

Uithoflijn Utrecht EMC Compensatiesysteem

Technisch Ontwerp – 4: optimalisatie



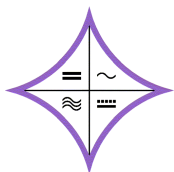
Doc.id.: BRU-EMC-Uithoflijn-DO-tekst-04-v03.doc

Auteur: D. van Bakkum / v Asch v Wijck

Datum: 28 januari 2014

Versie: 1.1

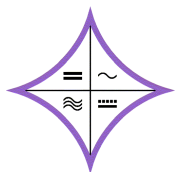
Copyright © 2012 EM Power Systems B.V.
Postbus 50
3830 AB Leusden



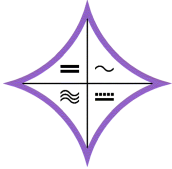
Versiebeheer

versie nr.	datum	opmerkingen
0.1	23 oktober 2013	initiële versie
0.2	10 december 2013	diverse wijzigingen en aanvullingen
0.3	12 december 2013	versie t.b.v. ruimtelijke onderbouwing
1.0	17 december 2013	versie t.b.v. ruimtelijke onderbouwing

versie nr. 0.1	datum	naam	paraaf
opgesteld	12-12-2013	D. van Bekkum	
gecontroleerd			
vrijgegeven			

**Inhoudsopgave**

0.	Leeswijzer	4
1.	Management samenvatting	4
2.	Wijzigingen	4
2.1.	Boogverruiming bij het CBOI	4
2.2.	Verhoging spoor bij de energiecentrale	6
2.3.	De Trams	6
2.4.	Plaatsing Aansluitkasten	6
2.5.	Lengte van de Secties	7
3.	EM emissie: wijze van berekenen	7
3.1.	Coördinaten stelsel	7
3.2.	Modellering algemeen	7
3.3.	Inframodel	8
3.4.	Trammodel	8
3.5.	Verkeersmodel	9
4.	Aanpak	9
4.1.	Stappen	9
4.2.	Output	9
5.	De eisen	9
6.	Uitkomsten berekeningen	10
6.1.	Sectielengte en trampositie	10
6.2.	Secties van 15 meter	11
6.3.	Boog CBOI: mastposities	11
6.4.	Verhoogde spoorligging energiecentrale	12
7.	Eerste toetsing van uitkomsten tegen de eisen	12
8.	Optimaliseren van de sectionering	13
8.1.	Secties korter dan 20 m	13
8.2.	Secties langer dan 20 m	13
9.	Van buslus tot het eindpunt P+R	14
9.1.	Afwijkende topologie sectioneringskabels	14
9.2.	Berekening van de EM emissie	14
10.	Kruytgebouw en Bloembergen	15
10.1.	De haalbare EM reductie met sectionering	15
10.2.	Maximale stroom en stroombeperking	15
10.3.	Maatregelen	16
11.	Nauwkeurigheid van berekeningen	16
12.	Conclusies	17
13.	Referenties	18



0. Leeswijzer

Om de nieuwe tramlijn in het gebied van De Uithof elektromagnetisch compatibel te maken met de apparatuur in de gebouwen van UvU, UMC en KNAW is ingestoken op een ontwerp, waarbij een zogenoemde sectionering wordt toegepast op de energievoorziening via de bovenleiding. Voor dat ontwerp is een verantwoording geschreven (zie Ref. [1]).

Tussen februari en oktober 2013 zijn er nog een aantal wijzigingen aan de orde geweest, die van invloed zijn op het ontwerp en de effectiviteit van het ontworpen compensatiesysteem:

- ter plaatse van het CBOI is de projectering van de trambaan aangepast (de zogenoemde boogverruiming, zie Ref. [2]);
- bij de energiecentrale worden de leidingtunnels A en B overkluist door één betonplaat, waardoor de spoorligging met maximaal 1 m wordt verhoogd;
- uit de eisen aan het rollend materieel zijn nieuwe gegevens gekomen;
- er is voor het laatste segment van de lijn (vanaf buslus tot en met P+R) uitgezocht of een aangepaste topologie van de kabels voor de sectionering nog voldoende EM reductie geeft;
- er is nagegaan wat wenselijk en mogelijk is bij de plaatsing van aansluitkasten;
- er is door de opdrachtgever gevraagd om te kijken naar mogelijkheden om de lengten van compensatiesecties te "optimaliseren".

Dit document beschrijft de gevolgen van van die wijzigingen voor het ontwerp en vervangt alle eerdere versies. Alle aspecten van het ontwerp, die door de wijzigingen niet worden beïnvloed, blijven ook zoals omschreven in Ref. [1]. Voor de ruimtelijke onderbouwing op het punt van EMC moeten Ref. [1], Ref. [4] en dit document in samenhang worden gelezen en worden gebruikt.

1. Management samenvatting

Ontwerpaanpassingen en berekeningen op basis van gegevens, die sedert februari 2013 zijn gewijzigd, leiden tot het volgende:

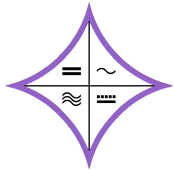
- de situatie bij het CBOI is zodanig verbeterd door de boogverruiming, dat de EMC eisen op die locatie nu worden gehaald;
- de verhoogde ligging van het spoor ter plaatse van de leidingtunnels bij de energiecentrale geeft een minieme verhoging van de EM emissie, maar de eisen van de omgeving worden nog steeds gehaald;
- de maximale stroomafname en de stroomvoering in kritieke circuits van de voertuigen is opnieuw vastgesteld en in de berekeningen meegenomen;
- de situaties bij Kruyt en Bloembergen zijn, als gevolg van nieuwe gegevens van het materieel, enigszins is verslechterd. Met enkele kleine aanvullende maatregelen op operationeel niveau wordt ervoor zorggedragen dat daar ter plaatse aan de emissie eisen zal worden voldaan;
- eveneens als gevolg van de nieuwe materieelgegevens moet de sectionering bij het Kruytgebouw en bij het CBOI worden ingericht met compensatiesecties van 15 m lengte;
- er is voor het meest kritieke punt in de onderdoorgang van de Universiteitsweg een alternatieve topologie ontworpen voor de kabels. Samen met de daar geldende snelheidslimieten is dat voldoende om aan de EM eisen ter plaatse te voldoen;
- voor de aansluitkasten zijn varianten ontwikkeld, zodanig dat er een zeer goede inpassing kan plaats vinden in de bovengrondse omgeving;
- een groot gedeelte van het Uithof tracé kan worden gesectioneerd met secties van 40 lengte.

Samengevat beschrijft dit document een pakket maatregelen, waarbij op alle kritieke locaties A tot en met H kan worden voldaan aan de eisen volgens de hierna genoemde pass-fail criteria.

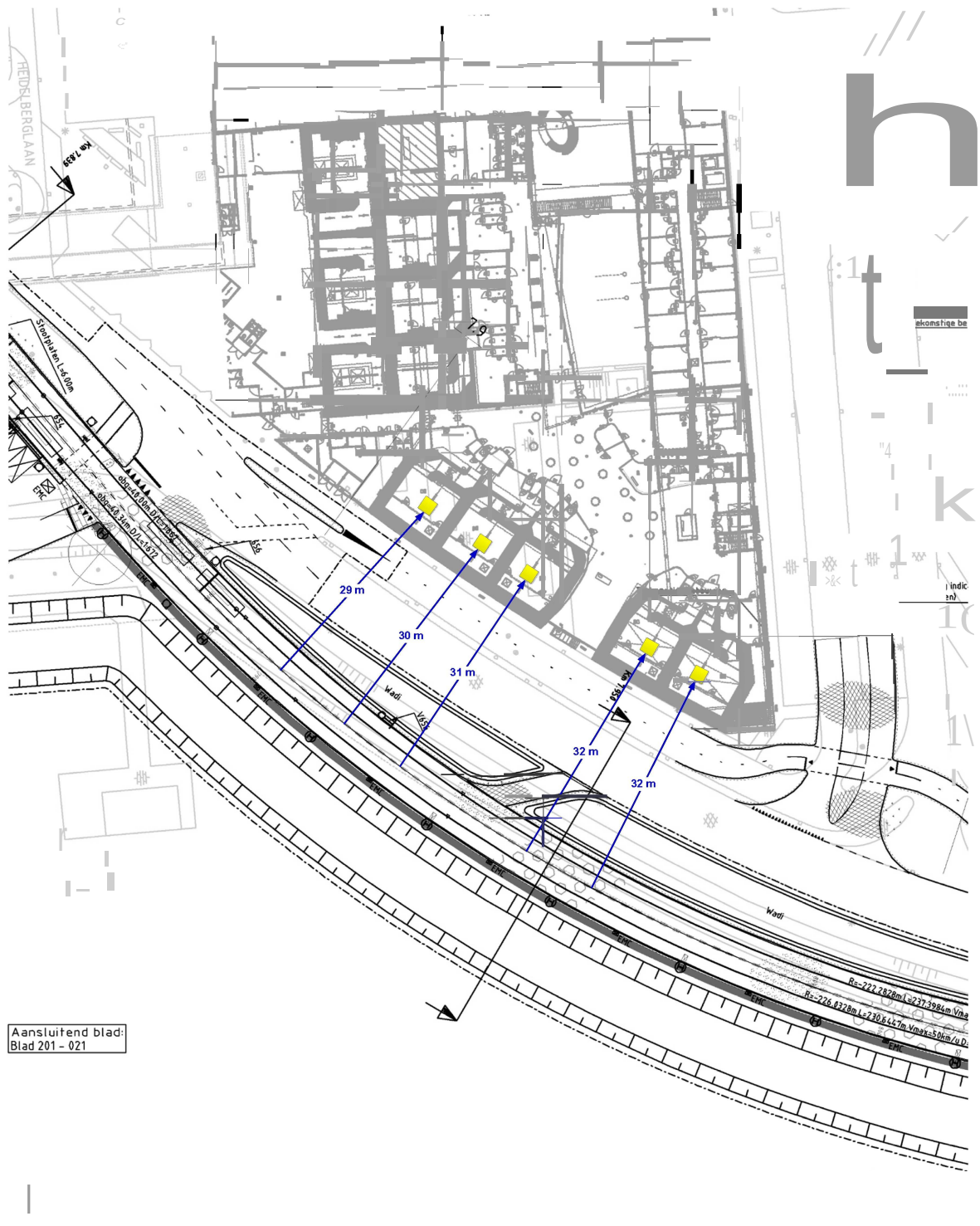
2. Wijzigingen

2.1. Boogverruiming bij het CBOI

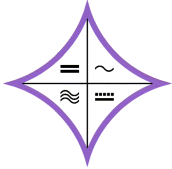
De belangrijkste drijfveer voor de boogverruiming is, om de tram op grotere afstand te brengen van de CBOI apparatuur en daarmee te berekenen, dat met sectionering daar ter plaatse de immuniteitsniveaus worden gehaald. In een eerdere analyse is vastgesteld dat dat mogelijk moet zijn (zie Ref. [3]). De



afstanden tussen CBOI apparatuur en de as van de trambaan worden daarmee vergroot van ruim 15 m naar 29 à 32 m (zie figuur 2.1.1). Met de nieuwe gegevens voor de trams wordt berekend, of de EM emissie dan onder het vereiste niveau van immuniteit blijft.

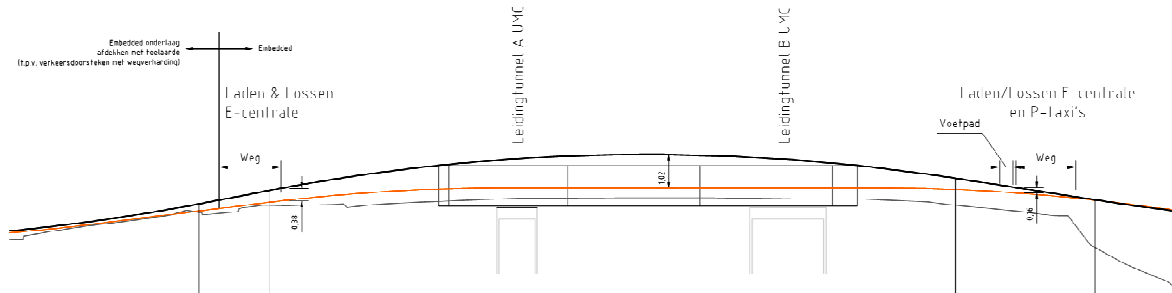


figuur 2.1- verruimde boog en afstanden tot CBOIapparatuur



2.2. Verhoging spoor bij de energiecentrale

Tussen de energiecentrale en de gebouwen van het UMC lopen twee kabeltunnels. Om een aantal redenen zullen die beide kabeltunnels worden overkluist met behulp van één grote betonplaat. Daardoor gaat de spoorligging op het hoogste punt met iets meer dan een meter omhoog (zie figuur 2.2.1).



figuur 2.2.1 – wijziging spoorligging bij energiecentrale

Omdat daardoor het verticale verschil tussen de ligging van het tramsysteem en de posities van de UMC apparatuur iets verkleint, wordt met berekeningen bepaald wat het effect is op de grootte van de EM emissie.

2.3. De Trams

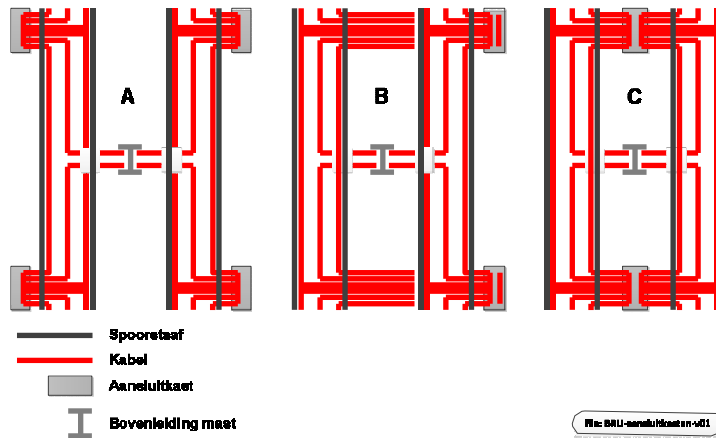
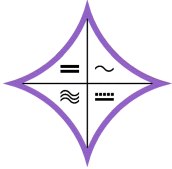
Voor de materiële specificaties hanteert de Projectorganisatie Uithoflijn nu de volgende aannames:

- de positie van de pantograaf. De pantograaf komt in het midden van het voertuig boven het middelste draaistel, conform de gebruikelijke standaard van materieel leveranciers;
- configuratie van de aandrijving. Van de drie draaistellen worden er twee aangedreven: het voorste draaistel en het achterste;
- de plaatsing van de inverters. Bij lage-vloer trams worden de twee inverter-packs op het dak geplaatst, ongeveer boven de aangedreven draaistellen;
- de maximaal op te nemen stroom. De maximaal opgenomen stroom per tram is gesteld op 1000 Ampere Voor een voertuig van ca. 32 m.

2.4. Plaatsing Aansluitkasten

Voor de EM compensatie is het nodig dat de aansluitkasten worden geplaatst in het elektrische midden van de twee bovenleidingsmasten die aan het begin en aan het einde van een compensatiesectie staan. Het elektrische midden is niet per definitie gelijk aan het geometrische midden. Dat vereist projectering in een omgeving die plaatsing op de ideale plek soms lastig of zelfs ondoenlijk maakt.

Aansluitkasten mogen in principe op drie verschillende manieren in de dwarsrichting van de trambaan worden geplaatst: (i) voor elk van de sporen aan de buitenzijde van de baan (A), (ii) voor beide sporen aan één buitenzijde van de baan (B), (iii) voor beide sporen in het midden van de baan (zie schema in figuur 2.4.1). Eerdere berekeningen hebben uitgewezen dat de verschillen in EM compensatie uitermate gering zijn, omdat stromen in de y-richting nauwelijks storen en omdat de kabellengten waarover die stromen lopen erg kort zijn (enkele meters). In de berekeningen wordt naar de precieze plaatsing van aansluitkasten niet gekeken.



figuur 2.4.1 – plaatsing aansluitkasten

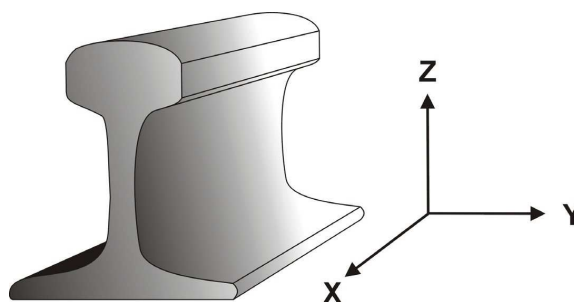
2.5. Lengte van de Secties

In Ref. [1] zijn alle berekeningen uitgevoerd met een “standaard” lengte van de compensatiesecties van 20 m. De lengte van de sectie is een factor in de grootte van het B-veld in een bepaald punt op enige afstand naast de trambaan. Als de sectie korter wordt, neemt het B-veld af en als de sectie langer wordt neemt het B-veld toe. Die toename of afname is overigens afhankelijk van de afstand tot de trambaan. Bij toenemende afstand tot de trambaan neemt dat effect af. Voor het gehele tracédeel in de Uithof wordt berekend, wat de maximum acceptabele lengte van de compensatie-secties is op de diverse delen van het tracé: de eerder genoemde optimalisering.

3. EM emissie: wijze van berekenen

3.1. Coördinaten stelsel

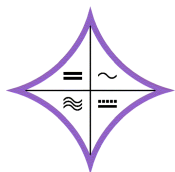
Modellering, berekeningen en output zijn gebaseerd op een rechts assenstelsel als volgt (zie figuur 3.1). De x-richting is die van het spoor, de y-richting is de horizontaal loodrecht op het spoor en de z-richting is de verticaal loodrecht op x en y



figuur 3.1 – oriëntatie van het assenstelsel voor de berekeningen

3.2. Modellering algemeen

De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van de modellering van stroomvoerende geleiders in een 3D (drie dimensionale) ruimte. Alle relevante stroomvoerende geleiders van de tractievoeding, van de bekabeling van het systeem en in de trams worden met behulp van parameters als lijnen in een 3D ruimte gedefinieerd. Vervolgens wordt van zo'n topologie uitgerekend wat de elektromagnetische emissie is in



bepaalde andere punten (de zogenoemde waarnemingspunten) van die 3D ruimte. De locaties van gevoelige apparaten en instrumenten zijn als waarnemingspunten in de berekeningen gedefinieerd. De modellering van het totale systeem, dus de grootte van stromen en de lengte en de positie van de geleiders in de 3D ruimte zijn de bepalende factoren. De doorsnede van de stroomvoerende geleiders wordt verwaarloosd. Elke stroom loopt (in het model) door een oneindig dunne lijn.

3.3. Inframodel

De infrastructuur wordt gemodelleerd conform het ontwerp in het DO. De modelparameters zijn opgenomen in tabel 3.3.1.

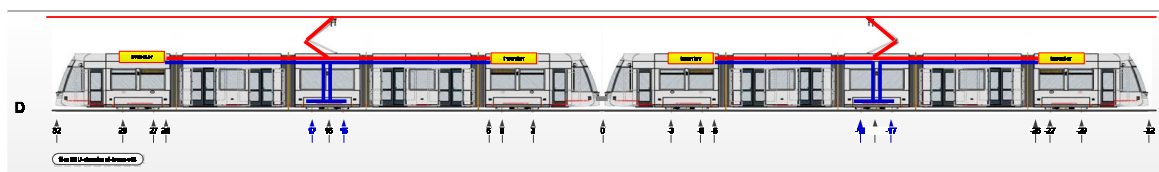
Tabel 3.3.1 – Modelparameters infra.

parameter	waarde
aantal sporen	2
afstand sporen (h.o.h.)	4,0 m
hoogte rijdraad bovenleiding	5,5 m boven de elektrische langsas van de spoorstaven
symmetrie voeding	wordt per locatie bepaald. Stromen vanuit beide onderstations (Sorbonne, WKZ) zijn omgekeerd evenredig met de afstand
lengte secties	variërend: 15 m – 20 m – 25 m – 30 m – 35 m – 40 m
positie bovenleiding masten (hart spoor)	conform DO midden van de baan tussen de sporen (2 m buiten hart spoor) hoog CBOI: buitenzijde boog
doorsnede rijdraad	100 mm ²
doorsnede compensatiekabel	500 mm ²
x=0	in het midden van een sectie
y=0	het midden (as) van de trambaan
z=0	elektrische langsas van de spoorstaven (ongeveer -0,08 m BS)
x-off-set van secties voor beide sporen	0 m, dus secties van beide sporen hebben gelijke x-coördinaten

Voor het segment vanaf de buslus tot en met P+R wordt een aangepaste topologie voor de voedings- en compensatiekabels toegepast. Dat wordt afzonderlijk in paragraaf 10.1 toegelicht.

3.4. Trammodel

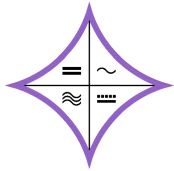
Voor de berekeningen is uitgegaan van 32 m trams met drie draaistellen, waarvan de buitenste twee zijn aangedreven. De pantograaf staat in het midden, boven het middelste draaistel en de voedings- en retourstromen naar de inverters lopen over het dak. De inverters bevinden zich op het dak boven de aangedreven draaistellen. De assen van elk draaistel hebben een onderlinge afstand van 2 m. De retourstroom van de inverters wordt afgevoerd via het middelste draaistel onder de pantograaf (zie ook tabel 3.4.1)



figuur 3.4.1 – schema elektrische trammodel voor de berekeningen

Tabel 3.4.1 – Modelparameters trams.

parameter	waarde
lengte van een tramstel	32 m
hoogte dak	3,5 m
positie pantograaf	midden tramstel
posities draaistellen en inverters	zie figuur 3.4.1.
stroomvoerende draaistellen	1 (D2, middelste, dus die onder de pantograaf)



3.5. Verkeersmodel

Verkeerstechnisch is een situatie gekozen waarbij twee trams op elk van beide sporen op een zeker moment op dezelfde langspositie rijden (gelijke x-coördinaat) en waarbij beide tegelijk de maximale stroom opnemen. Dat is in de praktijk een toestand die met een uitermate geringe kans voorkomt, maar het is wel een absolute “worst-case” als het gaat om de EM emissie. Aan de hand van de resultaten wordt beoordeeld of er kan of moet worden uitgegaan van een “realistic-case” met een wat ander verkeersbeeld en een lagere EM emissie.

Tabel 3.5.1 – Modelparameters verkeer.

parameter	waarde
aantal trams	1 op elk van beide sporen
aantal tramstellen per tram	2
opgenomen stroom	1000 A per tramstel (dus per pantograaf), dus 2000 A per tram, dus 4000 A totaal
relatieve positie trams op beide sporen	gelijk, beide trams rijden op dezelfde x-positie
positie trams in de secties	variërend, op zes verschillende posities

4. Aanpak

4.1. Stappen

Allereerst is afzonderlijk gekeken naar de situatie rond het CBOI conform Ref. [2], om te bepalen of de boogverruiming inderdaad zal leiden tot het beoogde doel: de EM emissie van het tramsysteem voldoende ver beneden het immuniteitsniveau brengen.

Daarna is voor vijf verschillende lengten van de compensatie secties met zes verschillende posities van de trams op het spoor de EN emissie berekend voor alle acht maatgevende locaties met gevoelige apparatuur. Met de resultaten van die berekeningen is een soort “worst-case” voor elke sectie lengte bepaald. Daarmee is berekend welke sectielengte waar op het tracé toelaatbaar is. Daarnaast zijn extra berekeningen uitgevoerd om de effecten van mastposities en voedingssymmetrie vast te stellen.

Vervolgens is gekeken naar de sectionering van het segment tussen bulus en P+R. Tenslotte is bepaald of situaties, waar sectionering niet voldoende is, of met additionele maatregelen voldoende EM reductie mogelijk is.

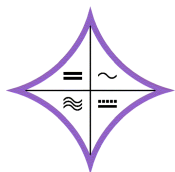
4.2. Output

In deze versie van het rapport zijn uitsluitend de relevante resultaten weergegeven.

5. De eisen

De eisen zijn vastgelegd in Ref. [3]. Uit de lijst van 46 locaties met gevoelige apparatuur zijn er acht (8) geselecteerd als kritiek op grond van hun combinatie van (i) immuniteitsniveau en (ii) afstand tot de trambaan. Alle overige locaties zijn EMC technisch niet-kritiek omdat ze (i) bij dezelfde afstand een hoger immuniteitsniveau hebben, (ii) met hetzelfde immuniteitsniveau op een grotere afstand staan, (iii) zowel een hoger immuniteitsniveau hebben als op een grotere afstand staan. Met andere woorden: als maatregelen aan het tramsysteem ertoe leiden dat op de kritieke locaties het EM emissieprobleem is opgelost, dan is het voor alle locaties opgelost.

Die kritieke locaties en de eisen zijn nog steeds dezelfde als die in Ref. [1] zijn gehanteerd, zij het dat de afstanden van Bloembergen (B) en van het CBOI (G) zijn geactualiseerd (zie tabel 5.1).



Tabel 5.1 – Immuniteitseisen.

Gebouw	locatie	y [m]	Bm [nT]	Opmerkingen
Kruyt W5 en W6	A	70	30	
Bloembergen	B	85	18	Bm geldt voor de z-richting
Nieuw Gildestein	C	88	71	
UMC H3	D	150	30	
UMC Q00	E	52	1500	
UMC E00	F	70	1500	
UMC CBOI	G	29	500	
CBS / KNAW	H	155	20	

De grootte y is de loodrechte afstand van een gevoelige locatie tot de langsas van de trambaan. Bm is het immuniteitsniveau in nT.

De hierboven aangegeven immuniteitseisen zijn niet gehanteerd als grenswaarden voor de emissie van het tramsysteem. Tussen theorie en harde werkelijkheid kunnen (en zullen meestal) verschillen zitten, die à priori meegenomen moeten worden. Er wordt van uitgegaan, dat er voor afwijkingen van verschillende aard, zowel in de modellering voor het rekenwerk als straks in de bouw, voldoende speelruimte moet zitten. Tot dusverre is die marge gesteld op 50% van de vereiste waarde. Met andere woorden: voor de tot dusverre uitgevoerde berekeningen is gehanteerd dat de reductie voldoende is, als de berekende waarde van het door de tram veroorzaakte B-veld niet groter is dan 50% van de vereiste waarde voor het B-veld.

In deze optimaliseringsslag is vooral de modellering van de werkelijkheid aanzienlijk nauwkeuriger, met name voor de de voertuigen. Het is daarom verantwoord om die marge enigszins te verkleinen.

Tabel 5.1 – Beoordelingscriteria voor de reductie van B_s .

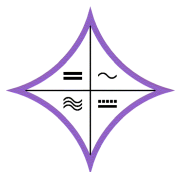
$B_s \leq 0,66 * B_m$	voldoende
$0,66 * B_m < B_s \leq B_m$	twijfelachtig
$B_s > B_m$	onvoldoende

Voor de beoordeling zijn de volgende criteria en kleurcodering gebruikt volgens tabel 5.1. De grens tussen twijfelachtig en voldoende is dus opgeschoven ten opzichte van wat in Ref. [1] is toegepast. B_s is de berekende waarde van de magnetisch fluxdichtheid.

6. Uitkomsten berekeningen

6.1. Sectielengte en trampositie

In tabel 6.1.1 zijn de resultaten van de berekeningen samengevat voor 6 verschillende lengten van de compensatiesecties: 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m, en 40 m. Verticaal zijn de afstanden r van de kritieke locaties weergegeven. Alle berekeningen zijn uitgevoerd voor 6 verschillende posities van de trams op het spoor en dus 6 verschillende posities in de secties. Per sectielengte zijn de grootste berekende absolute waarden weergegeven voor het B-veld (totaal en de x-, y-, z-componenten). In alle gevallen zijn de masten geplaatst in het midden van de baan (zie tabel 6.1.1).



Tabel 6.1.1 – Maximum waarden B-veld componenten bij verschillende lengten van de compensatie secties.

S15	Bt-max	Bx-max	By-max	Bz-max		S20	Bt-max	Bx-max	By-max	Bz-max
r [m]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]		r [m]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
29	264,507	155,547	248,781	103,678		29	327,503	293,986	293,478	133,173
52	56,369	30,352	51,254	32,631		52	73,117	49,789	65,082	40,951
70	27,305	13,444	24,081	18,254		70	32,527	20,195	27,840	22,867
85	16,746	7,754	14,123	15,054		85	18,841	10,975	15,467	15,059
88	16,106	7,046	12,963	11,608		88	17,326	9,715	13,856	14,597
150	5,518	1,462	3,355	4,011		150	5,309	1,692	3,380	5,061
155	5,166	1,323	3,129	3,755		155	4,980	1,518	3,154	4,739
S25	Bt-max	Bx-max	By-max	Bz-max		S30	Bt-max	Bx-max	By-max	Bz-max
r [m]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]		r [m]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
29	383,606	239,568	355,956	140,492		29	479,819	323,443	456,918	145,795
52	72,488	52,418	62,127	41,839		52	93,060	62,213	84,723	42,241
70	33,084	23,055	27,689	23,157		70	41,902	27,087	37,293	23,241
85	19,550	12,629	16,134	15,160		85	24,246	14,851	21,336	15,190
88	18,113	11,178	14,778	14,684		88	22,190	13,154	19,362	14,706
150	5,528	1,748	3,384	5,065		150	5,522	2,199	3,991	5,060
155	5,176	1,572	3,158	4,742		155	5,174	1,985	3,623	4,737
S35	Bt-max	Bx-max	By-max	Bz-max		S40	Bt-max	Bx-max	By-max	Bz-max
r [m]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]		r [m]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
29	571,779	434,916	546,719	150,203		29	662,645	550,816	627,418	154,026
52	105,044	74,936	96,318	42,646		52	122,336	92,164	116,953	42,923
70	45,399	32,584	40,590	23,310		70	52,689	39,376	50,379	23,355
85	25,671	17,811	22,794	15,205		85	29,499	21,785	28,211	15,223
88	23,191	15,744	20,494	14,707		88	26,486	19,349	25,321	14,744
150	5,528	2,493	3,913	5,070		150	5,552	3,028	4,744	5,080
155	5,180	2,223	3,535	4,747		155	5,200	2,689	4,278	4,756

Voor de navolgende beschouwingen wordt de grootste B component (x, y, z) als maatgevend beschouwd, behalve voor Bloembergen. Voor die locatie is de Bz maatgevend, omdat voor de apparatuur daar specifieke eisen gelden per richtingscomponent van het B-veld.

6.2. Secties van 15 meter

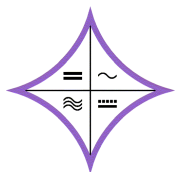
In eerste instantie is alles doorgerekend met secties van 20 m en langer. De uitkomsten zijn voor een deel iets hoger dan die van Ref. [1]. Dat heeft vooral te maken met de aanzienlijk nauwkeuriger modellering van de trams. Dat geeft uitkomsten, die voor het Kruidgebouw (afstand 70 m), Bloembergen (afstand 85 m) en het CBOI (afstand 29 m) in eerste instantie minder goed uitpakken.

De Bt bij het CBOI (328 nT) blijft weliswaar ruim beneden de eis van 500 nT, maar een behoorlijk deel van de oorspronkelijk marge van 250 nT wordt opgesoupeerd. De Bt van het Kruidgebouw was nog net twijfelachtig (26 nT ten opzichte van 30 nT), maar die verschuift naar onvoldoende (33 nT ten opzichte van 30 nT). Ook voor Bloembergen verschuift de kwalificatie "voldoende" naar "twijfelachtig" (15 nT ten opzichte van 18 nT).

Daarom zijn vervolgens berekeningen uitgevoerd met een secties van 15 m lengte. Met name op de wat kortere afstanden geeft dat een aanzienlijke verbetering. Voor het CBOI wordt de berekende waarde dan 265 nT, voor het Kruidgebouw wordt de berekende waarde 27 nT. Voor Bloembergen blijft de berekende waarde 15 nT. Te zien is, dat die waarde nauwelijks afhangt van de lengte van de secties. De Bz wordt veroorzaakt door factoren die nauwelijks van de sectielengte afhangen.

6.3. Boog CBOI: mastposities

Het eerdere ontwerp van de verruimde boog om het CBOI voorzag in de plaatsing van masten aan de buitenzijde van de boog. Middenmasten zijn daar niet mogelijk om verkeerskundige redenen. De keuze is



gebaseerd op de gedachte, dat verder weg ook beter is. Dat is in principe weliswaar juist, maar in deze situatie blijkt, dat het nadeel van een verminderde compensatie groter dan het voordeel van een grotere afstand. Dat heeft te maken met de onbalans in de grootte van de stromen die langs de masten omhoog gaan naar de bovenleiding versus de stromen die door de trams van bovenleiding teruggaan naar de spoorstaven.

Berekeningen hebben uitgewezen dat buitenmasten het meest ongunstig zijn. Plaatsing van masten aan twee zijden van de baan is beter en binnenmasten zijn nog iets beter. Dat levert op die locatie de beste EM reductie. Alle berekeningen zijn uitgevoerd voor de kortste afstand tussen CBOI apparatuur en baan.

6.4. Verhoogde spoorligging energiecentrale

De verhoging van de spoorligging geeft minieme verschillen ten opzichte van de thans geprojecteerde ligging. Voor alle UMC locaties geldt, dat de emissie gelijk blijft of een fractie lager wordt. Het verschil is echter dusdanig klein en in de goede richting (kleiner), dat daarmee in het onderstaande verder geen rekening wordt gehouden. De conclusie is dat de spoorverhoging, zoals nu voorgesteld, geen nadelig effect heeft op het halen van de emissie eisen.

7. Eerste toetsing van uitkomsten tegen de eisen

Voor de beoordeling zijn de volgende criteria en kleurcodering gebruikt volgens tabel 7.1. De grens tussen twijfelachtig en voldoende is opgeschoven ten opzichte van wat in Ref. [1] is toegepast. Dat vermindert de marges, maar dat is acceptabel, omdat op een aantal punten de modellering en de berekeningen nauwkeuriger nauwkeuriger zijn. daarvoor mag een deel van de marge worden ingeleverd

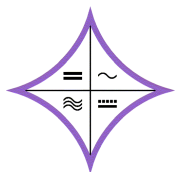
Tabel 7.1 – Beoordelingscriteria voor de reductie van B.

$B_s \leq 0,66 * B_m$	voldoende
$0,66 * B_m < B_s \leq B_m$	twijfelachtig
$B_s > B_m$	onvoldoende

Tabel 7.2 – Eerste beoordeling van de reductie van B.

Gebouw	locatie	y [m]	B _m [nT]	B _s [nT]	Opmerkingen
Kruyt W5 en W6	A	70	30	27	secties 15 m
Bloembergen	B	85	18	15	waarde B _z – secties tot 40 m
Nieuw Gildestein	C	88	71	27	secties tot 40 m
UMC H3	D	150	30	6	secties tot 40 m
UMC Q00	E	52	1500	122	secties tot 40 m
UMC E00	F	70	1500	53	secties tot 40 m
UMC CBOI	G	29	500	327/265	secties 20/15 m – middenmasten
CBS / KNAW	H	155	20	5	secties tot 40 m

De beoordeling is weergegeven in tabel 7.2. Voor de locaties C, D, E, F en H biedt compensatie voldoende soelaas, zelfs bij een sectielengte van 40 m. De EM emissie is veel lager dan de immuniteitsgrens en de marges zijn royaal. Voor locatie G (CBOI) is de situatie voldoende en die verbetert nog aanzienlijk als op dat deel van het tracé een aantal secties van 15 m lengte worden toegepast. Voor locatie B (Bloembergen) is het (volgens de criteria) precies aan. Er is nog 33% marge, maar veel rek zit er niet in. Overigens hangt dat nauwelijks af van de sectielengte ter plaatse. Voor locatie A (Kruytgebouw) blijft de situatie twijfelachtig, maar dan moeten de secties daar ter plaatse verkort worden van 20 naar 15 m. Dat is ook nodig voor Bloembergen, om te voorkomen dat die locatie in de categorie “onvoldoende” terecht komt.



8. Optimaliseren van de sectionering

8.1. Secties korter dan 20 m

In Ref. [1] is nog uitgegaan van een standaardlengte van 20 m voor alle secties. Uit het bovenstaande blijkt, dat het verstandig is om die lengte nog te verkorten tot 15 m ter plaatse van het Kruidgebouw en in de boog bij het CBOI.

Voor het Kruidgebouw en Bloembergen is dat nodig, om de EM emissie nog verder te reduceren. Anders zouden de emissiewaarden boven de immuniteitsgrenzen stijgen.

De boogverruiming leidt, zoals te verwachten, tot de beoogde daling van het EM niveau. Het EM veld in het CBOI wordt dusdanig, dat de immuniteitseisen gehaald kunnen worden. Toch heeft verder verkorten van de secties nut, omdat daarmee de marges aanzienlijk worden vergroot. Dat heeft te maken met de hoge mate van zekerheid (zo niet de absolute zekerheid) die op die locatie moet worden geboden.

Zorgdragen voor het feit dat de emissie van het tramsysteem niet boven de immuniteitsgrenzen stijgt, kan worden gezien als een veiligheidsissue. Dat hangt samen met de functie en werking van de apparatuur alsmede de risico's, die de in het CBOI behandelde patiënten kunnen lopen bij een te hoge EM emissie van het tramsysteem.

Dat betekent, dat er over een lengte van 180 m niet 10 ($= 180/20 + 1$), maar 13 ($= 180/15 + 1$) bovenleiding-masten geplaatst worden.

8.2. Secties langer dan 20 m

Voor drie compensatiesegmenten kunnen langere secties worden toegepast. Die segmenten moeten dan wel beginnen en eindigen op wat grotere afstand van Kruidgebouw, Bloembergen, respectievelijk CBOI. Die afstand is bepaald door van langere sectie te bepalen hoe ver weg ze verwijderd moeten zijn van een locatie, om een even hoog veld te geven als een reeks secties van 15 m lengte recht tegenover de locatie.

Uit de berekende gegevens is bepaald wat de toewijzing van sectielengten betekent. Dat is overigens puur bepaald op EMC technische gronden. Inpassing en bovenleiding techniek zijn verder niet in aanmerking genomen. Daarom is de toepassing van langere secties omschreven in de volgende liggingseisen voor het detailontwerp.

Vanaf de zijkant van het gebouw, gezien in de x-richting, mag het begin van een sectie niet "te dicht bij" liggen (de minimum sectie-afstand). In tabel 8.2.1. zijn van het Kruidgebouw en het CBOI de minimum sectie-afstanden gegeven voor verschillende lengten van een sectie.

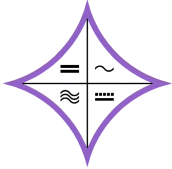
Tabel 8.2.1 – Toepassing langere secties en minimum afstanden.

minimum sectie afstand in x-richting vanaf zijkant gebouw					
locatie	sectie=20 m	sectie=25 m	sectie=30 m	sectie=35 m	sectie=40 m
Kruidgebouw	65 m	75 m	85 m	95 m	105 m
Bloembergen	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m
CBOI	60 m	70 m	79 m	88 m	95 m

Bijvoorbeeld: vanaf 105 m ter weerszijden van het Kruidgebouw mogen secties worden toegepast van 40 m lengte. Voor Bloembergen maakt het weinig uit wat de sectielengte is. De grootste waarde van Bz is nagenoeg gelijk bij alle sectielengten. Vanaf 95 m ter weerszijden van het CBOI gebouw mogen secties worden toegepast van 40 m lengte. Dat laatste geldt overigens voor het tracé tot aan de keerlus voor de bussen.

Een praktische vertaling van die eisen is (bijvoorbeeld) het volgende.

- vanaf het Kruidgebouw naar het westen (tot de Sorbonnelaan):
 - o tot 65 m naar het westen: secties van 15 m;
 - o vervolgens twee secties van 20 m;
 - o daarna secties van 40 m;
- vanaf het Kruidgebouw naar het oosten: idem als vanaf Kruidgebouw naar het westen;
- vanaf CBOI naar het westen: idem als vanaf Kruidgebouw naar het westen;
- vanaf CBOI naar het noordoosten: idem als vanaf Kruidgebouw naar het westen.

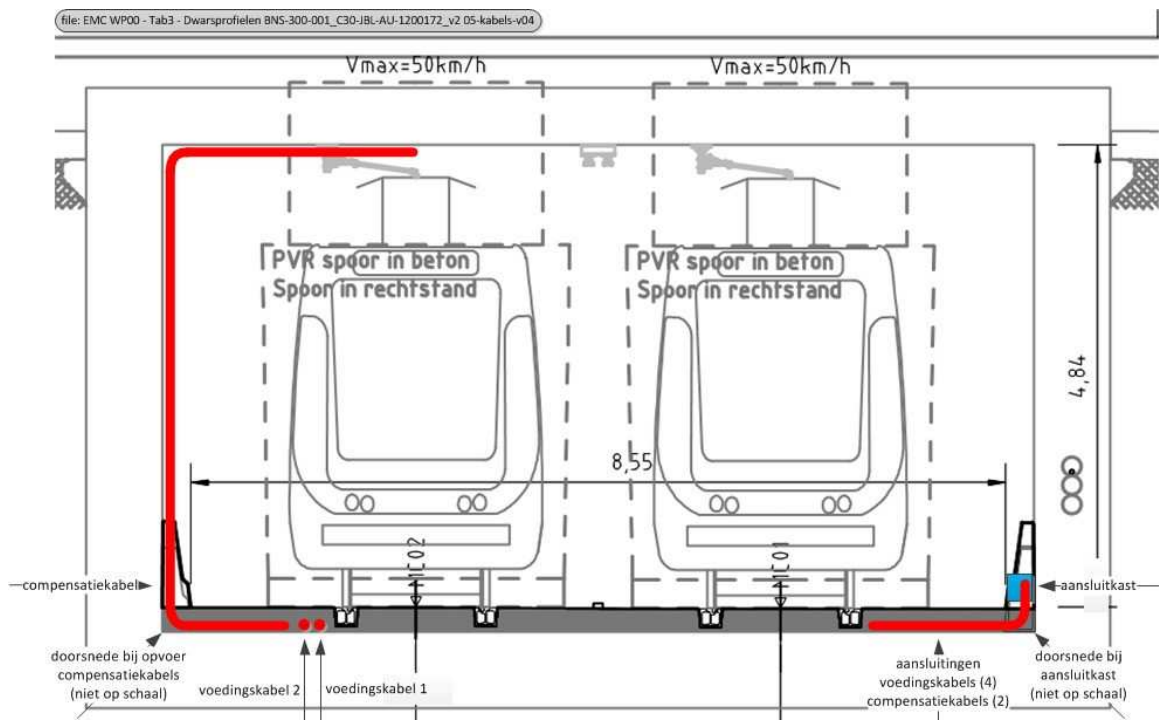


9. Van buslus tot het eindpunt P+R

9.1. Afwijkende topologie sectioneringskabels

Van het laatste deel van de Uithoflijn is al een groot gedeelte gerealiseerd. De onderdoorgang van de Universiteitsweg met de toeleidende open bakken en de betonconstructies van de halte P+R zijn gereed. De afbouw moet nog plaats vinden én er moeten nog voorzieningen worden getroffen voor de bekabeling van het sectioneringssysteem. Dat laatste is niet zonder betekenis, want het is nauwelijks doenlijk om in het uitgeharde beton nog kabels te leggen volgens de topologie van het overige deel van de lijn.

Er is, binnen de gegevens van de reeds gerealiseerde betonbouw, gezocht naar een bouwbare topologie die het dichtst de standaard van de rest van de lijn benadert. Het resultaat is gegeven in figuur 10.1.1. De voedings- en compensatiekabels worden voor elk van beide sporen niet tussen de spoorstaven gelegd, maar dicht naast de buitenste spoorstaaf van elk spoor. Op de plaatsen van de voedingskasten buigen ze horizontaal uit naar de betonnen wand en worden opgevoerd naar de aansluitkast. Op de plaatsen van de aansluitingen naar de bovenleiding buigen de beide compensatiekabels uit naar de betonnen wand en worden vervolgens opgevoerd naar de bovenzijde van de uithouder voor de rijdraad.

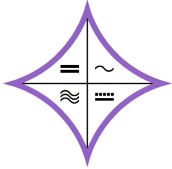


figuur 10.1.1 – kabeltopologie in het P+R segment

9.2. Berekening van de EM emissie

Die topologie is doorgerekend voor de secties die zich op de kortste afstand bevinden van de KNAW apparatuur (zie Ref. [4]). Die secties bevinden zich rond de eerste boog (van oost naar noord-west) ten westen van de onderdoorgang.

Uit de berekeningen volgt, dat deze topologie emissiewaarden geeft die bijna gelijk zijn aan de geldende immuniteitseis ter plaatse (20 nT) en dat is onvoldoende. De berekeningen zijn echter (ook hier) uitgevoerd voor de maximale stroom van vier tramstellen. Ter plaatse geldt echter een maximaal toegestane baansnelheid van 15 km/uur. En omdat die ruimschoots lager is dan de zogenoemde snelheid van constant vermogen, zal de stroom ook veel lager zijn.



Als we aannemen dat de snelheid van constant vermoge gelijk is aan 25 km/u en het statische verbruik per tram een maximale stroom heeft van 80 A, dan is de stroomopname voor de beide tractiesystemen bij 25 km/u in volle acceleratie gelijk aan 920 A. Bij volle acceleratie tot 15 km/u blijft de tractiestroom beperkt tot een waarde van $(15/25) \cdot 920 = 552$ A. Per tramstel zal de maximaal opgenomen stroom ter plaatse niet meer bedragen dan $552 + 80 = 632$ A. Als de stromen reduceren tot 64% zullen de bijbehorende componenten van het B-veld dat ook doen. De maximale emissie op 155 afstand wordt dan minder dan 13 nT en voldoet daarmee aan het geldende pass-criterium.

10. Kruidgebouw en Bloembergen

10.1. De haalbare EM reductie met sectionering

Bij Kruid en Bloembergen zijn de rekenresultaten wat ongunstiger geworden ten opzichte van de vorige serie berekeningen. De nauwkeuriger modellering (met name van de trams) levert bij berekening hogere waarden voor het B-veld op die locaties. Voor beide geldt, dat de berekeningen weliswaar een waarde geven die lager is dan het immuuniteitsniveau, maar de gewenste marges zijn te smal geworden. Daarmee stijgt het risico, dat er in de praktijk op zekere momenten niet zal worden voldaan aan de eisen. Met de standaard topologie van sectioneren kan de reductie nauwelijks worden verbeterd. Een sectielengte van 15 m is al redelijk minimaal uit oogpunt van bovenleidingsysteem en inpassing in de omgeving. Verdere verkorting levert voor Kruid onvoldoende soelaas. Voor Bloembergen is de waarde van het veld in verticale richting (B_z) maatgevend, maar de grootte daarvan hangt nauwelijks af van de sectielengte. Vooral de onbalans van de stromen in de x-richting (bovenleiding, voedingskabels en spoorstaven) zijn bepalend en dat kan (op een praktische manier) nauwelijks worden verbeterd. En dus zijn aanvullende maatregelen nodig.

10.2. Maximale stroom en stroombeperking

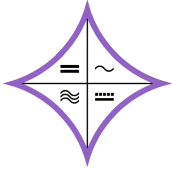
De meest voor de hand liggende maatregel is, het beperken van de opgenomen stromen door de trams. Omdat alle B-veld componenten lineair schalen met de stroom, kan eenvoudig worden geschat wat dat betekent. Om beneden de 66% grens te blijven, moet de gezamenlijke stromen van twee dubbelstels trams worden teruggebracht. Voor Kruid wordt het maximum $20/27 \cdot 4000$ A = 2963 A (reductie naar bijna 75%) en voor Bloembergen wordt het maximum $12/15 \cdot 4000$ A = 3000 A (reductie naar 80%). Op het eerste gezicht zijn dat geen onrustbarende getallen. Op de momenten dat het moet gebeuren, is het operationele gevolg in het ergste geval een paar seconden rijtijdverlies, want het gaat erom dat ze elkaar niet mogen passeren bij volle stroomopname en die tijdsduur bedraagt hooguit een seconde of 8.

Dat stroombeperking lang niet altijd nodig is heeft te maken met de gehanteerde verkeersmodellering. Er is gerekend met een verkeerssituatie waarbij twee dubbelstels trams (ongeveer) op dezelfde x-positie de maximale stroom opnemen. Dat is redelijk worst-case, omdat beide voertuigen:

- zich tegelijkertijd op ongeveer dezelfde positie moeten bevinden, én
- sneller moeten rijden dan de zogenoemde constant vermogenssnelheid (ongeveer 25 km/u), én
- bezig zijn om maximaal te versnellen, én
- langzamer moeten rijden dan de toegestane baansnelheid.

Er is (nog) niet berekend, met welke kans die situatie zich zal voordoen op het baansegment ter hoogte van Kruid en Bloembergen. Kwalitatief kan daarover (op dit moment) het volgende worden opgemerkt:

- het baansegment bevindt zich op korte afstand van de halte Padualaan en het met een VRI geregelde kruispunt Padualaan-Heidelberglaan;
- trams richting P+R zullen vanaf de halte of de stopstreep versnellen en daarom enige tijd de maximale stroom opnemen. Als de toegestane baansnelheid wordt bereikt, zal de opgenomen stroom sterk afnemen;
- trams richting centrum zullen waarschijnlijk niet voluit accelereren. Ze naderen de VRI of halte en ze zullen in veel gevallen aanzienlijk minder stroom voeren dan het maximum, want ze zijn op snelheid en hebben alleen (tractie)vermogen nodig om die te behouden. Met andere woorden: de dichtstbij rijdende tram veroorzaakt (door zijn lagere stroom) doorgaans een geringer B-veld.



10.3. Maatregelen

Om ervoor te zorgen dat een kleine kans tot nul reduceert, zijn een paar simpele maatregelen voldoende:

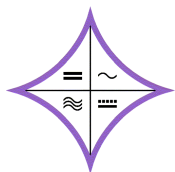
- er wordt voor gezorgd, dat de trams in beide richtingen in de verkeersregeling maximale prioriteit krijgen. Voor zowel trams die van de halte vertrekken in oostelijke richting als trams die naar het westen op de halte toerijden, wordt er in de verkeersregeling voor gezorgd, dat zij niet vóór de stopstreep tot stilstand komen. Voor de trams naar het oosten levert dat een maximale stroomopname op de grootst mogelijke afstand van Kruidt, want hoe eerder hij de baansnelheid bereikt, des te eerder neemt de stroom significant af. Voor de trams naar het westen levert dat op, dat er geen acceleratie vanaf de stopstreep nodig is en dat met relatief lage stroomopname naar de halte kan worden gereden;
- voor trams naar het oosten wordt (ofwel door een halte-vertreksignaal, ofwel met behulp van het tramlicht van de VRI) één en ander zo geregeld, dat er in het Kruidt-Bloembergen segment zich niet twee trams tegelijk bevinden.

De precieze technische uitwerking moet nog wel gebeuren, maar toepassing van deze relatief simpele maatregelen maakt, tezamen met de ontworpen sectionering, dat de EM emissie bij Kruidt en Bloembergen niet boven de gestelde limieten uitstijgt.

11. Nauwkeurigheid van berekeningen

Het gestelde in Ref. [1] ten aanzien van modellering, nauwkeurigheid, (on)zekerheid en risico's blijft ook nu onverkort van kracht. Als aanvulling daarop kan nog het volgende worden vermeld. De geproduceerde getallen geven een redelijk nauwkeurig beeld van de hierboven beschreven en gemodelleerde situaties. Omdat er een oneindig aantal combinaties is van verschillende factoren is op de volgende wijze modelmatig gereduceerd tot een praktische omvang:

- positie van de trams in de secties. Er is thans gerekend met zes verschillende posities voor beide trams op de gesectioneerde infrastructuur. Dat blijkt nog redelijke verschillen te geven voor de mate van compensatie en de waarden van B . Van alle berekeningen zijn steeds de grootste absolute waarden (dus die van de meest ongunstige positie van de tram in de secties) genomen. In wezen is daarmee op een paar manieren steeds de worst-worst case uitkomst gehanteerd;
- de voeding vanuit beide onderstations. Er is steeds uitgegaan van gebalanceerde voeding. Beide leveren evenveel stroom aan elk van de beide trams ($2 \cdot 1000$ A). Er is steekproefgewijze gerekend aan voeding vanuit één onderstation. Dat levert geen saillante verschillen in de piekwaarden van het B-veld. Uiteraard is wel te zien dat het restveld van de stromen door de voedingskabels en de spoorstaven aan de ene zijde van de trams naar nul nadert en aan de andere zijde dubbel zo hoog wordt als bij tweezijdig gebalanceerde voeding. De grootte daarvan is overigens relatief gering;
- trams op ongelijke x-posities in de secties. Er is steeds uitgegaan van twee voertuigen steeds op dezelfde x-positie in de secties. Naar verwachting levert dat voor die positie de maximale emissie naar de omgeving, omdat de compensatie voor beide ongeveer gelijk wel of niet plaats vindt. Er is steekproefgewijze gerekend aan twee trams op elk spoor, die niet dezelfde x-positie hebben. Daaruit blijkt inderdaad dat de emissie in die gevallen altijd kleiner is. Of dat het gevolg is van (gedeeltelijke) onderlinge compensatie of verdeling over een grotere ruimte, is niet in detail onderzocht.



12. Conclusies

Op grond van de uitgevoerde berekeningen met de hierboven gedefinieerde modellen, de gestelde eisen en de daarop gebaseerde pass-fail criteria (pass bij een EM emissie door het tramsysteem van minder dan 66% van de eis), kan het volgende worden gesteld.

Over een aanzienlijke lengte van het tracé kan EMC technisch worden volstaan met secties van 40 m lengte. Dat is de (in dit rapport) aangenomen maximum afstand tussen twee opeenvolgende masten van een bovenleidingsysteem, waarin compensatiekabels naar de bovenleiding worden opgevoerd. Om andere redenen kan tussen die twee nog extra masten worden geplaatst, maar die hebben dan geen compensatiekabels. Die 40 meter betekent praktisch, dat de bouwkosten minder hoog zullen zijn dan bij toepassing van secties met een lengte van 20 meter.

Bij de locaties A (Kruyt) en G (CBOI) moeten over enige afstand secties worden toegepast met een lengte van 15 meter. Dat is nodig om op die locaties de EM emissie voldoende laag te houden. Bij locatie G is dat ook direct voldoende om het pass-criterium te halen.

Bij de locaties A (Kruyt) en B (Bloembergen) zijn additionele maatregelen nodig in de vorm van stroombeperking, om het pass-criterium te halen. De beperking van de stroom is relatief gering, past bij het verkeersgedrag van de trams ter plaatse, zal statistisch vermoedelijk weinig voorkomen en wordt met simpele voorzieningen afgedwongen.

De vereiste immuniteitsniveaus van de locaties C (Nieuw Gildestein), D (UMC H3), E (UMC Q00) en F (UMC E00) kunnen door sectionering worden gehaald. De eerder vastgestelde marges waren al ruim en de pass-criteria worden, ook na berekeningen met de gewijzigde tramgegevens, nog steeds gehaald.

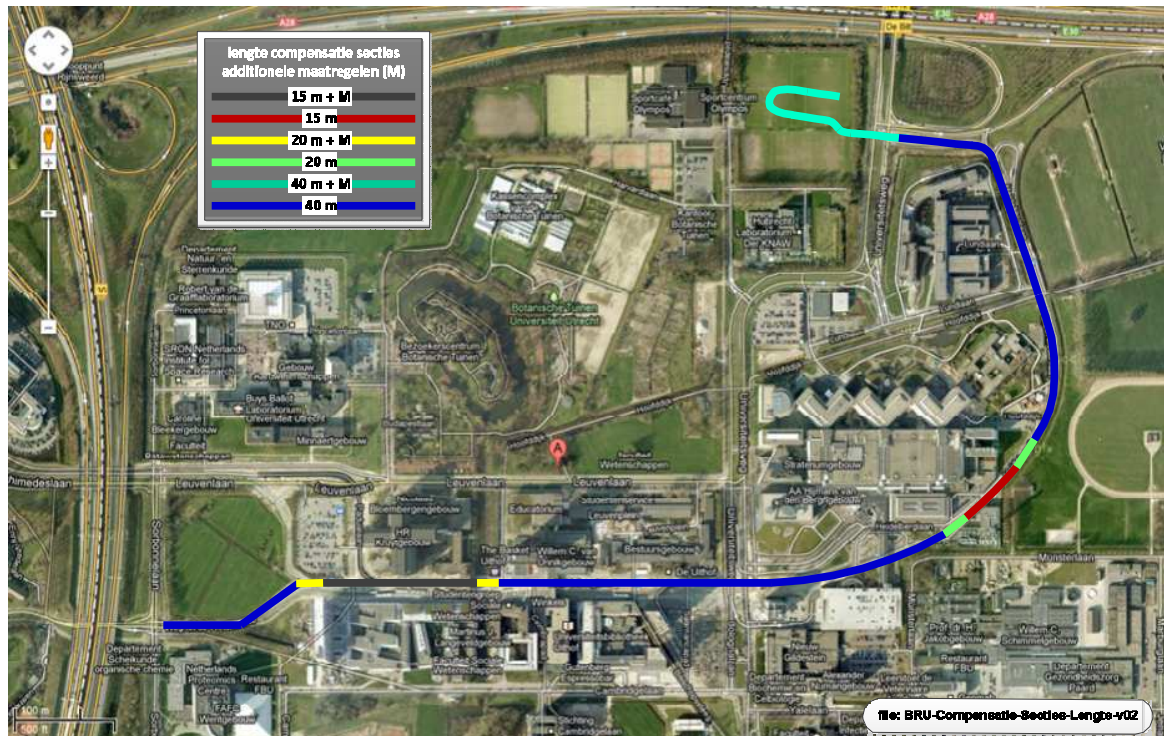
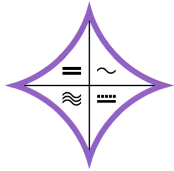
Ten behoeve van locatie H (KNAW) is eveneens sectionering nodig. Omdat het beton van de trambaan vanaf de buslus tot het eindpunt al spijkerhard is, is een alternatieve kabeltopologie uitgewerkt. Op het laatste gedeelte van dit segment geldt bovendien een maximum baansnelheid van 15 km/uur en die beperking betekent dat de stroom per tramstel niet groter zal worden dan 64% van het maximum voor de tractie installaties van 900 A. De totale stroom per tramstel is dan 632 A. In combinatie met sectionering wordt dan het pass-criterium voor deze locatie gehaald.

Samengevat levert dat het overzicht van tabel 12.1

Tabel 12.1 – Tweede beoordeling van de reductie van B.

Gebouw	locatie	y [m]	Bm [nT]	Bs [nT]	Opmerkingen
Kruyt W5 en W6	A	70	30	20	secties 15 m + beperking van grootte van stromen (operationeel)
Bloembergen	B	85	18	12	waarde Bz – secties tot 40 m + beperking van stromen (operationeel)
Nieuw Gildestein	C	88	71	27	secties tot 40 m
UMC H3	D	150	30	6	secties tot 40 m
UMC Q00	E	52	1500	122	secties tot 40 m
UMC E00	F	70	1500	53	secties tot 40 m
UMC CBOI	G	29	500	265	secties 20/15 m + binnenmasten
CBS / KNAW	H	155	20	13	secties tot 40 m + snelheidslimiet 15 km/u

Voor het gehele tracédeel vanaf Sorbonnelaan tot en met het eindpunt bij P+R is in figuur 12.1 samengevat welke maatregelen op welke deel van het tracé nodig zijn, om op alle gevoelige locaties te zorgen voor een voldoende reductie van de EM emissie van het tramsysteem.



figuur 12.1 – lengte van de compensatiesecties wel (+M) of niet in combinatie met additionele maatregelen

13. Referenties

- [1] filenaam: BRU-EMC-Uithoflijn-DO-tekst-01-v08
 auteur: D. van Bakkum – EMPS
 versie: 0.8
 datum: 05-02-2013

- [2] filenaam: Map22 - Tab02 - bijlage 1 WP0-BNS-201-021_C30-JBL-AU-1200105_v6.0.pdf
 Map22 - Tab02 - bijlage 1 WP0-BNS-201-022_C30-JBL-AU-1200106_v6.0.pdf
 auteur: J.P. van Blitterswijk – ITC
 versie: 6.0
 datum: 19-09-2013

- [3] filenaam: BRU-EMC-Uithoflijn-30-Compensatie-CBOI-02-v03
 auteur: D. van Bakkum – EMPS
 versie: 0.6
 datum: 24-01-2013

- [4] filenaam: BRU-EMC-Uithoflijn-Sectionering-Onderdoorgang-P+R-v03
 auteur: D. van Bakkum – EMPS
 versie: 0.2
 datum: 12-12-2013