bij de stations Eerbeek en Beekbergen. Op deze manier is het tijdens de dienstregeling van de VSM nog wel mogelijk om de voertuigen op te laden en de stoomtrein in te halen. Wanneer de stoomtrein niet rijdt kan er gebruik gemaakt worden van alleen optie 6. Op die manier wordt het ov-gebruik met drie light rail voertuigen verder geoptimaliseerd.

Echter is in deze MCA nog niet de samenval met de dienstregeling van de VSM lijn volledig meegenomen. Wanneer dit mogelijk gemaakt wil worden moet er de mogelijkheid zijn om, wanneer de stoomtrein stil staat bij een station, deze in te halen. Omdat volgens de dienstregeling van de VSM (Veluwsche Stoomtrein Maatschappij, 2021), de stoomtrein het langst stil staat bij station Beekbergen

of Eerbeek lijken dit de aangewezen plekken om de stoomtrein in te halen. Wanneer er voor optie 6 wordt gekozen kunnen de light rail voertuigen elkaar niet meer optimaal inhalen tijdens de dienstregeling van de VSM. Om dit te realiseren moeten er verschillende extra aanpassingen aan de infrastructuur worden gedaan bij andere stations. Wanneer dit niet gebeurt vervalt de mogelijkheid voor optie 6.

Zes light rail voertuigen:

Om het openbaar vervoer in het gebied hoogwaardiger te maken wordt er gekeken of er meer dan drie light rail voertuigen op de lijn ingevoerd kunnen worden. In theorie is het gebruik van vier light rail voertuigen rijdend op de VSM lijn, twee die ondertussen worden opgeladen op station Dieren en Apeldoorn mogelijk. Dit maakt een totaal van zes voertuigen.

Het baanvak van de VSM lijn is opgedeeld in vijf blokken. In deze situatie wordt er uitgegaan van vier blokken omdat er geen officieel station, en dus geen inhaalbaarheid is tussen blok A en blok B. Alle vier de blokken worden gescheiden door een station waardoor er een inhaal/passersmogelijkheid ontstaat. Met het gebruik van zes light rail voertuigen zou tijdens de optimale dienstregeling, elk blok bezet zijn. Wanneer een light rail voertuig aankomt bij een station wordt het geacht te wachten tot het volgende blok vrij is om botsingen te voorkomen. Omdat het light rail voertuig 4 minuten langer doet over blok E dan over de andere blokken en de voertuigen op elkaar moeten wachten tot het baanvak leeg is, zal de reistijd uiteindelijk verlengt worden met een kwartier. Een ander punt van aandacht is dat op elk station een perron aanwezig moet zijn waar aan beide zijden een trein kan staan. De infrastructuur moet hiervoor dus bij alle stations aangepast worden. Daarnaast is er in deze situatie minder tijd beschikbaar om op te laden, ongeveer 15 minuten om een afstand van 22 kilometer te overbruggen. Tot slot wordt er een grote nauwkeurigheid van de dienstregeling verwacht om dit in de praktijk te kunnen realiseren.

Met deze optie gaat de reistijd vanwege het wachten op de stations, met een kwartier omhoog wat betekent dat de totale reistijd 50 minuten bedraagt, net zoals die van de bus. Daarnaast heeft het voertuig maar 20 minuten om op te laden waardoor het riskant wordt of het voertuig de volledige 22 kilometer kan afleggen. Met deze observaties en de gevolgen die deze optie voor de infrastructuur heeft en de nauwkeurige dienstregeling die het vergt, wordt deze optie niet als reëel beschouwd.

Vier light rail voertuigen:

Het verschil tussen zes en vijf voertuigen is dat er één baanvak op de VSM lijn minder bezet wordt. Echter vereist het wel dezelfde nauwkeurigheid voor de dienstregeling, dezelfde aanpassingen aan de infrastructuur en de verlengde reistijd verwacht. Om deze reden wordt er niet op deze optie ingegaan maar wordt er gekeken naar de mogelijkheid voor vier light rail voertuigen op de VSM lijn. Dit beperkt namelijk de inhaalbaarheid tot één station, Loenen, waar de infrastructuur moet worden aangepast. Hier zal dan een nieuwe perron moeten komen waardoor men aan twee kanten kan in en uitstappen.



Figuur 19: Station Loenen (OpenStreetMap, z.d.)

Om dit te bewerkstelligen moet het oude perron verwijderd worden. In het midden, waar nu een stuk oud spoor ligt moet het nieuwe perron komen. Aan beide kanten van het perron moet rails geplaatst worden zodat het voertuig aan beide kanten kan halteren. Met deze aanpassingen duurt de rit ongeveer 35 minuten, dit is automatisch ook de oplaadtijd. Voor de af te leggen afstand is dit genoeg, er zijn namelijk 20 minuten nodig om het voertuig voldoende op te laden. Daarom wordt dit als haalbaar gezien. Deze dienstregeling is alleen mogelijk wanneer de stoomtrein niet rijdt.

Gecombineerde dienstregeling:

Omdat de dienstregeling per jaar verschilt en gemakkelijk aangepast kan worden wordt er niet op basis van vaste tijden gekeken, maar op basis van de dienstregeling van de stoomtrein. De trein doet er 25 minuten over om van Apeldoorn naar Beekbergen te gaan en staat daar vervolgens 5 minuten stil. Het ligt voor de hand om te zeggen dat het light rail voertuig vertrekt wanneer de stoomtrein nog 6 minuten moet rijden voordat hij in Beekbergen aan komt. Echter moet er rekening worden gehouden met de veiligheid en het systeem van treinseparatie waardoor er niet twee voertuigen in één blok kunnen rijden. Zoals in Hoofdstuk 5 aangegeven is er een extra risico met betrekking tot de veiligheid van het introduceren van twee voertuigen die verschillen in sterkte. Daarom is deze blokseparatie extra belangrijk. Wanneer deze botsen zal het light rail voertuig enorm veel schade ondervinden. Omdat de stoomtrein over bepaalde blokken langer doet dan het light rail voertuig erover kan doen heeft het alleen zin om gebruik te maken van een gecombineerde dienstregeling wanneer de stoomtrein gemakkelijk ingehaald kan worden wanneer hij stil staat bij station Dieren of Beekbergen.

Verder maakt de energietoevoer, in tegenstelling tot het light rail voertuig, niet uit voor de stoomtrein. Deze kan namelijk eens in de twee dagen worden bijgevuld met kolen en terwijl de trein rijdt met water. Dit zal verder geen invloed hebben op de dienstregeling.

7.7 Voertuig

Omdat er aan elk voertuig wel een aanpassing gedaan zou moeten worden om te kunnen rijden op de VSM lijn, wordt er in dit rapport geen aanbeveling gedaan over het type light rail voertuig dat ingevoerd moet worden. Wel zijn er een aantal eisen waar het voertuig bij de invoering aan moet voldoen;

- De hoogte van de perrons op de VSM lijn is 380 mm. Dit is lager dan de standaard hoogte voor heavy rail in de EU. Er zal nagedacht moeten worden over een uitschuif trede of een voertuig met een lage vloer om gemakkelijk te kunnen instappen. Omdat de perrons langs de VSM lijn allemaal even hoog zijn zullen hier geen complicaties mee optreden zoals bij de Spurt in Groningen het geval was.
- De maximale lengte van gekoppelde voertuigen is maximaal 110 meter. Dit is de lengte van het kortste perron. Wanneer voertuigen gelijktijdig achter elkaar plaats moeten nemen bij Dieren wordt de maximale lengte van het voertuig 50 m.
- De wielen moeten aangepast worden naar het soort wissels dat op de rails ligt. Omdat er meerdere light rail voertuigen worden ingevoerd lijkt het aantrekkelijk om de wissels aan te passen. Echter, de stoomtreinen moeten ook nog op het traject kunnen rijden. Om deze reden zal er eerder gekeken worden naar een aanpassing van de wielen van het voertuig.
- Het voertuig moet qua afmetingen vallen binnen het profiel van vrije ruimte. Het profiel van vrije ruimte waar aan voldaan moet worden is weergegeven in Hoofdstuk 2. De haltespleet kan gereduceerd worden in een later stadium (Scheepmaker, 2004).
- Het voertuig moet elektrisch rijden en een ingang hebben om op te kunnen laden. Om niet afhankelijk te zijn aan welke kant van het perron een light rail voertuig staat heeft het voertuig twee ingangen nodig om op te laden. Aan beide kanten één.
- Net zoals bij het gebruikte voertuig in Karlsruhe en de Spurt, kunnen de elektrische delen, in dit geval de batterij, in het midden van het voertuig worden geplaatst.
- Het is mogelijk om een vliegwiel te plaatsen in het voertuig zodat remenergie gegenereerd kan worden.

8. Conclusie en aanbevelingen

Om een antwoord te krijgen op de vraag “Hoe kan, in het gebied Apeldoorn – Dieren, een railgebonden voertuig geïntroduceerd worden op de historische spoorlijn van de VSM?” is het onderzoek hier naar stapsgewijs aangepakt. Concluderend zijn er om dit te realiseren verschillende aanpassingen nodig aan de infrastructuur en aan het te introduceren voertuig. De aspecten waar naar gekeken is, is het soort railgebonden voertuig, de veiligheid, de energietoevoer van het voertuig, de aanpassingen die benodigd zijn aan de infrastructuur, de dienstregeling en tot slot de eisen die worden gesteld aan het voertuig.

Railgebonden voertuig:

Op basis van een multi criteria analyse is er gekozen om een light rail voertuig te introduceren op de VSM lijn. Deze heeft een laag gewicht, een hoge acceleratiesnelheid en kan de afstand tussen de stations goed afleggen. Er is gekeken naar verschillende aspecten die komen kijken bij het introduceren van een light rail voertuig.

Light rail voertuig

Tot slot zijn er een aantal eisen aan het voertuig om te kunnen introduceren op de VSM lijn. Deze zijn als volgt;

- De vloerhoogte van het voertuig betreft 38 centimeter.
- De maximale lengte van het voertuig bedraagt 50 meter.
- De wielen moeten aangepast worden op het soort wissels dat op de VSM ligt.
- Het voertuig moet voldoen aan het profiel van vrije ruimte.
- Het voertuig moet aan beide kanten in de lengte een ingang hebben om te kunnen opladen.
- Batterij wordt in het midden van het voertuig geplaatst.
- Het voertuig bevat een vliegwiel waardoor remenergie kan worden gegenereerd.

Veiligheid:

Om de veiligheid te waarborgen worden er acht overwogen extra beveiligd met waarschuwingslichten. Hierdoor kan het light rail voertuig met 40 km/h over de lijn rijden en hoeft hij geen snelheid te minderen. Er zal wel gekeken moeten worden naar extra afwegingen met betrekking tot de zichtlijnen.

Omdat de kosten voor de cabinesignalering erg kunnen oplopen moet de keuze hiervoor gemaakt worden in goed overleg met de Veluwsche Stoomtrein Maatschappij. Verder zal er wel gebruik gemaakt worden van treinseparatie per blok. Hierdoor wordt voorkomen dat voertuigen zullen botsen.

Energietoevoer:

Omdat er geen bovenleiding aanwezig is op de VSM lijn en om zo duurzaam mogelijk te zijn is er gekozen om het voertuig te laten rijden op een batterij. Deze heeft ongeveer 15 kWh nodig om de lengte van de VSM lijn te overbruggen. Hiervoor zal het voertuig minstens 20 minuten opgeladen moeten worden door een Rapid 50 kW all-in-one laadpaal van Heliox. Om deze benodigde energie op te wekken zal er gebruik worden gemaakt van windmolens. Deze zullen geplaatst worden in de gemeente Bronckhorst en onderdeel zijn van de plannen van de provincie Gelderland.

Infrastructuur:

Om de kwaliteit en levensduur van de light rail voertuigen te waarborgen is het van belang dat deze gesteld kunnen worden. Om de historische waarde van de VSM lijn te waarborgen zal dit niet bij de opslagplaats van de VSM lijn gebeuren maar in een eigen opslag achter station Dieren. Naast de N348

zal een opslag plaats voor de light rail voertuigen gebouwd worden. Hier kunnen ze 's nachts ook opgeladen worden.

Elk jaar zal een deel van het spoor van de VSM lijn onderhouden worden. Dit wordt extra belangrijk wanneer er light rail voertuigen gebruik van zullen maken die meer trillingen veroorzaken en de rails intensiever gebruikt zal worden.

Er zijn verschillende mogelijkheden overwogen om zo optimaal mogelijk de infrastructuur op het spoor aan te passen. De aanpassingen die doorgevoerd worden, zijn de volgende;

- Er moet een extra wissel komen halverwege station Dieren. Hierdoor kan men in en uit stappen op station Dieren zonder dat het light rail voertuig verschillende manoeuvres moet maken.
- Er moet een extra stuk spoor komen aan de zuidkant van Station Apeldoorn. Hierdoor kan men aan twee kanten van het perron in en uit stappen.
- Het perron van station Apeldoorn moet verlengd worden in de richting van het oosten. Hierdoor wordt een conflict met de ingang van de NS voorkomen wanneer er een extra rails wordt aangelegd.
- Er moet een laadpaal in het midden van perron Apeldoorn komen. Op deze manier kan het light rail voertuig aan beide kanten van het perron opgeladen worden.
- Aan de noordkant van station Dieren moet een laadpaal geplaatst worden.
- Om het mogelijk te maken dat voertuigen elkaar kunnen inhalen bij station Loenen moet er een extra perron komen.
- Aan beide kanten van station Loenen moet rails aangelegd worden.

Met deze aanpassingen kan de dienstregeling geoptimaliseerd worden. Deze zal er als volgt uit zien.

Dienstregeling:

Er zal gebruik worden gemaakt van vier light rail voertuigen. Er zullen er twee op de rails zijn en twee aan het opladen. De voertuigen zullen elkaar passeren ten hoogte van station Loenen. Het voertuig dat vertrekt vanaf station Apeldoorn kan 4 minuten later vertrekken dan het voertuig vanaf station Dieren. Deze moet een grotere afstand afleggen om bij station Loenen te komen. In totaal zal er eens per 35 minuten een light rail voertuig van Apeldoorn naar Dieren gaan en andersom. Wanneer het voertuig aan komt op station Dieren of Apeldoorn zal hij voor 35 minuten opgeladen worden. Op de stations zullen de voertuigen elkaar afwisselen om zo met een accu die voldoende is opgeladen te gaan rijden.

Wanneer de stoomtrein wel rijdt wordt de dienstregeling een grotere uitdaging. Allereerst rijdt er één light rail voertuig minder dan bij de normale dienstregeling. Anders zouden er vijf voertuigen op de rails staan wat niet mogelijk blijkt te zijn wegens de verschillende infrastructurele aanpassingen en nauwkeurigheid die vereist worden. Verder staat de stoomtrein stil bij sommige ritten in Beekbergen en bij andere in Eerbeek. Ook de tijden hiervan verschillen. Bij de gecombineerde dienstregeling zal aangehouden worden dat een light rail voertuig mag vertrekken vanaf Apeldoorn of Dieren wanneer het voertuig blok A en B of blok C vrij kan betreden zonder in aanraking te komen met de stoomtrein. De stoomtrein kan niet simpelweg één light rail voertuig vervangen omdat deze ook veel langzamer rijdt dan het light rail voertuig.

9. Discussie

In dit rapport is onderzoek gedaan naar hoe een railgebonden voertuig geïntroduceerd kan worden op de VSM lijn. Uit de resultaten blijkt dat dit mogelijk is. Echter zal een light rail voertuig er 35 minuten over doen om van Apeldoorn naar Dieren te komen en andersom. Verder zal hij één keer per 35 minuten rijden. Dit is gelijk aan de frequentie van bus 43 die Apeldoorn en Dieren met elkaar verbindt. Deze doet er wel langer over, namelijk 53 minuten. De winst die hieruit gehaald wordt in vergelijking met de buslijn die er ligt, is niet erg groot. Daarnaast is het discutabel om dit als hoogwaardig openbaar vervoer te beschouwen. Verder wegen de veranderingen die doorgevoerd moeten worden om dit te realiseren om deze reden niet op tegen het resultaat dat eruit gehaald wordt.

Een grote beperkende factor in de minimale winst die hieruit gehaald wordt is de maximale snelheid van 40 km/h. Wanneer deze verhoogd kan worden zal de snelheid en daarmee ook de frequentie omhoog gaan wat het een aantrekkelijker alternatief maakt dan de bus. Daarnaast is het ook een 'groene' optie wat men tegenwoordig steeds meer waardeert. Echter is het door de omliggende omgeving waar de lijn in ligt en wegens de veiligheid niet mogelijk om de snelheid op de lijn te verhogen.

Daarnaast is er in dit onderzoek nog niet ingegaan op de huidige bereikbaarheid van het gebied en in hoeverre het van belang is dat het mogelijk is dat er snelle en directe treinverbinding tussen Apeldoorn en Dieren komt. Het is van belang om dit in kaart te brengen voordat het nieuwe voertuig wordt geïntroduceerd. Om dit te bereiken moet er een regionaal onderzoek gestart worden naar hoe de inwoners tegen de exploitatie van een nieuwe spoorlijn aankijken. Een toekomstige exploitant of het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat zou hier het initiatief voor kunnen nemen. Met de (positieve) resultaten zou voor de uitvoering hiervan een licentie verkregen moeten worden. Door het contact met Ronald Bresser is in gesprekken duidelijk geworden dat de behoefte voor een nieuwe verbinding in dit gebied niet groot is.

Al met al, het is mogelijk om een light rail voertuig te introduceren op de VSM lijn als openbaar vervoersmiddel. Echter zal het niet hoogwaardig zijn en wordt het wegens verschillende aannames die in dit onderzoek gedaan zijn niet als reëel geschat dat dit in de praktijk gerealiseerd kan worden.

10. Literatuurlijst

- AVG. (2015). *TramTrain connects town and country* [Brochure].
- Barneveldse Krant. (2021, 5 februari). *Nieuwe windmolens op de Veluwe tot 2030 niet realistisch*. Barneveldse Krant | Nieuws uit de regio Barneveld. Geraadpleegd op 28 december 2021, van <https://www.barneveldsekrant.nl/lokaal/natuur-en-milieu/665237/nieuwe-windmolens-op-de-veluwe-tot-2030-niet-realistisch>
- Bijlsma, J. (2020, 30 maart). *Regio Apeldoorn denkt aan windmolens in bossen bij Kootwijk*. Barneveldse Krant | Nieuws uit de regio Barneveld. Geraadpleegd op 28 december 2021, van <https://www.barneveldsekrant.nl/premium/lokaal/natuur-en-milieu/333166/regio-apeldoorn-denkt-aan-windmolens-bossen-bij-kootwijk-695001>
- Bombardier Flexity Light Rail Vehicles (LRVs)*. (2014, 19 februari). Railway Technology. Geraadpleegd op 13 december 2021, van <https://www.railway-technology.com/projects/bombardier-flexity-light-rail-vehicles/>
- Centraal bureau voor de statistiek (2021). *CBS Statline*. Geraadpleegd op 28 december 2021, van <https://opendata.cbs.nl/statline#/CBS/nl/>
- Clinnick, R. (2021, 7 september). *Alstom demonstrates battery-powered train in Germany*. International Railway Journal. Geraadpleegd op 8 januari 2022, van <https://www.railjournal.com/news/alstom-demonstrates-battery-powered-train-in-germany/>
- De Bruijn, H., & Veeneman, W. (2009). Decision-making for light rail. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(4), 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.11.003>
- De Groot, H. (2021, 22 november). *CAF: zorgen over veiligheid trams in Utrecht zijn onterecht*. SpoorPro.nl. Geraadpleegd op 14 januari 2022, van <https://www.spoorpro.nl/spoorbouw/2021/11/22/caf-zorgen-over-veiligheid-trams-in-utrecht-zijn-onterecht/>

- Dhameja, S. (2001). *Electric Vehicle Battery Systems*. Elsevier Gezondheidszorg.
- DRECHSLER, G. (1996). Light railway on conventional railway tracks in Karlsruhe, Germany. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 117(2), 81–87. <https://doi.org/10.1680/itrans.1996.28263>
- Eenvandaag. (2021, 3 november). *Zoveel energie levert één draai van een windmolen op*. Geraadpleegd op 30 december 2021, van <https://eenvandaag.avrotros.nl/item/zoveel-energie-levert-een-draai-van-een-windmolen-op/>
- Google. (z.d.). *Google maps*. Google maps. Geraadpleegd op 13 november 2021, van <https://www.google.nl/maps/search/vsm/@52.1264586,5.9614918,10z/data=!3m1!4b1>
- Grincell, T. A. (2019, mei). *Decleration behavior of commuter heavy rail vehicles*. TU Delft.
- Heliox. (z.d.). *Heliox | Rapid 50kW All-in-One AC & DC EV Charging Station for car*. Heliox-Energy.Com. Geraadpleegd op 2 januari 2022, van <https://www.heliox-energy.com/products/rapid-50kw-public-charger>
- Heller, A. (2021, 5 september). *Nieuwe zonnevelden of windmolens in Gelderland? Maar het stroomnet is overvol!* gelderlander.nl. Geraadpleegd op 30 december 2021, van <https://www.gelderlander.nl/home/nieuwe-zonnevelden-of-windmolens-in-gelderland-maar-het-stroomnet-is-overvol~a1653646/?referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>
- Het treinenhoekje. (z.d.). *Spurt Noordelijke Nevenlijnen - Het Treinenhoekje*. hettreinenhoekje.nl. Geraadpleegd op 28 december 2021, van <http://hettreinenhoekje.nl/materieeltypes/SpurtNoordelijkeNevenlijnen>
- Jang, Y. J. (2018). Survey of the operation and system study on wireless charging electric vehicle systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 844–866. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.04.006>

- Jongerius, T. (2014, december). *Modelling of the RandstadRail signalling system for supporting capacity studies* (2014.TEL.7905). TU Delft.
- Koppenjan, J. M. F., Ten Heuvelhof, E. F., Broekhans, B., Leijten, M., Veenman, W. W., & Van der Voort, H. G. (2008, februari). *Het RandstadRail-project: Lightrail, Zware Opgave*. TU Delft.
- Liander. (2021, 23 december). *Transportcapaciteit Gelderland | Liander*. liander.nl. Geraadpleegd op 30 december 2021, van <https://www.liander.nl/transportcapaciteit/gelderland>
- Mullen, E. (2019, 14 maart). *Trams to run on Coventry's streets for first time since The Blitz*. CoventryLive. Geraadpleegd op 14 januari 2022, van <https://www.coventrytelegraph.net/news/coventry-news/coventry-news-trams-light-railway-15976213>
- Nederlandse overheid. (2020, 1 april). *wetten.nl - Regeling - Regeling spoorverkeer - BWBR0017707*. Overheid. Geraadpleegd op 13 december 2021, van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0017707/2020-04-01/#Bijlage4>
- nieuws.nl rheden. (2016, 30 augustus). *Terug naar Toen. Stoomtreinen*. Rheden. Geraadpleegd op 16 november 2021, van <https://rheden.nieuws.nl/nieuws/83414/terug-naar-toen-stoomtreinen/>
- NOS. (2021, 16 maart). *Tram botst in Utrecht "Ik hoorde een knal en dacht, dat is nooit goed"*. Geraadpleegd op 14 januari 2022, van <https://nos.nl/artikel/2372850-tram-botst-in-utrecht-ik-hoorde-een-knal-en-dacht-dat-is-nooit-goed>
- Novales, M., Orro, A., & Bugarin, M. R. (2002). Tram-Train: New Public Transport System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1793(1), 80–90. <https://doi.org/10.3141/1793-11>

Ooijevaar, M. (2021, mei). *Zet het sein op groen voor het toekomstig duurzaam verdienvermogen van de Nederlandse economie*. Totaalplan Spoor.

Oosterhuis. (2006, 8 augustus). *Bestand: Arriva 301-III.JPG*. Wikipedia.nl. Geraadpleegd op 23 december 2021, van https://nl.m.wikipedia.org/wiki/Bestand:Arriva_301-III.JPG

OpenStreetMap. (n.d.). OpenStreetMap. Retrieved Januari 02, 2022, from <https://www.openstreetmap.org/>

Overheid.nl. (2021, 3 augustus). *Bronckhorster beleidskader voor windenergie*. Lokale regelgeving | Overheid. Geraadpleegd op 28 december 2021, van <https://lokaleregelgeving.overheid.nl/CVDR661153/1>

ProRail. (2014, januari). *Ontwerpvoorschrift* (Nr. OVS00026).

Provincie Utrecht. (2016, 28 oktober). *Utrecht beter bereikbaar met sneltram*. Geraadpleegd op 14 januari 2022, van <https://web.archive.org/web/20161029043552/https://www.provincie-utrecht.nl/algemene-onderdelen/zoeken/@314149/utrecht-beter-bereikbaar-sneltram/>

Rail Alert. (2014, juni). *Zichttijd/-afstand bij werken aan railinfrastructuur in persoonlijke waarneming*. Stichting Rail Alert.

Railverkeersleiding Noordoost Zwolle, Veluwsche Stoomtrein Maatschappij. (2002, augustus). *Baanvakvoorschrift voor de Lokaalspoorweg Dieren - Apeldoorn* (Definitief). Regio Noordoost.

RandstadRail materieel: de Regio Citadis - haagsetrams.com. (2006). haagsetrams.com. Geraadpleegd op 13 december 2021, van <https://www.haagsetrams.com/randstadrail/materieel.html>

Roodenburg, W. (2021, oktober). *Introducing light rail vehicles on historical railway lines*. TU Delft.

- Scheepmaker, P. (2004, October). Bijlage 6. [https://www.crow.nl/getmedia/056b0281-8cd0-407f-9b3d-a5fb1c608955/Bijlage-F5-Profiel-van-Vrije-Ruimte-\(PVR\).pdf.aspx?ext=.pdf](https://www.crow.nl/getmedia/056b0281-8cd0-407f-9b3d-a5fb1c608955/Bijlage-F5-Profiel-van-Vrije-Ruimte-(PVR).pdf.aspx?ext=.pdf)
- Seijlhouwer, M. (2021, 17 augustus). *Nieuwe elektrische truck kan tonnen meer gewicht dragen*. Change Inc. Geraadpleegd op 30 december 2021, van <https://www.change.inc/mobiliteit/nieuwe-elektrische-truck-kan-tonnen-meer-gewicht-dragen-32967>
- Split, N. (z.d.). *Langs de rails*. nicosplit.com. Geraadpleegd op 16 november 2021, van https://www.nicosplit.com/index_begrippen.htm
- SporenplanOnline*. (2021). Sporenplan. Geraadpleegd op 18 november 2021, van <http://www.sporenplan.nl/>
- Stadler rail. (z.d.). *Produktdetail - Stadler*. Geraadpleegd op 14 januari 2022, van <https://www.stadlerrail.com/nl/producten/detail-all/flirt-160/136/>
- Tegenwind Zijderveld. (2019, 24 december). *Minimale afstand tussen windmolens*. Geraadpleegd op 28 december 2021, van https://www.tegenwindzijderveld.nl/laatste-nieuws/382305_minimale-afstand-tussen-windmolens
- Toyota Nederland. (2021, 13 januari). *Waarom waterstof?* Geraadpleegd op 29 december 2021, van <https://www.toyota.nl/over-toyota/milieu/environment/waterstof/waarom-waterstof.json#:~:text=Wat%20is%20het%20grote%20voordeel,te%20slaan%20en%20te%20transporteren.>
- Treinenweb. (2017, 14 november). *Arriva Spurt (D/E-GTW)*. Geraadpleegd op 27 december 2021, van <https://www.treinenweb.nl/materieel/GTW-ARRIVA/arriva-spurt-d-e-gtw.html>
- TU Delft. (2021, april). *Railway Engineering: An Integral Approach* [Online course]. TUDelft: Rail101. <https://onlinecourses.tudelft.nl>

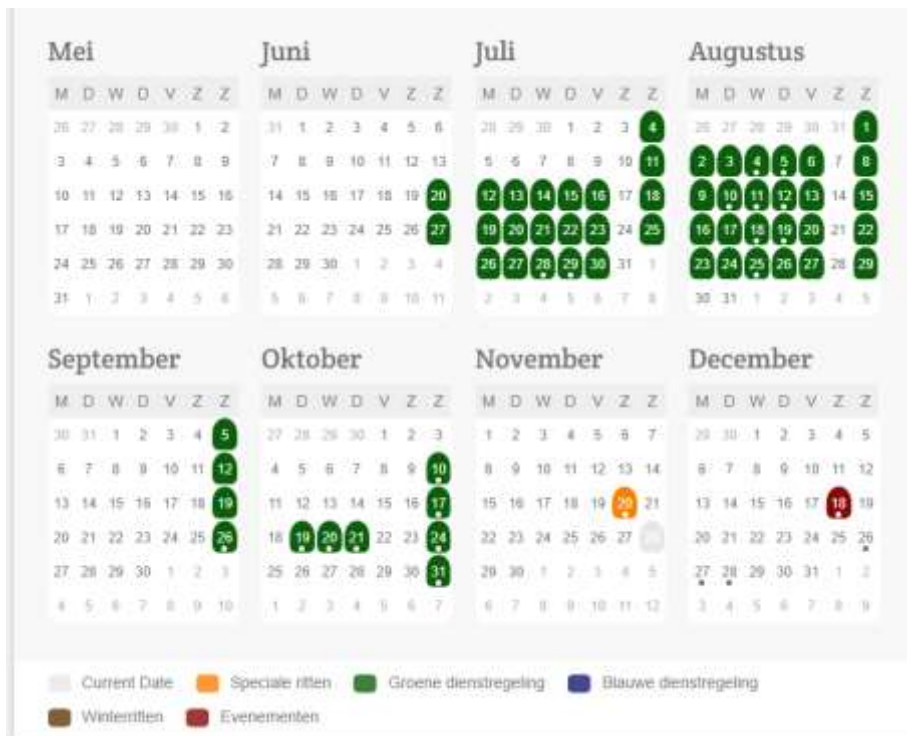
- User, S. H. (2020, 12 februari). *Opbrengst windmolen*. greenchoice.nl. Geraadpleegd op 9 januari 2022, van <https://blog.greenchoice.nl/duurzame-energie/opbrengst-windmolen/#:%7E:text=Hoeveel%20energie%20levert%20een%20windmolen&text=Windmolens%20van%20de%20huidige%20generatie,per%20jaar%20aan%20stroom%20opwekt.>
- Van Berge Henegouwen, R., Van Himbergen, A., & Van Tongeren, Y. (2016, januari). *Verkenning elektrificatie noordelijke diesellijnen* (Nr. 12). Ricardo Rail.
- Van der Bijl, R., Van Oort, N., Bukman, B., Van der Bijl, R., & Van Oort, N. (2018). What is a Light Rail? In *Light Rail Transit Systems* (pp. 17–49). Elsevier Gezondheidszorg. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814784-9.00002-5>
- Van Gompel, M. (2020, 30 september). *Groningen gaat dieseltrein vervangen voor waterstoftrein*. SpoorPro.nl. Geraadpleegd op 6 januari 2022, van <https://www.spoorpro.nl/materieel/2020/09/29/groningen-gaat-dieseltrein-vervangen-voor-waterstoftrein/>
- Vattenfall. (z.d.). *Opbrengst zonnepanelen per dag | Vattenfall*. Vattenfall.nl. Geraadpleegd op 30 december 2021, van <https://www.vattenfall.nl/kennis/opbrengst-zonnepanelen-per-dag/>
- Veluwsche Stoomtrein Maatschappij. (2021). *Dienstregeling – VSM – Stap in en reis mee!* VSM. Geraadpleegd op 18 november 2021, van <https://stoomtrein.org/dienstregeling-2/>
- Veluwsche Stoomtrein Maatschappij. (2021b). *Groene dienstregeling – VSM – Stap in en reis mee!* Geraadpleegd op 18 november 2021, van <https://stoomtrein.org/groene-dienstregeling-2/>
- VSM – Stap in en reis mee! – *Één van de leukste uitjes van Gelderland*. (2021). VSM. Geraadpleegd op 20 november 2021, van <https://stoomtrein.org/>

VSM (*materieeloverzicht*). (2000). nml. Geraadpleegd op 11 december 2021, van <http://www.nml.nl/nl/collectie/15>

Zuiderveen, J. (2009, augustus). *Succesfactoren in Nederlandse en Duitse lightrailssystemen* (2.2). Rijks Universiteit Groningen.

Bijlage 1: Specifieke dienstregeling

Jaarplanning:



Figuur 20: Dienstregeling VSM (Veluwsche Stoomtrein Maatschappij, 2021)

Dienstregeling Groene rit:

NS-station Apeldoorn	vertrek 11:45	vertrek 14:55
Museumstation Beekbergen	aankomst 12:10	aankomst 15:20
	vertrek 12:15	
Halte Immenbergweg	geen stop	
Station Loenen	vertrek 12:25	
Station Eerbeek	aankomst 12:40	
Station Eerbeek	vertrek 13:05	
Station Loenen	vertrek 13:20	
Halte Immenbergweg	geen stop	
Museumstation Beekbergen	aankomst 13:30	
	vertrek 10:45	vertrek 14:15
NS-station Apeldoorn	aankomst 11:10	aankomst 14:40

* 45 minuten stop voor bezoek aan het Museumstoomdepot

Figuur 21: Dienstregeling Groene rit (Veluwsche Stoomtrein Maatschappij, 2021b)

Bijlage 2: Overwegen

Bijlage I behorende bij het Baanvakvoorschrift Dieren - Apeldoorn

De mcu en de ctr nemen onderstaande maatregelen in acht bij regelmatig treinverkeer (zie artikel 9).

Volgnr.	Gemeente	Bij km	Straatnaam	Maatregelen
1.	Rheden	0.215	Wilhelminaweg hahob	Na stoppen voor het S-bord hahob in werking stellen d.m.v. drukknop. Als witte lamp brandt functioneert de installatie. Na passeren wordt installatie automatisch buiten werking gesteld. <u>Storingsbepaling</u> Als de installatie gestoord is: - trein laten stoppen voor de overweg - wegverkeer als volgt stoptekens tonen: a. <u>overdag</u> een rode vlag tot het eerste voertuig de overweg is gepasseerd; b. <u>bij nacht of slecht zicht</u> een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd. - trein onder het geven van herhaald fluitsein laten oprijden. <i>Beschikking CS-2/V 20488 d.d. 17 januari 1978.</i>
2.	Rheden	0.533	Enkweg hahob/haki	Na stoppen voor het S-bord hahob/haki in werking stellen d.m.v. drukknop. Als witte lamp brandt functioneert de installatie. Na passeren wordt installatie automatisch buiten werking gesteld. <u>Storingsbepaling</u> : zie volgnr. 1 <i>Beschikking CS-2/V 28357 d.d. 27 juni 1978.</i>
3.	Rheden	1.058	Spankerenseweg	Na stoppen voor het S-bord wegverkeer als volgt stoptekens geven: a. <u>overdag</u> een rode vlag tot het eerste voertuig de overweg is gepasseerd; b. <u>bij nacht of slecht zicht</u> een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd. <i>Beschikking A-8/V 25862 d.d. 24 augustus 1984.</i>
Volgnr.	Gemeente	Bij km	Straatnaam	Maatregelen
4.	Rheden	1.439	Geitenbergweg	Na stoppen voor het S-bord wegverkeer als volgt stoptekens tonen: a. <u>overdag</u> een rode vlag tot het eerste voertuig de overweg is gepasseerd. b. <u>bij nacht of slecht zicht</u> een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd. <i>Beschikking A-8/V 920855 d.d. 27 december 1988.</i>
5.	Rheden	1.906	Imboslaan	Na stoppen voor het S-bord wegverkeer als volgt stoptekens tonen: a. <u>overdag</u> een rode vlag tot het eerste voertuig de overweg is gepasseerd. b. <u>bij nacht of slecht zicht</u>

een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd.
Beschikking A-8/V 921871 d.d. 11 mei 1989.

6.	Rheden	2.203	Fietspad	Fluitsein geven. <i>Beschikking: ?</i>
7.	Rheden	2.820	Nachtegaalspad	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 925140 d.d. 30 oktober 1989.</i>
8.	Rheden	3.601	Oude School	Fluitsein geven. Max. snelheid 10 km/h. <i>Beschikking CS-2/V 33104 d.d. 05 december 1977</i>
9.	Rheden	4.121	Badhuislaan	Fluitsein geven. Max. snelheid 10 km/h. <i>Beschikking A-8/V 22245 d.d. 13 maart 1981.</i>
10.	Rheden	4.590	v. Zwietenlaan	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 224125 d.d. 09 juli 1992.</i>

Volgnr.	Gemeente	Bij km	Straatnaam	Maatregelen
11.	Brummen	6.641	Doonweg	Fluitsein geven. Max. snelheid 10 km/h. <i>Beschikking A-8/V 224107 d.d. 09 juli 1992.</i>
12.	Brummen	6.903	Soerensezand	Richting Dr - Apd: Fluitsein geven. Richting Apd - Dr: Fluitsein geven. Max. snelheid 10 km/h <i>Beschikking A-8/V 25715 d.d. 24 juni 1982.</i>
13.	Brummen	7.157	Loubergweg	Na stoppen voor het S-bord wegverkeer als volgt stoptekens tonen: a. <u>overdag</u> een rode vlag tot het eerste voertuig de overweg is gepasseerd. b. <u>bij nacht of slecht zicht</u> een rood (knipperend) licht tot de overweg in zijn geheel is gepasseerd. <i>Beschikking CS-2/V 33182 d.d. 6 december 1977.</i>
14.	Brummen	7.484	Coldenhovenseweg Ebo	Ter plaatse door de ctr te bedienen overweg. Na stoppen voor het S-bord en nadat de overwegbomen zijn gesloten oprijden. Na passeren van de trein de bomen weer openen en beschermkap toestel afsluiten. <i>Beschikking CS-2/V 23629 d.d. 17 maart 1978.</i>
15.	Brummen	7.777	Stuyvenburchstraat haki	Na stoppen voor het S-bord wegverkeer als volgt stoptekens tonen: a. <u>overdag</u> een rode vlag tot het eerste voertuig de overweg is gepasseerd. b. <u>bij nacht of slecht zicht</u> een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd. <i>Beschikking S-31024 d.d. 13 mei 1993.</i>

Volgnr.	Gemeente	Bij km	Straatnaam	Maatregelen
16.	Brummen	7.990	Bachstraat	Fluitsein geven. Max. snelheid 10 km/h. <i>Beschikking A-8/V 31560 d.d. 11 december 1980.</i>
17.	Brummen	8.285	Voetpad Wagnerstraat	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 224111 d.d. 09 juli 1992.</i>
18.	Brummen	8.643	Ringlaan	Fluitsein geven. Max. snelheid 10 km/h. <i>Beschikking CS-2/V 20158 d.d. 16 januari 1979.</i>
19.	Brummen	9.277	Horsterdijk	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 22230 d.d. 13 maart 1981.</i>
20.	Apeldoorn	9.867	Broeksweg	Richting Dr - Apd: Fluitsein geven. Max. snelheid: 10 km/h. Richting Apd - Dr: Fluitsein geven. <i>Beschikking: S-31034 d.d. 13 mei 1993.</i>
21.	Apeldoorn	10.623	Molenallee	Fluitsein geven. Max. snelheid 10 km/h. <i>Beschikking CS-2/V 33162 d.d. 6 december 1977.</i>
22.	Apeldoorn	11.143	Hoofdweg	Facultatief stopbord. Wegverkeer als volgt stoptekens tonen: een rode vlag of een rood (knipperend) licht, tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd. <i>Beschikking CS-2/V 20364 d.d. 16 januari 1978.</i>
23.	Apeldoorn	11.708	Scheidingsallee	Fluitsein geven. <i>Beschikking CS-2/V 33068 d.d. 5 december 1977.</i>
24.	Apeldoorn	12.297	Veldhuizer- sprengweg	Fluitsein geven. <i>Beschikking CS-2/V 33178 d.d. 6 december 1977.</i>
25.	Apeldoorn	12.359	Watervalweg	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 224119 d.d. 09 juli 1992.</i>
26.	Apeldoorn	13.963	Overpad Immenbergweg	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 224103 d.d. 09 juli 1992.</i>
27.	Apeldoorn	14.300	Wittekruisweg	Fluitsein geven. Max. snelheid 10 km/h. <i>Beschikking CS-2/V 25967 d.d.23 juni 1980.</i>
Volgnr.	Gemeente	Bij km	Straatnaam	Maatregelen
28.	Apeldoorn	15.094	Achterste Kerkweg	Fluitsein geven. <i>Beschikking CS-2/V 33186 d.d. 6 december 1977.</i>
29.	Apeldoorn	15.223	Het Haselt	Fluitsein geven. <i>Beschikking CS-2/V 33167 d.d. 6 december 1977.</i>
30.	Apeldoorn	15.839	Lierderstraat Dorpstraat Mbo	Ter plaatse te bedienen overweg. Facultatief stopbord. Wanneer de overwegbomen zijn gesloten oprijden. Na passeren van de trein de bomen weer openen en beschermkap toestel afsluiten.

Beschikking CS-2/V 23626 d.d. 17 maart 1978.

31.	Apeldoorn	16.110	Zwarte Bergweg	Fluitsein geven. <i>Beschikking CS-2/V 33218 d.d. 7 december 1977.</i>
32.	Apeldoorn	16.277	Tullekensmolenweg	Na stoppen voor het S-bord wegverkeer als volgt stoptekens tonen: a. <u>overdag</u> een rode vlag tot het eerste voertuig de over is gepasseerd. b. <u>Bij nacht of slecht zicht</u> een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd. <i>Beschikking nr. CS-2/V 25724 d.d. 26 april 1978.</i>
33.	Apeldoorn	16.547	Nieuwe Voorweg	Fluitsein geven. <i>Beschikking CS-2/V 33174 d.d. 6 december 1977.</i>
34.	Apeldoorn	16.921	De Els	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 224115 d.d. 09 juli 1992.</i>
35.	Apeldoorn	17.986	Lange Amerikaweg	Na stoppen voor S-bord wegverkeer als volgt stoptekens tonen: a. <u>overdag</u> een rode vlag tot het eerste voertuig de overweg is gepasseerd. b. <u>bij nacht of slecht zicht</u> een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd. <i>Beschikking CS-2/V 33064 d.d. 5 december 1977.</i>
Volgnr.	Gemeente	Bij km	Straatnaam	Maatregelen
36.	Apeldoorn	18.555	Saba hahob	Na stoppen voor het S-bord hahob in werking stellen d.m.v. drukknop. Als witte lamp brandt functioneert de installatie. Na passeren wordt installatie automatisch buiten werking gesteld. <u>Storingsbepaling:</u> zie volgnr. 1. <i>Beschikking A-8/V 25013 d.d. 7 juni 1983.</i>
37.	Apeldoorn	18.963	Zwaansprengweg	Facultatief stopbord. Wegverkeer als volgt stoptekens tonen: een rode vlag of een rood (knipperend) tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd. <i>Beschikking volgt.</i>
38.	Apeldoorn	19.600	Marchantstraat hahob	Na stoppen voor het S-bord hahob in werking stellen d.m.v. drukknop. Als witte lamp brandt functioneert de installatie. Na passeren wordt installatie automatisch buiten werking gesteld. <u>Storingsbepaling:</u> zie volgnr. 1. <i>Beschikking CS-2/V 20298 d.d. 12 januari 1978.</i>
39.	Apeldoorn	20.260	Imkersplaats	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 223460 d.d. 09 juli 1992.</i>
40.	Apeldoorn	20.825	Lepelaarweg	Fluitsein geven. <i>Beschikking A-8/V 223456 d.d. 09 juli 1992.</i>
41.	Apeldoorn	21.204	Laan van Mensenrechten hahob	Richting Dr - Apd: Na stoppen voor het S-bord hahob in werking stellen d.m.v. schakelaar. Als witte lamp brandt functioneert de installatie. Na

passeren wordt installatie automatisch buiten werking gesteld.

Storingsbepaling: Zie volgnr. 1

Richting Apd - Dr:

Indien sein 2 wit toont: doorrijden.

Indien sein 2 een ander beeld toont dan wit: Wegverkeer stoptekens tonen met een rode vlag of een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd.

Beschikking A-8/V 221549 d.d. 02 maart 1992

42.	Apeldoorn	21.292	Kanaal Zuid hahob	<p>Richting Dr - Apd: Indien sein 4 wit toont: doorrijden. Indien sein 4 een ander beeld toont dan wit: wegverkeer stoptekens tonen met een rode vlag of een rood (knipperend) licht tot de trein in zijn geheel de overweg is gepasseerd.</p> <p>Richting Apd - Dr: Na stoppen voor het S-bord hahob in werking stellen d.m.v. schakelaar. Als witte lamp brandt functioneert de installatie. Na passeren wordt de installatie automatisch buiten werking gesteld.</p> <p><u>Storingsbepaling:</u> zie volgnr. 1. <i>Beschikking A-8/V 221554 d.d. 03 maart 1992.</i></p>
-----	-----------	--------	----------------------	--

Bijlage 3: Specificaties railgebonden voertuigen

	<i>Trein</i>	<i>Metro</i>	<i>Tram</i>	<i>Lightrail</i>
<i>Max snelheid</i>	160 km/h	GVB: 70 km/h RET: 100 km/h op seinen HTM: 80 km/h	Std: 50 km/h Hoog: 70 km/h op seinen	100 km/h (RandstadRail)
<i>Gem snelheid</i>	> 60 km/h		30 km/h	45 km/h (RandstadRail)
<i>Vereiste zichtafstand</i>		GVB: 400 m RET: 550 m HTM: 450 m (Rail Alert, 2014)	Std: 200 m Hoog: 300 m (Rail Alert, 2014)	
<i>Max af te leggen afstand</i>	> 20 km (Van der Bijl et al., 2018)	5 tot 30 km (Van der Bijl et al., 2018)	5 tot 20 km (Van der Bijl et al., 2018)	10 tot 40 km (De Bruijn & Veeneman, 2009)
<i>Spoorwijdte</i>	1435 mm	1435 mm	1435 mm	1435 mm
<i>Bovenleiding</i>	Ja	Nee	Ja	Nee
<i>Lengte voertuig</i>	80 – 350 m (Van der Bijl et al., 2018)	25 – 80 m (Van der Bijl et al., 2018)	25 – 75 m (Van der Bijl et al., 2018)	20 - 120 m (Van der Bijl et al., 2018)
<i>Capaciteit</i>		Ongeveer 250 passagiers		150 tot >250 mensen
<i>Optreksnelheid</i>	0.46 m/s ²		1.2 m/s ²	1.4 m/s ²
<i>Remvertraging</i>		1.5 m/s ²		
<i>Stroomnet</i>	1500 V	750 V	600 – 750 V	
<i>Energietoevoer</i>	Elektrisch, gelijkspanning, via derde rail		Bovenleiding	
<i>Instaphoogte</i>				Laag, ter hoogte van perron.
<i>Gewicht</i>	150 ton	50 ton	40 ton	Tussen 30 en 50 ton (Van der Bijl et al., 2018)

Tabel 5: Technische specificaties railgebonden voertuigen

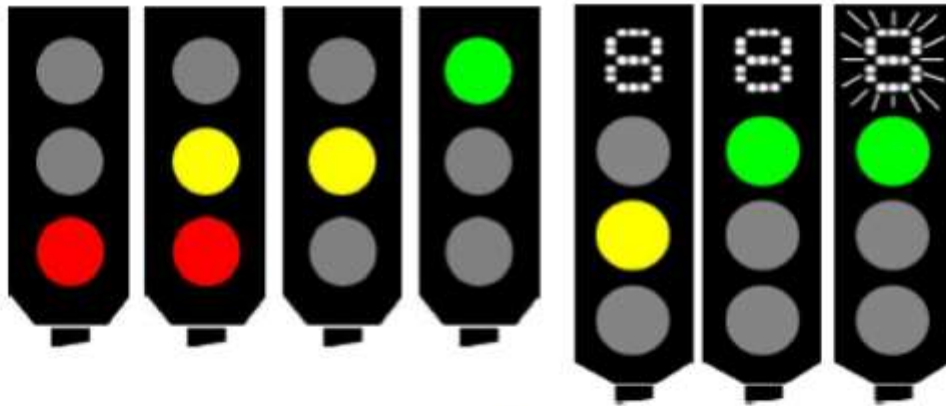


Figure 3.4: Different signal types on the RandstadRail network (Legierse, 2012)

Signal aspect	Meaning
Red	Stop, passing the signal is not allowed
Yellow-Red	Block is occupied, passing the signal is allowed for vehicle coupling, at a maximum speed of 10 km/h
Yellow	Block is empty, passing the signal is allowed. Reduce speed to stop at next signal (red)
Green	Next two blocks are empty, passing the signal is allowed at the normal speed
Yellow with number	Block is empty, passing the signal is allowed at the indicated speed (in tens of kilometres per hour). Reduce speed to stop at next signal (red)
Green with number	Next two blocks are empty, passing the signal is allowed at the indicated speed (in tens of kilometres per hour)
Green with flashing number	Next two blocks are empty, passing the signal is allowed. Reduce speed to reach the indicated speed at the next signal (in tens of kilometres per hour)

Figuur 22: Bloksignalering RandstadRail

Bijlage 3: Informele communicatie Ronald Bresser

Ondervraagde: Ronald Bresser, Hoofd-infra bij de VSM lijn

Interviewer: Annemijn van Niekerk

Datum: 3 december 2021, aanvullende informatie 13 december 2021 gekregen

Locatie: telefonisch

I: Wat is uw functie binnen de VSM precies?

Ik ben vrijwilliger en sinds 1995 actief bij de VSM lijn. Ik ben nu hoofd infra.

I: Dienstregeling, had al beetje gezien, hoe vaak rijden jullie dan? Niet hele jaar door?

In de zomer is het hoogseizoen dan rijden we vaker. Soms wel twee keer per dag. In juni en augustus rijden we vaak 6 keer per week. Verder zijn er ook gezelschapsritten die men kan reserveren. De dienstregeling wordt drie maanden van tevoren opgesteld.

Waaronder valt de VSM lijn?

Onder besluit bijzonder spoorwegen.

Wat is de precieze onderlinge afstand van de lijn?

Dit kan je terugvinden in de spoorbladen die ik je opstuur.

Hoe lang doet de trein er over om van station naar station te gaan?

Je doet er één uur en 20 minuten over om van Apeldoorn naar Dieren te gaan. In Dieren kan je ook met de boot een tocht maken op de IJssel.

Als de trein stil staat, staat deze dan op het spoor zelf of op een stukje dubbelspoor gedeelte?

Wat is de maximale snelheid op de VSM lijn?

De maximum snelheid op het gehele traject is 40 km/h. Dit komt door de omgeving en de zichtlijnen.

Met welke snelheid mag de trein over de onbeveiligde overgangen?

Sommige moet de trein afremmen tot 10 km/h.

Wat is de energietoevoer, had al gezien diesel en stoom? Waar wordt dit bijgevoerd en wanneer?

Dit wordt bijgevoerd in Beekbergen. Water kan tijdens de rit worden bijgevoerd. Kolen moeten eens in de twee dagen worden bijgevoerd in het hoogseizoen.

Wat voor soort seinen staan er langs de rails?

Verschillende borden die de blokken aangeven. Dit is dan een vrije baan. Er wordt voor de communicatie gebruik gemaakt van een telecomstelsel.

Wat is de hoogte van de verschillende perrons?

380 mm. De standaard voor EU is 780 mm. De VSM heeft dus oude lage stations.

Wat is de lengte van de perrons?

Beekbergen 120 m, Loenen 120 m, Eerbeek 140 m, Dieren 110 m.

Wat is de acceleratie van de locomotieven?

Binnen 1 minuut haalt hij de 40 km.

Wat is de remafstand?

Hier zijn verschillende remformules voor maar met 40 km/h heeft de stoomtrein maximaal 400 m nodig om te remmen.

Wat is de huidige staat van de rails?

Goed. Ieder jaar wordt er onderhoud verricht. Dit zit hem voornamelijk in de houten dwarsliggers. Deze worden vervangen door betonnen.

Wat voor soort wissels zitten er in?

Hoe werkt de huidige treindetectie?

Die is er niet.

Wat is de spanning op de rails?

De lijn is niet geëlektrificeerd.

Bijlage 4: Interview Sander Willer

Geïnterviewde: Sander Willer, Consultant Transportation – Mott MacDonald

Interviewer: Annemijn van Niekerk

Plaats: Online

Datum: 14 december 2021

I: waar heb je je onderzoek precies naar gedaan?

Ik heb de vraag gekregen vanuit Engeland, daar waren ze toen met de tram-trein bezig om dat op te zetten en daar meer vorm aan te geven. Maar dat was nog flexibel en ongedefinieerd. Wanneer is het tram-trein? En wat zijn je technische problemen. Eerst moet je alleen op het technische aspect focussen maar er al wel een model van maken. Toen ben ik meer gaan kijken naar wanneer kan je het toepassen en wanneer is welke vorm zinvol. Dus allereerst heb ik tram-trein gedefinieerd. Er zijn vier soorten, spoor deelt met andere dingen. Of je tramspoor deelt met gewone stadstrams en anderzijds of je treinspoor deelt met treinen in een andere vorm, VSM zal een stoomtrein zijn. Het verschilt wanneer welke soort wordt toegepast. Ik heb een oriëntatie gemaakt van welke tram-treinen je kan vinden en waar die worden gebruikt, vooral in Duitsland. Ook in Nederlands maar niet allemaal doorgevoerd. Toen heb ik onderzoek gedaan naar de stadsgroottes en de lengte van de lijn. En ook naar de link met de omgeving met de stad.

I: Wat is verschil tussen tram-train en lightrail?

LR is een groot begrip. Er valt heel veel onder light rail. De uithoflijn in Utrecht, Amstelveen zijn LR. Wat er daarvoor reed was eigenlijk ook Light Rail. In Rotterdam is de Randstadrail ook LR. Dat is een LR netwerk, maar het zijn de Haagse trams en de metro's van Rotterdam die samen rijden. Hier zie je het probleem met light rail, het heeft niet echt een enge definitie. Het is meer dan een tram, minder dan een metro. Tram train is iets beter gedefinieerd. De afbeelding met het driehoekje waarbij light rail in het midden staat geeft het goed weer.

I: Je hebt ook gekeken naar de lijn in Karlsruhe, een voertuig dat zowel in het stadscentrum als op heavy rail rijdt, zijn er ooit conflicten geweest, en hoe zit het met acceleratie en dergelijke?

LR voertuigen zijn sterker dan de heavy rails. Met sterkte wordt bedoeld dat de constructie sterker is en beter kan botsten. Daar zijn ook Europese normen voor. Dat maakt een voertuig wat zwaarder en duurder. Ze kunnen wel snel versnellen en kan je meer haltes erbij zetten.

Ze rijden wel op dezelfde seinen. Dat is nodig om op dezelfde lijn te kunnen rijden. Er moet één systeem zijn dat de voertuigen niet op elkaar klappen. En wat dat dan is maakt niet uit. Bij de Rijn gouwenlijn hebben ze het systeem moeten aanpassen. Er waren twee dingen. Systeem was gebouwd op goederentreinen en een tram-trein kan veel later remmen. En ze werden niet gedetecteerd door het standaard detectie systeem.

In Karlsruhe rijden de treinen 4 x per uur. En verdere treinen rijden 2 tot 4 x per uur. In Nederland rijden er wel 6 per uur. Het is de ruimte die beschikbaar is die een trein laat rijden. Verder is bij een treinsysteem je marge bij je dienstregeling van belang.

I: Een trein is zwaarder dan een LR. Heeft dit constructieve gevolgen?

Het is alleen maar voordelig als je er een lichter voertuig op de rails laat rijden. Aan de trein kant is het niet zo'n probleem. Enige is dat trams kleinere wielen hebben voor de toegankelijkheid in de stad. Voor wissels kan dit problematisch zijn, ze hebben een gat waar je er links of rechts af kan gaan. Het

wielsysteem met trams werkt anders dan bij treinen. Zit een andere constructie achter zodat ze niet per ongeluk de verkeerde kant eraf gaan. Door de kleine wielen zitten daar risico's aan. Je hebt ook nog speciale wissels, dat is een kruis maar dan kan je ook om het hoekje rechtdoor rijden. Bij de Rijnoudenlijn kon je alleen maar rechtdoor, anders had je ontsporingrisico. Oplossing hiervoor was de vorm van de wielen aanpassen. Of de wissels aanpassen. Dat hebben ze bij de randstadrail gedaan. Daar hebben ze de wissels op de wielen aangepast.

I: Qua kosten is het dus afhankelijk van de hoeveelheid wissels en hoeveelheid voertuigen.

Ja klopt inderdaad, Als je één voertuig hebt en 10 wissels, ga je het waarschijnlijk zoeken aan de voertuig kant. Het is ook de afweging voor hoeveel impact het heeft op het andere vervoer dat er rijdt. Dat moet je uit het totaalplaatje bekijken, zal per locatie verschillen.

Het gaat om de vorm van de wielen. Flenshoogte, flensbreedte en de achterkant. De dikte van de achterkant van het wiel had daar mee te maken. Het kan zijn dat als de dikte van de flens een issue is, kan je tramspoor daar gevolgen bij hebben. Daar zit je oplossing in hoe je het samen gebruikt.

I: Hoe zit het met de hoogte tram trein en de perrons?

In Karlsruhe heb je een paar generaties van perrons. De eerste waren er al voordat er lage vloers voertuigen waren. Dat was normale hoogte. Daar hebben ze nu ook perrons op stoepniveau. Op sommige stations hebben ze aparte perrons voor deze voertuigen moeten maken. Latere voertuigen hebben een tussen oplossing, 55 mm. Dit is ook beetje wat ze bij de RandstadRail hebben gedaan. Daar heb je hoge perrons voor de metro en lage perrons voor de trams. In Karlsruhe hebben ze dat ook zo deels opgelost en zeker in de stad hebben ze op 30 cm gelegd, dat is normaal voor de trams en aan de voorkant hebben ze een verhoogd stukje gemaakt zodat je daar ook gelijkvloers kan instappen. Modernere tram-treinen kunnen ze lagere vloers hebben. De lijn in Kassels en Zoetermeer bijvoorbeeld.

I: Hoe groot is het belang van treindetectie en wat zijn de kosten hiervan?

Kosten zou ik niet weten. Systemen hebben wel hoog veiligheidssysteem en zijn daardoor vrij duur. Bij de VSM heb je enkelspoor, je kan treinseparatie maken. Stuk spoor in tijd blokken voor een trein. Hierdoor heb je geen treindetectie nodig en kan je het op een andere manier oplossen. Het is de vraag hoe vaak rijdt er een voertuig en wat is toelaatbaar. Wanneer ze samen op het spoor gaan heb je wel een systeem nodig waarvan je weet waar ze zijn. Als je dit wil gaan beveiligen ben je wel de nodige miljoenen kwijt.

I: Heb je ook gekeken naar battery trains? Een lijn moet kort genoeg zijn om er gebruik van te maken, heb je enig idee hoe lang de lijn kan zijn?

Hoeveel ruimte en gewicht wil je kwijt zijn aan je batterijen. Hoe veel dit is hangt af van de range die je hebt. Batteries kunnen op het dak of onder de vloer liggen. Per persoon heb je wel minder dan een bus nodig maar het zijn wel zwaardere voertuigen. In Groningen willen ze een diesel ombouwen naar een batterij. Het is een concept waarbij het midden stelsel omgebouwd kan worden naar batterijen.

I: verder nog dingen waar ik rekening mee moet houden?

Welk probleem ben je aan het oplossen. Wil je echt de stad in gaan? Hoe ver wil je daar de stad in gaan? Wanneer mensen centrum van Apeldoorn in moeten is het nodig om tram trein te gebruiken. Dat is bij uitstrek wel een plek waar mensen daarvan gebruik zouden kunnen maken. En wat de vervoersvraag is.

Hou ook rekening met de frequentie die je wilt rijden, één extra trein per uur is geen acceptabel OV.
Ergens een wisseltje aanleggen is geen groot probleem.

Bijlage 5: Krachtenbalans

Verschillende factoren beïnvloeden de energiebalans van de Light Rail. De benodigde energietoevoer gedurende een tijdsinterval wordt berekend als het vermogen maal het tijdsinterval. De energie wordt uitgedrukt in kWh (Dhameja, 2001).

$$(1) E = P * t$$

Hierin is P het vermogen in kW, en t de tijd in uur.

De verschillende factoren zijn en hun daarbij horende krachtformules zijn;

- Aerodynamische weerstandsverliezen

$$(2) P_{aero} = A_{frontal} * C_{drag} * V^3 * \frac{\rho_{air}}{2}$$

Hierin is A het frontale oppervlak van het voertuig in m^2 , C het luchtweerstandscoefficiënt, V de snelheid van de light rail (m/s) en ρ_{air} de luchtdichtheid (kg/m^3) (Dhameja, 2001).

- Rolweerstandverliezen

$$(3) P_{roll} = M_{vehi} * g * (R_0 + R_1 * V + R_2 * V^2 + R_3 * V^3) * V$$

Hierin is M_{vehi} de massa van het voertuig in kg . g is de gravitatieversnelling (m/s^2). R_0 , R_1 , R_2 en R_3 zijn rol coëfficiënten (Dhameja, 2001).

- Hellingsverliezen

$$(4) P_{incl} = M_{vehi} * g * V * \sin\left(\beta_{incl} * \frac{\pi}{180}\right)$$

Hierin is β_{incl} de helling waarover de light rail rijdt. In dit geval is dat de VSM lijn. Er wordt aangenomen dat de helling is over dit traject gelijk aan 0.

- Vermogensverlies bij het versnellen van het voertuig

$$(5) P_{accel} = V_{ave} * M_{vehi} * a$$

a is hierin de versnelling van het voertuig in (m/s^2).

- Vermogen van regeneratief remmen

$$(6) P_{regen} = -e_{regen} * M_{vehi} * a * V$$

Hierin is e_{regen} de regeneratieve rem efficiëntie.

Om het vermogen van de motor te bepalen kan de balans worden opgesteld. Hiervoor geldt;

$$(7) P_{engin} = P_{aero} + P_{roll} + P_{incl} + P_{accel} + P_{regen} + P_{parasitic}$$

De benodigde energie kan vervolgens worden berekend met onderstaande vergelijking.

$$(8) Fuel = P_{engin} * \frac{\Delta t}{H_{fuel} * \rho_{fuel} * e_{engine} * e_{alternator}}$$