



Stageverslag  
Optimalisatie van de bekabeling van het *Electrical Power System*

Distributie:

J. Kos

R. Maas

J.W. Smeltink

M.J.A. Visser

A.A. ten Dam

S. Bhulai (VU)

A.C.M. Ran (VU)

3x M. Maëla (VU)

Niets uit dit document mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het NLR.

Hoofdafdeling:  
Aerospace Vehicles

Opgesteld:  
Martin J.A. Visser

Goedgekeurd:  
J.K./A.A.t.D.

Order-/codenummer:

00000.4.3

Afgesloten:

Juni 2004

Rubricering titel:

Ongerubriceerd





## **Samenvatting**

Het *Electrical Power System* (EPS) project heeft ten doel het analyseren en optimaliseren van het EPS van een generiek vliegtuig. Dit document beschrijft het optimalisatieprobleem dat daaraan ten grondslag ligt. Eerst wordt ingegaan op het reeds ontwikkelde rekenmodel waarin bekabelingschema's kunnen worden gemodelleerd. Hieruit wordt een vastgestelde structuur van het optimalisatieprobleem afgeleid wat de probleemomschrijving oplevert.

De probleemomschrijving is omgezet tot een tweetal wiskundige modellen welke beide, gegeven een aantal aannamen, de optimale oplossing voor het optimalisatieprobleem vinden. De beide modellen zijn geïmplementeerd met de programmeertaal C++.

Het programma is geverifieerd en gevalideerd aan de hand van een aantal testvoorbeelden. De belangrijkste vindingen daarbij waren dat het programma goed lijkt te functioneren en dat het programma in staat is, zelfs voor grotere vliegtuigmodellen, correcte oplossingen te vinden binnen een reële rekentijd. Daarnaast biedt de programmatuur een fors aantal instellingen waarmee het optimalisatieproces gestuurd kan worden.



## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Probleemstelling</b>	<b>9</b>
2.1	Historie en huidige situatie	9
2.2	Doel	10
2.3	Afbakening	11
2.4	Optimalisatiecriteria	14
2.5	Prestatieindicatoren	15
2.6	Veronderstellingen	16
2.7	Mogelijke modeluitbreidingen / verbeteringen	18
<b>3</b>	<b>Modellen</b>	<b>21</b>
3.1	Beslissingen	21
3.1.1	Model I	22
3.1.2	Model II	24
3.2	Doelfunctie en constraints	25
<b>4</b>	<b>Verificatie en validatie</b>	<b>27</b>
4.1	Verificatie	28
4.1.1	Teststrategie	28
4.1.2	Resultaten	33
4.1.2.1	Basistest	33
4.1.2.2	Vergelijking met het rekenmodel	35
4.1.3	Performance	36
4.2	Validatie	39
4.2.1	Teststrategie	39
4.2.2	Validatietesten	43
4.2.2.1	Basistest	43
4.2.2.2	Validatietest twee	46
4.2.2.3	Validatietest drie	52
4.2.3	Prestatieindicatoren	56
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>59</b>
5.1	Samenvatting en conclusies	59
5.2	Aanbevelingen	60



**6 Referenties**

**63**

(64 pagina's totaal)



### Lijst van figuren

Figuur 1: een voorbeeld van een bekabelingschema.....	10
Figuur 2: testvliegtuig voor verificatie.....	29
Figuur 3: Oplossing basistest .....	35
Figuur 4: de gemiddelde oplostijden per groep beslissingsvariabelen voor model I en II.....	37
Figuur 5: de gepaarde oplostijden voor model I en II, exclusief 'outliers' .....	38
Figuur 6: onderste niveau van het vliegtuigmodel voor de validatie .....	41
Figuur 7: bovenste niveau van het vliegtuigmodel voor de validatie .....	42
Figuur 8: zijaanzicht van het vliegtuigmodel voor de validatie .....	43
Figuur 9: onderste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie, ingevuld met de gevonden oplossing .....	44
Figuur 10: bovenste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie, ingevuld met de gevonden oplossing .....	45
Figuur 11: onderste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie bij een minimaal 'centre of gravity' .....	48
Figuur 12: bovenste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie bij een minimaal 'centre of gravity' .....	49
Figuur 13: onderste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie bij een minimaal x-coördinaat van 25.55 voor het 'centre of gravity' .....	53
Figuur 14: bovenste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie bij een minimaal x-coördinaat van 25.55 voor het 'centre of gravity' .....	54

### Lijst van tabellen

Tabel 1: de waarden van enkele criteria, gegeven de optimale oplossing van de basistest .....	34
Tabel 2: de uitvoer van het rekenmodel gegeven een optimale oplossing uit epsopt .....	36
Tabel 3: de routeringen tussen de verdelers en generatoren gegeven een minimaal 'centre of gravity' .....	51
Tabel 4: een opsomming van een aantal prestatieindicatoren voor de validatietests.....	56



## 1 Inleiding

Ieder vliegtuig bevat een groot aantal systemen die elektrische energie verbruiken zoals de keukens, de boordradio en de recirculatiefan van het airconditioningsysteem. In de laatste jaren worden steeds meer systemen van elektrische energie voorzien in plaats van meer conventionele energiebronnen, zoals bijvoorbeeld hydraulische energie. Op deze wijze kan een efficiëntie verbetering en/of gewichtsbesparing van het vliegtuig worden gerealiseerd. Door de toename van het aantal elektrische systemen wordt het gewicht van de bekabeling steeds belangrijker. Uit de noodzaak om dit gewicht en eventueel andere eigenschappen van de bekabeling voor nieuwe vliegtuigen beter in beeld te brengen is het *Electrical Power System* (EPS) project gestart.

Het EPS probleem dat gekenschetst wordt is in essentie een optimalisatieprobleem: “Hoe moet de stroombekabeling van het vliegtuig worden aangelegd ten einde het gewicht (en zoals later duidelijk wordt ook andere eigenschappen) daarvan te optimaliseren?”<sup>1</sup>. Omdat een vliegtuig een bijzonder complex systeem is zal eerst een exacte beschrijving van het probleem worden gegeven en de bestaande modellering worden uitgelegd. De modellering kan worden gezien als een eerste afbakening voor het EPS systeem. Dit wordt beschreven in hoofdstuk 2.

In deze stage wordt dit optimalisatievraagstuk met een tweetal wiskundige modellen beschreven. Het in hoofdstuk 2 beschreven systeem blijkt vrijwel volledig om te schrijven tot een stelsel lineaire vergelijkingen. Dit is gunstig want van dit soort stelsels is bekend dat zij binnen reële rekentijd optimaal oplosbaar zijn. Een beschrijving van de modellen is te vinden in hoofdstuk 3, meer informatie over de programmatuur die is gebruikt voor de daadwerkelijke implementatie van de twee modellen is te vinden in de gebruikershandleiding [15].

In de verificatie (paragraaf 4.1) is het programma, genaamd ‘epsopt’, getest. Dit leverde goede, eenduidige resultaten op voor kleine vliegtuigmodellen. De validatie kon daarna ook correct worden uitgevoerd (zie paragraaf 4.2). Uit deze resultaten kunnen een aantal interessante conclusies worden getrokken over het EPS systeem en over het nut van het oplossen van EPS problemen met wiskundige technieken. In de conclusies zullen ook enkele prestatieindicatoren nader worden onderzocht en een kritische analyse van het uiteindelijke resultaat worden gegeven, zie daarvoor hoofdstuk 5.

Meer details over de wiskundige modellering, de verificatie, de validatie en de implementatie zijn verschenen in [16].

---

<sup>1</sup> Er zal in dit verslag vanuit worden gegaan dat met “bekabeling” en “optimalisatie van bekabelingsschema” altijd de stroombekabeling en stroombekabelingsschema’s worden bedoeld. Dit is dus de bekabeling bedoeld voor stroomtransport. Zo wordt in het verslag geen data-bekabeling beschouwt, tenzij anders vermeld.



Mijn dank gaat uit naar al de reviewers die mijn stageverslag grondig hebben doorgelezen op fouten en onduidelijkheden. Ik wil daar Johan Kos, Sandjai Bhulai, André Ran en in het bijzonder Robert Maas hartelijk voor bedanken. Ook gaat mijn dank uit naar mijn vriendin Cindy die mij tijdens mijn stage enorm heeft gesteund.



## 2 Probleemstelling

In dit hoofdstuk wordt het EPS optimalisatieprobleem gedefinieerd en de voor dit probleem reeds bestaande modellering besproken. De situationering in paragraaf 2.1 beschrijft de historie van het EPS project en wat er reeds in dit project bereikt is. Daarmee kan het doel van het oplossen van het EPS probleem worden uitgelegd wat in paragraaf 2.2 gebeurt. In paragraaf 2.3 volgen een aantal definities van de begrippen die worden gebruikt voor het beschrijven en analyseren het EPS systeem en die van belang zijn voor het opstellen van de modellering (hoofdstuk 3). Omdat deze definities reeds een basis leggen voor de modellering kan paragraaf 2.3 worden gezien als een afbakening van het EPS systeem. In paragraaf 2.4 wordt het doel van een EPS optimalisatie gegeven door relevante optimalisatiecriteria te beschrijven. De uiteindelijke maatstaven waaraan de kwaliteit van het model en de implementatie daarvan kunnen worden gemeten worden beschreven in paragraaf 2.5 door middel van prestatieindicatoren. Als voorbereiding op de modellering van de optimalisatie (hierna te noemen: modellering) worden enkele veronderstellingen toegevoegd in paragraaf 2.6. Daarna wordt in paragraaf 2.7 globaal aangegeven hoe het model moet worden aangepast wil men enkele veronderstellingen uit paragraaf 2.6 kunnen laten vervallen. We stellen daarnaast ook een aantal mogelijke uitbreidingen van de modellering op.

Doel, definities, criteria, veronderstellingen, prestatieindicatoren en mogelijke modelverbeteringen vormen samen een structuur waarbinnen het optimalisatieprobleem is vastgelegd en kan worden opgelost. In zijn geheel vormt dit hoofdstuk dus een omschrijving van het doel van mijn stage.

### 2.1 Historie en huidige situatie

Het EPS project is gerelateerd aan een project genaamd *Power Optimised Aircraft* (POA) welke voor een deel door het NLR wordt uitgevoerd. Het POA project heeft ten doel “...het identificeren, optimaliseren en valideren van innovatieve vliegtuigtechnologie die bijdraagt aan een afname van de consumptie van niet-voortstuwende energie...”<sup>2</sup>.

De eerste stap die in het EPS project is gezet was het maken van een haalbaarheidsstudie [20]. Deze studie bleek positief over de mogelijkheden van een EPS rekenmodel waarop later optimalisatie technieken toegepast konden worden. De tweede stap was het implementeren van dit rekenmodel.

---

<sup>2</sup> “...to identify, optimise and validate innovative aircraft equipment which contributes to the reduction in consumption of non-propulsive power...”

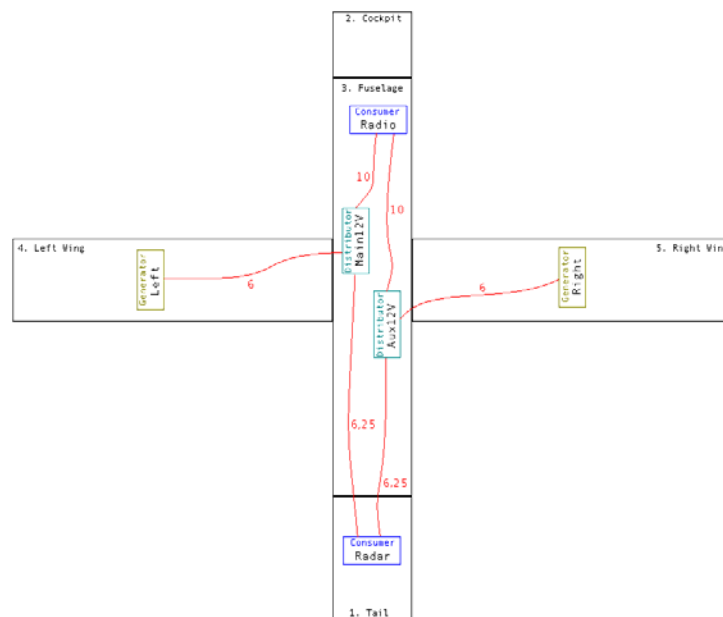
Hierbij is gekozen voor een object-georiënteerd MatLab model dat gebruikt kan worden om:

- Een logische definitie van een willekeurig EPS bekabelingsprobleem op te stellen.
- Gegeven een oplossing (een bekabelingschema plus de plaatsing van de apparatuur) de waarden van enkele criteria te berekenen (kosten, gewicht, volume etc.).

In de derde stap is een begin gemaakt aan de optimalisatie van dit systeem. Hiertoe is eerst een wiskundig model gemaakt waarin een aantal modelleringvoorstellen werden gedaan. Daarna is één model uitgewerkt door middel van een implementatie in MatLab [2][3]. De gekozen modellering had echter de beperking dat slechts de lengte van de bekabeling werd geoptimaliseerd en niet het beoogde gewicht [21].

## 2.2 Doel

Het EPS project heeft tot doel het analyseren en optimaliseren van het EPS van een generiek vliegtuig. Dit houdt in het vinden van een optimaal bekabelingschema voor de elektrische bekabeling in een vliegtuig. In de optimalisatie moeten de fysieke plaats van stroomverbruikende apparaten in het vliegtuig worden bepaald samen met een optimale routing van de bekabeling, binnen door de gebruiker vastgestelde randvoorwaarden. Een gesimplificeerd bekabelingschema kan als volgt worden voorgesteld.



Figuur 1: een voorbeeld van een bekabelingschema<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Merk op dat dit slechts een fictief voorbeeld is en dat daarom de lengten, apparatuur en bekabeling zoals hier weergegeven in het geheel niet overeenkomen met die van een realistisch vliegtuig.



Zoals te zien in Figuur 1 is er onderscheid gemaakt in de plaatsing van drie typen apparaten namelijk de generatoren, verdelers en verbruikers<sup>4</sup> en is het “vliegtuig” opgedeeld in zogenaamde zones waarin deze apparaten zich bevinden. Deze modellering van het EPS systeem is een vast gegeven en is opgenomen in het reeds bestaande EPS rekenmodel, zie voor meer details hierover ook [3] en [21]. We stellen hier dat deze modelleringstap niet af doet aan de oorspronkelijke probleemstelling. Voor de modellering van de apparaten is dit gemakkelijk in te zien omdat elk elektrisch apparaat in een vliegtuig in exact één van de drie categorieën voor apparatuur valt (zie 2.3). De zones kunnen door een gebruiker zelf gespecificeerd worden zodat verschillende typen vliegtuigen geïmplementeerd kunnen worden. Het indelen in zones is daarnaast een logisch concept dat vaak wordt toegepast in de vliegtuigindustrie.

### 2.3 Afbakening

De drie typen apparaten die in het model aan de zones kunnen worden toegevoegd zijn als volgt te omschrijven:

- **Generator.** De generatoren wekken alle stroom op die in het vliegtuig gebruikt kan worden. Alle stroomgebruikers zullen dus direct of indirect op een generator aangesloten moeten worden. De generatoren moeten zich dichtbij de motoren van het vliegtuig bevinden om stroom op te kunnen wekken. De meeste vliegtuigen bevatten twee of meer generatoren. Als dit het geval is dan moet per generator worden bepaald of dit een backupgenerator, hoofdgenerator, beide of geen van beide is (dit gebeurt onder andere aan de hand van de plaatsingen van alle generatoren). Mocht er een hoofdgenerator uitvallen dan behoort zijn backupgenerator de systemen van stroom te voorzien zoals gespecificeerd in een noodregime<sup>5</sup>. Vanzelfsprekend moet de bekabeling in overeenstemming zijn met de verschillende aanwezige regimes. De plaatsingen van de generatoren in het vliegtuig zullen in het algemeen al op voorhand vast liggen.
- **Verdeler**<sup>6</sup>. De verdelers verdelen de stroom van de generatoren over de verbruikers met de juiste stroomsterkte en spanning. De verdelers vervullen daarmee de belangrijkste backup rol in het EPS systeem. De verdelers in dit model kunnen namelijk worden aangesloten op twee of meer generatoren. Dit houdt in dat bij uitval van een generator alle verdelers en de daarop aangesloten verbruikers nog van stroom kunnen worden voorzien door een andere

---

<sup>4</sup> Er zal in dit verslag vanuit worden gegaan dat met “verdeler” een stroomverdeler of stroomtransformator wordt bedoeld en met “verbruiker” een stroomverbruiker of stroomconsument. De Engelse benamingen voor deze objecten zijn respectievelijk een ‘distributor’ en een ‘consumer’.

<sup>5</sup> Een noodregime betekent hier een vooraf bekende verzameling regels voor stroomregulatie die wordt toegepast in specifieke noodsituaties. Ook wel bekend als “failure cases”.

<sup>6</sup> Verdelers zijn een generieke naam voor de elektrische busbars, schakelaars, convertors, rectificers etc. in één. Eén verdeler kan daarbij de aangeleverde stroom naar elke gewenste spanning transformeren. Efficiëntie van de verdeler is niet afhankelijk van het vermogen maar wel van het type stroom dat geleverd moet worden (DC, AC in 1 of 3 fasen). Typisch krijgt een verdeler AC3 aangeleverd van de generatoren. Merk op dat in de praktijk een verdeler typisch bestaat uit meerdere apparaten welke ook op verschillende fysieke plaatsen in een vliegtuig geplaatst kunnen worden. Aangezien in de praktijk deze apparaten toch vaak naast elkaar staan is de abstractie ‘verdeler’ in het model afdoende. Een gevolg hiervan is ook dat één verdeler in de praktijk meestal een groep verbruikers bedient die allemaal dezelfde spanning vragen. In het model wordt deze beperking niet opgelegd.



generator (of dit ook daadwerkelijk gebeurt is afhankelijk van het noodregime). Verdeler naar verdeler bekabelingen zijn in het model niet mogelijk. In de praktijk kunnen deze echter wel voorkomen. In het huidige model wordt dit probleem opgelost door twee of meer aparte kabels vanaf de verdeler naar twee of meer generatoren te leggen. Het uiteindelijke effect van deze backupconstructie komt het meest overeen met de werkelijkheid (zie ook kop *backups* verderop in deze paragraaf).

- **Verbruiker.** De verbruikers zijn de stroomverbruikers welke slechts aangesloten mogen worden op de verdelers. Verbruiker naar verbruiker verbindingen komen dus niet voor. Voor elke verbruiker is vooraf bepaald op welke verdeler deze wordt aangesloten. Dit is dus informatie die de gebruiker in het model moet opgeven. We merken op dat door deze modellering er voor elke verbruiker reeds bekend is hoeveel backup mogelijkheden deze heeft.

Overige definities in het model:<sup>7</sup>

#### *Backups*

- De aantallen generatoren en verdelers zijn vooraf bekend maar kunnen per vliegtuig verschillen. Er bestaat in vliegtuigen een scheiding links-rechts en eventueel ook boven-onder voor de generatoren (verdelers) en hun bekabelingen naar de verdelers (verbruikers), bv. generator 1 = links, generator 2 = rechts. Deze scheidingsgroepen zijn geïntroduceerd om een noodzakelijke voorwaarde te geven voor de backup relatie tussen twee objecten. Als generator  $g_1$  een *backup* voor generator  $g_2$  is dan moeten  $g_1$  en  $g_2$  in andere scheidingsgroepen vallen. Dit geldt ook voor backupverbindingen van de verbruikers naar de verdelers.
- Bij de redundante "backup"-verbindingen tussen een generator en meerdere verdelers moeten veiligheidseisen in acht worden genomen. Zo moet er een minimale afstand bestaan tussen elk van de verbindingen naar de verdelers. Deze eis kan natuurlijk niet worden opgelegd voor de bekabeling in de nabijheid van de generator zelf en zal daar dus iets soepeler moeten worden toegepast. Verder is bekend dat er meer rekening moet worden gehouden met 'failure' van de generatoren dan met 'failure' van de verdelers. Dit houdt in dat de minimale afstand in nabijheid van de verdeler minder belangrijk is dan de minimale afstand in de nabijheid van de generator. Als er bijvoorbeeld twee verdelers in een vliegtuig naast elkaar staan vormt dat geen probleem. Veiligheid wordt dan voldoende gewaarborgd door de kabels naar deze verdelers door verschillende kabelgoten te leggen.
- De totale 'power load' ofwel het totale vermogen benodigd door de verbruikers moet in normale situaties (alle generatoren functioneren) evenredig verdeeld worden over de

---

<sup>7</sup> Zie ook paragraaf 2.6 voor aspecten van een bekabelingsprobleem die in het huidige model niet zijn meegenomen maar die eventueel in een later stadium kunnen worden uitgewerkt mocht dat noodzakelijk blijken.



(gelijkwaardige) generatoren. Ondanks dat de generatoren op meerdere verdelers worden aangesloten is door middel van een schakeling dan altijd exact één van deze verbindingen actief. Er is dus sprake van 'load balancing' door een goede keuze te maken welke verbruikers aan welke verdelers worden gekoppeld. In het model is deze keuze een invoergegeven en moet dus door een gebruiker worden bepaald (zie ook kop *bekabeling*).

### *Bekabeling*

- Bekabeling voor de stroomvoorziening is onafhankelijk van overige (data)bekabeling. Als een apparaat (bv. de radar) op een plaats in het vliegtuig wordt geplaatst die fysiek is verwijderd van de gebruiker van dit apparaat (bv. de piloot) zal een extra datakabel getrokken moeten worden. Het gewicht van die kabel wordt in dit model buiten beschouwing gelaten.
- De stroomkabels die getrokken kunnen worden hebben verschillende eigenschappen zoals temperatuurbestendigheid of prijs. Deze eigenschappen vallen uiteen in twee soorten:
  - Statisch. Gegeven eigenschappen, aan deze eigenschappen valt niets te optimaliseren. Zo is voor elke verbruiker gegeven welk type kabel (bijvoorbeeld: A, B, C of D<sup>8</sup>) moet worden gebruikt. Hieruit volgt meteen van welk materiaal (koper of aluminium) de kabelkern moet zijn.
  - Dynamisch. Valt wel te optimaliseren en bestaat hier uit de diameter van de kabel. De kabel moet dik genoeg zijn voor het gewenste vermogen.
- 'Wrong side costs' zijn gedefinieerd als de kosten voor het "verkeerd leggen" van een kabel, gelet op de scheidingsgroepen links en rechts. Het deel van de kabel dat verkeerd is gelegd is dat deel dat in een andere scheidingsgroep valt dan de verdeler (naar verbruiker) of generator (naar verdeler) van waaruit de kabel werd getrokken. 'Wrong side costs' kunnen niet aan apparatuur worden toegekend maar slechts aan de bekabeling. Voor kabels die gefixeerd zijn (plaatsing staat vooraf vast) worden er geen 'wrong side costs' in rekening gebracht. Een andere manier om het "verkeerd leggen" van een kabel te vermijden is door aan te geven dat een kabel simpelweg niet geplaatst mag worden in een bepaalde zone. Door beide mogelijkheden op te nemen als onderdeel van het EPS systeem en het bijbehorende optimalisatieprobleem kan per situatie worden bekeken welke van de methoden het beste werkt.

---

<sup>8</sup> Deze typeindeling is vliegtuig(fabrikant) specifiek en kan dus per situatie verschillen. Deze kabeleigenschap is statisch en dus een gegeven in het EPS model. We stellen daarom dat het nemen van deze vier specifieke types niet af doet aan de generaliseerbaarheid van het probleem. Het aantal types is namelijk gemakkelijk uitbreidbaar.



## 2.4 Optimalisatiecriteria

Ten eerste moet de optimalisatie een doel hebben dat vertaald kan worden in een of meerdere optimalisatiecriteria. Deze worden vervolgens geminimaliseerd. Daarnaast zijn er een aantal niet-triviale constraints opgesteld voor elk bekabelingschema. Een opsomming van de criteria ziet er als volgt uit:

- i. De totale kosten van het gewicht van de bekabeling moeten zo klein mogelijk zijn / de totale gewichtskosten van de bekabeling heeft een bepaalde maximale waarde.
- ii. De totale kosten van het volume van de bekabeling moeten zo klein mogelijk zijn / de totale volumekosten van de bekabeling heeft een bepaalde maximale waarde.
- iii. De totale kosten van het gewicht van de te plaatsen objecten moet zo klein mogelijk zijn / de totale gewichtskosten van de objecten heeft een bepaalde maximale waarde.
- iv. De totale kosten van het volume van de te plaatsen objecten moet zo klein mogelijk zijn / de totale volumekosten van de objecten heeft een bepaalde maximale waarde.
- v. Het gewicht in elke zone moet zo klein mogelijk zijn / elke zone heeft een bepaald maximum gewicht.
- vi. Het volume in elke zone moet zo klein mogelijk zijn / elke zone heeft een bepaald maximum volume.
- vii. Het vermogensverlies in elke zone moet zo klein mogelijk zijn / elke zone heeft een bepaald maximum aan vermogensverlies.
- viii. Het totaal van 'wrong side costs' moet zo klein mogelijk zijn / de totale 'wrong side costs' heeft een bepaalde maximale waarde.
- ix. Het massamiddelpunt van de bekabeling plus apparaten moet zo dicht mogelijk bij een vooraf bepaald (nul)punt liggen / het massamiddelpunt van de bekabeling plus apparaten moet tussen een bepaalde minimum- en maximumwaarde liggen.
- x. Sommige kabels mogen niet in sommige zones lopen.<sup>9</sup>
- xi. De bekabeling tussen apparaten moet geschikt zijn voor de stroom die kan lopen tussen de apparaten.<sup>9</sup>
- xii. Per verdeler en verbruiker is bepaald in welke zone(s) deze apparaten geplaatst mogen worden.<sup>9</sup>
- xiii. Voor alle verzamelingen van kabelverbindingen die tezamen een backupconstructie vormen behoort er tussen de (backup)bekabeling onderling een minimum afstand bewaard te blijven. Omdat het voor elke verbruiker bekend is hoeveel aansluitingen die verbruiker tenminste moet hebben naar meerdere verdelers en omdat voor elke verdeler bekend is hoeveel aansluitingen die verdeler tenminste moet hebben naar meerdere generatoren is het mogelijk deze minimale afstand op te leggen voor elke backupconstructie.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Dit optimaliteitscriterium kan slechts gemodelleerd worden als constraint.



De kern en de complexiteit van het uiteindelijke optimalisatievraagstuk liggen nu opgesloten in deze criteria en de manier waarop deze in een latere fase worden geïmplementeerd. De modelkeuze en de instellingen van het model bepalen of een criterium als constraint of als doelcriterium moet gelden. Daarbij valt op te merken dat meerdere criteria tot gebruikelijke problemen kunnen leiden zoals tegenstrijdigheid tussen criteria onderling en/of ambigue weging van criteria.

## **2.5 Prestatieindicatoren**

Prestatieindicatoren (PI) proberen de kwaliteit van een oplossing en de achterliggende oplossingsmethode te kwantificeren. We merken hierbij op dat elke PI opgevat moet worden als een normering en dus slechts informatiewaarde heeft in vergelijking met andere waarden. Verder is er slechts voor een beperkt aantal PI een weging gemaakt tussen de PI onderling. Een exacte set wegingsfactoren voor alle PI is in dit stadium van het EPS project nog niet duidelijk. De PI zien er als volgt uit:

- Totale gewicht van de uiteindelijke bekabeling.
- Verdeling van het volume en het gewicht van de bekabeling plus apparatuur gemeten over de verschillende zones.
- Afstand van het gewenste massamiddelpunt tot het massamiddelpunt van de bekabeling plus apparatuur.
- Vermijdbare 'wrong side costs'.
- Complexiteit parametrisering oplosmethode.
- Garantie van de optimaliteit van de oplossing of een bandbreedte waarbinnen het optimum valt.
- (Reken)snelheid van de uitvoering van de optimalisatie.
- Aantal constraints die worden gebroken in de oplossing. Eventueel met een weging van de praktische implicaties daarvan.



## 2.6 Veronderstellingen

Zie ook de afbakening in paragraaf 2.3 waarin systeemintrinsieke eigenschappen zijn gedefinieerd (bv. een verbruiker  $\leftrightarrow$  verbruiker verbinding kan niet). Deze worden dus niet gezien als veronderstellingen van het optimalisatiemodel maar als deel van het EPS systeem.

### *Gewichtsverdeling*

- 'Centre of gravity' (*cg*) heeft alleen betrekking op de lengterichting  $x$  van het vliegtuig dus van neus ('fore') naar staart ('aft').
- $cg_i$  beschrijft het geometrisch middelpunt van een zone  $i$ . We stellen hier dat dit punt altijd identiek is aan het massamiddelpunt van deze zone, dus ongeacht welke objecten in de zone worden geplaatst en hoe dit gebeurt.
- De 'wrong side costs' beschrijven de kosten die een kabel met zich meebrengt als deze door meerdere 'sides' van het vliegtuig loopt. Een 'side' moet worden gezien als een scheidingsgroep, zo kan bijvoorbeeld het onderscheid 'links' en 'rechts' op de breedterichting ( $y$ -as) van de zones van het vliegtuig worden gemaakt. Impliciet wordt er vanuit gegaan dat voor elke zone een scheidingsgroep is gedefinieerd. Als aan elke zone in het vliegtuig dezelfde scheidingsgroep wordt toegekend is er geen sprake meer van 'wrong side' fenomeen.

### *Verdelerplaatsing*

- Een verdeler kan in een aantal verschillende zones geplaatst worden en heeft dus geen vaste gegeven plaats.
- Sommige verdelers kunnen als backup optreden voor sommige andere verdelers en/of sommige generatoren kunnen als backup optreden voor sommige andere generatoren<sup>10</sup>. Als er voor een verdeler en/of generator een backup functie bestaat dan bestaat deze ongeacht de zone waarin de apparatuur is geplaatst. Dit houdt impliciet in dat de verbindingen tussen deze objecten zo moeten worden opgesteld dat het model oplosbaar blijft. Als er wordt gekozen criterium *xiii*. (zie paragraaf 2.4) in het model te gebruiken kunnen deze parameters zo worden opgesteld dat het model onoplosbaar is.
- Voor elke verbruiker is het vooraf bekend aan welke verdeler(s) deze moet worden verbonden. Als dit meer dan één verdeler is dan zijn al deze verdelers elkaars backup en moet er tevens een minimale afstand tussen de bekabelingen naar de verdelers in acht worden genomen.

---

<sup>10</sup> Een gedetailleerde omschrijving van deze backupfuncties is te vinden in paragraaf 2.3. In dit model proberen we de modellering van backupfuncties zo vrij mogelijk te laten. Er kan worden aangegeven dat een verbruiker wordt gebackupt door deze aan te sluiten op twee verschillende verdelers, daarentegen kan de verbruiker ook op één verdeler worden aangesloten. Elke verdeler moet dan vervolgens op minstens twee generatoren worden aangesloten om een backupfunctie te verwezenlijken.



- Voor elke verdeler is het bekend aan welke generator(en) deze moet worden aangesloten. Als dit meer dan één generator is dan zijn al deze generatoren elkaars backup.
- Het aantal verdelers  $D$  is een vast gegeven.

#### *Power loss*

- Met 'power-loss' wordt in het model het verlies aan vermogen bedoeld als gevolg van stroomverbruik of stroomtransformatie. In het model wordt het vermogensverlies veroorzaakt door het vermogensverlies van de verbruikers, de verdelers en de kabels tussen de verbruikers en verdelers. Hierbij wordt om modeltechnische redenen het vermogensverlies van de bekabeling van verdelers naar generatoren slechts ten dele meegerekend<sup>11</sup>. Het vermogensverlies van de verdelers wordt veroorzaakt door stroomtransformaties en wordt dus bepaald door het benodigde vermogen van de verbruikers en het verloren vermogen op de kabels naar de verbruikers toe.
- Voor elke verdeler wordt het totale vermogen van een verdeler met een 'worst case' scenario bepaald waarin een verdeler alle verbruikers die op de verdeler zijn aangesloten van stroom moet voorzien, dus ook als één van deze verbruikers reeds op een andere verdeler was aangesloten. Een soortgelijke veronderstelling wordt gemaakt met betrekking tot de verbindingen van een verdeler naar meerdere generatoren. De generator en de bekabeling naar de verdelers moeten in staat zijn alle aangesloten verdelers van stroom te voorzien. Deze veronderstellingen zijn conform het bestaande EPS rekenmodel.

#### *Bekabeling*

- Alle zones zijn bereikbaar vanuit alle zones. Dit houdt in dat als de zones en hun burenelaties worden gezien als een ongerichte graaf deze graaf samenhangend is.
- Het model houdt er geen rekening mee of de kabels door kabelgoten, gebundeld of los worden getrokken. Dit zou van invloed kunnen zijn op de hitteopbouw in een zone, maar wordt niet meegenomen in het model.
- Als er vanaf één object meerdere kabels lopen naar meerdere objecten (bv. verdeler  $d_1$  is verbonden met generatoren  $g_1$  en  $g_2$ ) dan moeten deze kabels altijd een aantal identieke kabeleigenschappen hebben. Voor verbindingen tussen een zelfde verbruiker en meerdere verdelers moeten de spanningen, stroomklassen, kabel typen, materialen en stroomsterkten identiek zijn voor alle de kabels die worden gebruikt voor die verbinding(en). Voor de verbinding tussen verdelers en generators moeten de spanningen, stroomklassen, kabel typen en materialen identiek zijn voor alle kabels die worden gebruikt voor die verbinding(en). Uit deze veronderstelling volgt dat apparaten die verschillende voltages

---

<sup>11</sup> De modeltechnische reden om dit verlies niet op te nemen in model II en deels in model I is de resulterende complexiteit van het model. Er wordt verwezen naar het volledige verslag voor een gedetailleerde uitleg hiervan. Naar alle waarschijnlijkheid zouden zeer kleine probleeminstaties reeds niet meer op te lossen zijn.



aangeleverd moeten krijgen om correct te functioneren niet opgenomen kunnen worden in de modellering. Dit type apparaten kan geïmplementeerd worden als twee verschillende apparaten, dit garandeert echter niet dat zij altijd dezelfde plaatsing krijgen in het vliegtuig.

## 2.7 Mogelijke modeluitbreidingen / verbeteringen

Sommige veronderstellingen zoals genoemd in paragraaf 2.6 kunnen (te) beperkend blijken voor een goede oplossing van het model. Ook kunnen we concluderen dat de wensen ten aanzien van een modellering altijd kunnen veranderen. We noemen hier twee belangrijke veronderstellingen en beschrijven een globale strategie voor de aanpassingen die aan het model nodig zouden zijn wil één van deze veronderstellingen kunnen vervallen.

1. Er is aangenomen dat het vooraf bekend is welke verbindingen tussen verbruikers en verdelers gemaakt moeten worden en welke verbindingen tussen verdelers en generatoren verplicht zijn. Dit kan een ingrijpende veronderstelling zijn voor het (optimum van het) totale model. Ook kan de gebruiker eisen dat deze keuzes worden gemaakt door de optimalisatieroutine zelf. Mocht het gewenst zijn deze veronderstelling te laten vervallen dan moeten de volgende extra informatie aan het model ter beschikking worden gesteld:

- Het aantal backup voorzieningen dat een verbruiker  $c$  nodig heeft (verdeler(s)  $d$ ) en/of het aantal backup voorzieningen dat een verdeler  $d$  nodig heeft (generator(en)  $g$ ).
- Een set met regels van waaruit is af te leiden of twee objecten elkaars backup voorziening kunnen zijn. Bijvoorbeeld: omdat generator  $g_1$  aan de linkerkant en generator  $g_2$  aan de rechterkant van het vliegtuig is geplaatst kunnen deze generatoren optreden als elkaars backup.

2. In het model kunnen de verbindingen tussen verbruikers en verdelers en de verbindingen tussen verdelers en generators gemodelleerd worden met een set extra beslissingsvariabelen. Deze moeten vervolgens worden gesubstitueerd op alle plaatsen in het model waar werd uitgegaan van vooraf gegeven informatie over de verbindingen tussen deze objecten. Ook moeten er extra constraints worden toegevoegd om te bepalen of elke verbruiker (verdeler) het juiste aantal benodigde backup voorzieningen krijgt toebedeeld. Het aantal verdelers dat geplaatst moet worden staat vast. Het veranderen van dit gegeven naar een variabel aantal verdelers verhoogt naar alle waarschijnlijk de complexiteit van het model sterk. Na een aantal aanpassingen moet het echter wel mogelijk zijn om dit aantal te variëren. Daartoe moet er wel aan de volgende punten worden voldaan:

- Het is niet meer vooraf bekend welke verbindingen tussen verbruiker, verdeler en generator gemaakt moeten worden. Alle bovengenoemde punten voor het laten



vervallen van de veronderstelling dat deze verbindingen wel bekend waren moeten dus worden opgenomen.

- Het maximale aantal verdelers dat geplaatst kan worden ( $D$ ) moet bekend zijn. Voor elk van deze  $D$  verdelers moeten de gebruikelijke eigenschappen bekend zijn.

Er kunnen dan vervolgens  $D$  binaire beslissingsvariabelen opgesteld worden met de interpretatie verdeler  $d$  bestaat in het model 'ja' of 'nee'. Elke uitsplitsing naar indices  $d$  in het model kan nu vermenigvuldigd worden met deze beslissingsvariabelen. Eventuele resulterende binaire multiplicaties kunnen volgens [11] en [22] worden omgeschreven naar lineaire vergelijkingen.

We merken op dat zowel het rekenmodel als het optimalisatiemodel slechts abstracties van de werkelijkheid zijn. Daarmee worden per definitie enkele praktische zaken, technische details en/of uitzonderingsgevallen uitgesloten van modellering. Om een indruk te geven van dit soort punten is een (onvolledige) lijst met mogelijke modeluitbreidingen opgesteld:

- Er bestaan een aantal eigenschappen van verbruikers die invloed hebben op de kabelkeuze naar de verbruiker toe maar die niet worden opgenomen in het model omdat zij te specifiek of gedetailleerd zijn. We kunnen daarbij denken aan de volgende punten:
- Een verbruiker gebruikt de stroomvoorziening continu of periodiek. Bij continu gebruik zal het aantal gebruiksuren vanzelfsprekend groter zijn dan bij periodiek gebruik; dit houdt in dat de 'duty cycle'<sup>12</sup> van continue verbruikers groter is. De levensduur zal bij continu gebruik kleiner zijn, deze hangt namelijk af van de opwarming van de kabel welke groter is bij een grotere 'duty cycle'. Voor continue verbruikers moeten dus soms dikkere kabels worden gelegd dan voor periodieke verbruikers willen alle kabels uit het vliegtuig een gelijke levensduur hebben. In het huidige model wordt van alleen continue gebruikers uit gegaan. Er is dus voor een "worst case" scenario gekozen.
- Het is bekend dat stroom zogenaamde 'inschakeleffecten' vertoont bij het onder spanning zetten van stroomverbruikende apparaten, zoals de verbruikers. Er is dan sprake van een korte  $I_{\text{inrush}}$  die groter is dan  $I_{\text{steady-state}}$ , hierdoor zal de kabel bij inschakelen een groter vermogen te verduren krijgen. Om de duur en grootte van  $I_{\text{inrush}}$  te berekenen en vervolgens een daarop aangepaste dikte van de kabel te berekenen is veel extra informatie nodig over de verbruikers.
- Er kunnen gemakkelijk extra typen en extra dikten kabels in het model worden opgenomen. Wellicht kunnen daarbij ook de beschikbare spanningscategorieën worden uitgebreid om zo ook de (nieuwere) 270V kabels en verbruikers mee te nemen.

---

<sup>12</sup> De 'duty cycle' kan beschreven worden met de fractie van de totale gebruikstijd dat een apparaat of kabel gebruikt wordt.



- Het is vooraf bekend dat sommige zones zogenaamde 'high-temperature' zones zijn. Door deze zones moet dus ook speciale 'high-temperature' kabels worden getrokken. Het is daarnaast mogelijk om het kabeltype van een kabel tijdens de loop van de kabel te veranderen naar een ander type. Zo kan dus als een high-temperature zone gepasseerd moet worden in die zone worden gewisseld naar de betreffende kabel om vervolgens weer over te schakelen naar normale (goedkopere/lichtere) bekabeling. Beide punten worden momenteel niet in de modellering opgenomen omdat het aantal 'high-temperature' zones en het aantal effectieve kabeltypewisselingen zeer beperkt is.
- In het huidige rekenmodel wordt reeds door middel van efficiëntie verlies de warmteopbouw per zone berekend. Om de warmteopbouw van een kabel iets beter te berekenen moet er bekend zijn of een bepaalde kabel los wordt getrokken of samen met andere kabels in een kabelgoot. In een kabelgoot is er namelijk altijd sprake van extra warmteopbouw. Als de kabels door een goot worden getrokken is met name het aantal kabels in die goot bepalend voor de warmteopbouw.
- De modellering van de backupvoorzieningen is zoals reeds genoemd niet geheel realistisch maar wel eenduidig. Vollediger zou zijn ook andere backupconstructies mee te kunnen nemen in het model. Het is namelijk realistisch(er) om te stellen dat alle constructies om verbruikers van backup stroom te voorzien kunnen worden ingezet mits deze aan bepaalde eisen voldoen. Deze eisen zijn van specialistische aard, we beperken ons hier tot een veelgebruikt alternatief voor de in dit model gekozen oplossing. Dit is het doorlussen van de verdelers onderling. Elke generator wordt dan op (tenminste) één verdeler aangesloten maar vervolgens worden de verdelers onderling op elkaar aangesloten. Hiervoor zijn dus wel verdelers naar verdeler verbindingen nodig. Als nu een generator uitvalt kan een verdeler van een andere generator-verdeler verbinding waarvan de generator nog wel functioneert de verdeler van de uitgevallen generator voeden.



### 3 Modellen

In dit hoofdstuk geven we een omschrijving van een tweetal modellen (model I en II) die zijn gebruikt om een structuur te definiëren waarbinnen het optimalisatievraagstuk dat aan het EPS systeem ten grondslag ligt op is te lossen. Merk op dat de modellering van het optimalisatievraagstuk voortbouwt op de modellering van het rekenmodel waarvan de hoofdkenmerken in hoofdstuk 2 zijn beschreven. Er zal in dit hoofdstuk dan ook van de definities zoals opgesteld in dit hoofdstuk gebruik worden gemaakt. Zoals reeds in hoofdstuk 1 is genoemd wordt er in dit hoofdstuk niet ingegaan op de wiskundige notatie en formulering die is gebruikt.

Het maken van modelleringen en oplossingsmethodes is nauw aan elkaar verwant. Een modellering is het (wiskundig) beschrijven van een probleem op een vooraf gekozen abstractieniveau. Een oplossingsmethode is een heuristiek of algoritme dat oplossing(en) kan genereren voor een gegeven model. De afhankelijkheid tussen beiden bestaat omdat de praktische oplossingsmethoden alleen voor bepaalde modeltypen efficiënt werken. Een typisch voorbeeld hiervan is de oplosroutine Cplex (zie ook [9]) welke slechts een beperkt aantal typen programmeringsproblemen kan oplossen (voornamelijk de veelvoorkomende lineaire en kwadratische programmeringsproblemen).

De kwaliteit van een modellering hangt af van verscheidene factoren. Dit bemoeilijkt het a-priori vaststellen van één juist model en daarom zullen we hier een tweetal modellen opstellen, beide met andere eigenschappen. De modellering is opgebouwd uit een aantal beslissingen, een aantal constraints en een doelfunctie. De keuze van de beslissingen (ofwel: beslissingsvariabelen) is hierbij verreweg het belangrijkste. Beslissingen leggen de beschrijving van de uiteindelijke oplossing vast en bepalen daardoor de formulering van verdere constraints en doelen. Eerst zal de vorm van de beslissingen worden beschreven in paragraaf 3.1. Tevens zal daarbij een kleine verantwoording voor die keuze en een vooruitblik op het resulterende model en haar complexiteit worden gegeven. Vervolgens geven we de globale werking van het opnemen van constraints en doelen in één van de twee modellen in paragraaf 3.2. De lijst met optimalisatiecriteria (zie paragraaf 2.4) is wiskundig geformuleerd voor elk model en uiteindelijk geïmplementeerd in een programma. Deze wiskundige formulering is gegeven in [16], een samenvatting van de resultaten van het testen van de implementatie is gegeven in hoofdstuk 4.

#### 3.1 Beslissingen

In de keuze welke beslissingen in elk model moeten worden gemaakt moet er geprobeerd worden een afweging te maken tussen de complexiteit en het beschrijvend vermogen van een



model. Over de complexiteit als gevolg van de structuur van het model kunnen a-priori weinig uitspraken worden gedaan. Wel kunnen we het aantal beslissingen gemakkelijk analyseren. We zullen zien dat model I relatief weinig, en model II relatief veel beslissingen krijgt. De praktijk moet uitwijzen of deze complexere methode ook computationeel haalbaar is.

Na een keuze van de te maken beslissingen valt redelijk snel in te zien of het resulterende model lineair of niet-lineair is. Merk op dat de volgende modellen doelbewust lineair zijn. Het is namelijk bekend dat kwaliteit en performance van lineaire oplossingsmethoden superieur zijn aan hun niet-lineaire equivalenten. Aangezien voor het EPS systeem geen extra veronderstellingen nodig zijn (alleen extra beslissingen) om het lineair te maken is er hier voor gekozen om de modellering van eventuele niet-lineaire varianten niet op te nemen.

### 3.1.1 Model I

In dit model proberen we het aantal te maken beslissingen zo klein mogelijk te houden. Dit wordt bereikt door voorafgaand aan de lineaire oplosroutine een 'pre-processing' stap te doen. We proberen hiermee de complexiteit van het model te verlagen. Dat dit daadwerkelijk het geval is valt in te zien door het scheiden van het EPS systeem in twee deelproblemen:

- De routing van de bekabeling tussen generatoren, verdelers en verbruikers
- Het plaatsen van generatoren, verdelers en verbruikers. We zullen deze drie apparaten gezamenlijk ook wel de (te plaatsen) "objecten" noemen.

Ondanks de onderlinge afhankelijkheid van deze problemen proberen we hen toch te splitsen (de afhankelijk ontstaat doordat bv. het volume in een zone wordt bepaald door èn de kabels èn de objecten in die zone). Dit doen we door vooraf *een vast aantal* paden tussen de objecten te berekenen. We proberen deze paden zo goed mogelijk te kiezen. Vervolgens kunnen de objecten worden geplaatst en een routing worden gekozen die, gegeven de plaatsing, het beste is.

Een routing is echter afhankelijk van de objecten die met elkaar worden verbonden en van de afstand tussen de objecten die worden verbonden (bv. een langere afstand vereist een dikkere kabel). We stellen dus vooraf voor *elke* mogelijke (verbruiker,verdelers) en (verdelers,generator) combinaties de *S* beste routing op. Een goede maat voor de juistheid van een routing is nu simpelweg de lengte van deze routing, het is namelijk bekend dat gegeven de apparatuur die verbonden wordt het gewicht en volume strikt monotoon toenemen als de lengte toeneemt. Het probleem van het vinden van de *S* routing wordt in de literatuur ook wel het *k* Shortest Path probleem genoemd, zie ook bv. [1] en [6].



Het vinden van de S beste routeringen blijkt niet triviaal en zal dus leiden tot een redelijk tijdrovende pre-processing. Echter als de zone layout ongewijzigd blijft dan is het resultaat van de pre-processing te herbruiken. Verder is gemakkelijk in te zien dat de juistheid van oplossingen van het gehele model af zal hangen van de keuze van S. Wat de waarde van S moet zijn om relevante (sub)optimale oplossingen te bewerkstelligen zal empirisch moeten worden onderzocht. Merk op dat een te klein genomen S kan leiden tot onoplosbaarheid van het model daar waar het echte probleem wel oplosbaar was.

We zien dat deze modellering leidt tot beslissingen waarin voor elke verbinding van een gebruiker naar een verdeler en voor elke verbinding van een verdeler naar een generator moet worden gekozen welke routing (van de S mogelijke routeringen) daarvoor wordt gebruikt. Daarnaast moeten er tegelijkertijd beslissingen worden gemaakt waar alle objecten komen te staan in het vliegtuigmodel. Dit leidt dus tot meer-dimensionale beslissingsvariabelen.

Omdat er in het model voor routes en plaatsingen wordt gekozen is er in dit model niet direct informatie (in termen van de beslissingen) beschikbaar over de zones die een routing doorloopt. Daarom moeten ook alle constraints die betrekking hebben op routeringen reeds in de pre-processing worden meegenomen (zoals bv. criterium  $x_i$ , zie paragraaf 2.4). Ook moeten er voor andere optimalisatiecriteria (doelen en/of constraints) een aantal gegevens van de routing *per zone* reeds in de pre-processing worden opgeslagen. Het resultaat van de pre-processing zijn de volgende variabelen:

- Volume van de routing in een zone.
- Gewicht van de routing in een zone.
- Vermogensverlies in een zone voor een verbinding naar een verdeler vanaf een gebruiker. Dit verlies is afhankelijk van de kabelrouting tussen deze gebruiker en verdeler en van de elektrische eigenschappen van de gebruiker. Voor het vermogensverlies in een zone van de verbinding van een verdeler naar een generator geldt een zelfde afhankelijk echter het verloren vermogen is ook afhankelijk van de gebruikers die op deze verdeler zullen worden aangesloten en de kabelrouteringen die voor die verbindingen gebruikt zullen worden. Deze kabels hebben immers ook een vermogensverlies wat door de verdeler geleverd zal moeten worden. We stellen dat de pre-processing slechts de *minimale* vermogensverliezen in een zone voor de verbindingen van verdeler naar generator als resultaat kan hebben. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat alle gebruikers via de kortste routing van op de verdelers worden aangesloten (gegeven alle mogelijke plaatsingscombinaties van deze gebruikers en verdelers). Dit minimale stroomverlies is onafhankelijk van de, door de optimalisatie bepaalde, werkelijke routing tussen de gebruikers en de verdelers maar geeft een betrouwbare ondergrens aan.



- De 'wrong side' kosten welke aangeven hoeveel lengte kabel in een zone aan de 'wrong side' ligt en hoeveel dit kost.
- De minimale afstand tussen combinaties van twee verschillende kabelrouteringen  $s$ . Hierbij wordt de afstand niet beïnvloed door de beginzone van beide routeringen. De beginzone van een kabel is een zone waar een verbruiker (naar verdeler) of verdeler (naar generator) is geplaatst.

Door het genereren van routeringen in de pre-processing is impliciet reeds aan de volgende constraints voldaan:

- Alle kabels lopen alleen door geldige zones (x.).
- Alle kabels zijn geschikt voor het maken van de betreffende aansluitingen (xi.).

### 3.1.2 Model II

De routing van de kabels hoeft echter niet expliciet vooraf bekend te zijn zoals in model I. Een route of pad kan ook in meer detail worden beschreven door het te modelleren als een verzameling segmenten die op elkaar aan moeten sluiten. Voordeel hiervan is dat er geen pre-processing nodig is maar in het model zelf wordt gekozen wat voor soort kabel er nodig is en welke routing zal worden gevolgd voor een bepaalde verbinding. Inherent hieraan is dat de afhankelijkheid van de in 3.1.1 genoemde subproblemen in stand wordt gehouden.

Het aantal beslissingen stijgt nu echter aanzienlijk. We stellen dat een segment van een pad moet lopen tussen twee aan elkaar gelegen zones (of 'binnenin' een zelfde zone). Als nu bijvoorbeeld een pad tussen twee objecten door vijf verschillende zones loopt, dan moeten er vier binaire beslissingsvariabelen worden gebruikt om dit pad te modelleren.

Merk op dat er naast de extra informatie over de routeringen ook informatie is kwijtgeraakt ten opzicht van model I. Er wordt door middel van de segmenten namelijk niet meer expliciet aangegeven waar een object zich bevindt (met andere woorden waar een routing begint en eindigt). Daartoe worden deze beslissingen over de plaatsingen van de objecten ook voor dit model ingevoerd. We concluderen dat ook in dit model alle beslissingen nauw aan elkaar verwant zijn.

Een laatste probleem betreft een aantal niet-lineaire eigenschappen van bekabelingen. De lengte en gewicht(/volume) van een bekabeling verhouden zich in dit model stuksgewijs lineair tot elkaar. Dat wil zeggen dat een bepaald soort kabel (met een gegeven type, dikte, soortelijk gewicht etc.) een maximale lengte heeft tot waar deze ingezet kan worden; wordt deze lengte overschreden dan zal een dikkere kabel genomen moeten worden die geschikt is voor een hoger



vermogen. Dit hogere vermogen is nodig om te compenseren voor het grotere verlies op de kabel (daar waar het benodigde vermogen van een verbruiker of verdeler gelijk blijft). Het overschakelen naar een dikkere kabel veroorzaakt een discontinue sprong in gewicht en volume per lengte eenheid. De niet-lineariteit is niet wenselijk door eerder genoemde redenen. We introduceren daarom een aantal beslissingen die aangeven welke kabel moeten worden gebruikt voor elke kabelverbinding. Het gebruik van deze beslissingen in de verdere modellering elimineert de stuksgewijsheid zodat slechts lineaire functies overblijven.

### 3.2 Doelfunctie en constraints

Nu de te maken beslissingen per model beschreven zijn kunnen we ook het doel van de optimalisatie en de voorwaarden aan de oplossingen beschrijven. In paragraaf 2.4 is een complete lijst opgenomen van alle optimalisatiecriteria in het EPS systeem. Deze zijn geschreven in een constraint vorm en, waar mogelijk, een optimalisatie vorm. Dit heeft als doel niet van tevoren vast te leggen hoe een criterium uiteindelijk zal worden opgenomen in het model, dit kan namelijk per situatie verschillen. Om dit generiek te implementeren wordt bij elk criterium een indicator opgenomen die één van de volgende waarden heeft:

- Uit; negeer criterium
- Aan; neem criterium op in doelfunctie
- Aan; neem criterium op als constraint

De volledige wiskundige modellering van elke criterium in beide vormen, samen met een korte uitleg en motivatie voor de formulering is te vinden in [16]. We zien dat de volgende eigenschappen typisch zijn voor beide vormen van het opnemen van de criteria in de beide modellen:

- *Doelfunctie*. Het is zeer waarschijnlijk dat de doelfunctie uit de som van meerdere criteria komt te bestaan. De waarden van deze criteria hebben over het algemeen echter geen onderling vergelijkbare schaal. Elk criterium dat in de doelfunctie wordt geïmplementeerd wordt daarom geschaald en/of gewogen met schalingsfactoren. Het gebruik van deze factoren is tweeledig. Ten eerste kunnen de waarden van de verschillende criteria aan elkaar worden geschaald en ten tweede kan de importantie van doelen onderling ermee worden aangegeven.
- *Constraint*. Het criterium zal moeten worden begrensd door boven- en/of ondergrenzen. Daarbij kan de gebruiker een constante extreme waarde (minimum en/of maximum) aangeven.





#### 4 Verificatie en validatie

Dit hoofdstuk beschrijft de testprocedures welke worden uitgevoerd voor de implementatie van het EPS optimalisatiemodel. De theorie voor het testen van software beschrijft een aantal categorieën waarin een test proces kan worden opgedeeld [17]. Er kan sprake zijn van structurele en functionele testen, verificatie & validatie en module- en integratietesten. We kiezen er hier voor om de gebruikelijk validatie en verificatie van het programma toe te passen.

Verificatie en validatie behoren te gebeuren per fase van software ontwikkeling. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de volgende fasen:

- Requirements analysis
- Design
- Implementation
- Maintenance (buiten de scope van de stage)

De ‘requirements analysis’ en het ‘design’ zijn volledig beschreven in [16]. Door review van dit document is de correctheid van de specificaties en de correctheid het aansluiten van de specificaties op de modellering reeds meegenomen. Alleen de fase ‘implementation’ dient dus nog geverifieerd en gevalideerd te worden.

Verificatie van de implementatie heeft als doel het opsporen van programma crashes of bugs als gevolg van exceptions en/of anomalieën (“debugging”) en het analyseren van de robuustheid en correctheid van de uitvoer van het programma (“proving”). Daartoe kan het programma gecontroleerd worden door bijvoorbeeld de resultaten van twee verschillende methodieken voor het verkrijgen van een oplossing voor een probleem met elkaar te vergelijken. Ook kunnen bijvoorbeeld alle resultaten die een programma als uitvoer geeft handmatig na worden gerekend.

Validatie is “het proces dat plaats vindt aan het einde van de software levenscyclus waarin wordt getest of de software voldoet aan de vooraf opgestelde specificaties”<sup>13</sup>. Er wordt dus niet gekeken naar de interne werking van het programma maar naar de mogelijkheden die het programma biedt. De validatie zal dus, in tegenstelling tot de verificatie, alleen naar de interpretatie van de uitvoer kijken daar waar de verificatie zich bezig houdt met de exacte waarden van de uitvoer.

---

<sup>13</sup> Een vrije vertaling van “the process at the end of the software life cycle in which it is tested whether the software conforms to requirements specification” uit [8].



Het is logisch om implementaties eerst te verifiëren en daarna te valideren. De verificatie zal besproken worden in paragraaf 4.1, de daarop volgende validatie in paragraaf 4.2.

#### **4.1 Verificatie**

Een goede verificatie vereist veel kleine, sterk variërende testsets om een ruime hoeveelheid van de mogelijke invoer te kunnen testen. De invoerdata moet sterk versimplificeerd zijn, dit houdt in dat geen enkele waarde enige interpretatie heeft in relatie tot een echte bekabeling maar er komen wel alle basiselementen in voor die ook in echte invoerdata gebruikt kunnen worden. Omdat de invoerdata een lage complexiteit heeft valt deze data goed te variëren terwijl het tegelijkertijd mogelijk blijft alle waarden “met de hand” na te rekenen. Hierbij kan ook het bestaande rekenmodel van pas komen omdat sommige berekeningen identiek zijn.

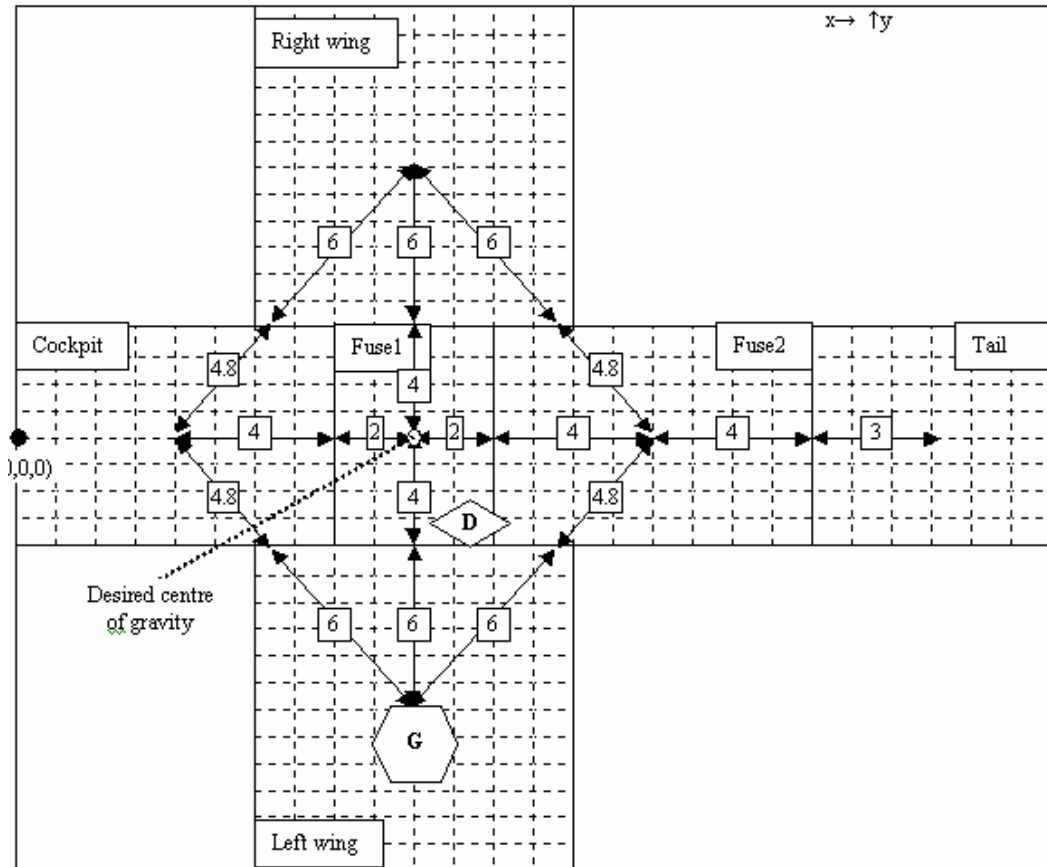
Eerst zullen we de strategie van het testen globaal bespreken in paragraaf 4.1.1 waarna het duidelijk moet worden wat voor variaties in de invoerdata zullen worden getest. Vervolgens zullen we het resultaat van de basistest en een vergelijking met het bestaande rekenmodel globaal beschrijven in paragraaf 4.1.2. Voor een beschrijving van de resultaten van de overige testen (25 in totaal) wordt verwezen naar [16]. Op basis van alle verificatietesten die zijn uitgevoerd is het mogelijk een kleine analyse te geven van de performance van het programma in paragraaf 4.1.3.

##### **4.1.1 Teststrategie**

We zullen in de verificatie steeds uitgaan van dezelfde invoerdata en deze al naar gelang het te verifiëren onderdeel aanpassen. De onderdelen die zullen worden geverifieerd zijn de dertien optimalisatiecriteria zoals beschreven in 2.4 en een aantal andere invoerwaarden die naast deze criteria veranderd kunnen worden. De invoerdata bestaat in eerste instantie uit een model van een vliegtuig met zes zones waarin zich één verbruiker, één verdeler en één generator bevinden.



Schematisch kunnen we dit vliegtuig model als volgt weergeven:



Figuur 2: testvliegtuig voor verificatie

De verdeler en generator hebben een vaste plaatsing in dit vliegtuig (respectievelijk zone Fuse1 en zone Left wing), de verbruiker mag overal in het vliegtuig geplaatst worden.

We beschrijven hier alle testen die gaan worden uitgevoerd, samen met hun doel en de veranderingen aan de basis-invoerdata die daarvoor noodzakelijk zijn. Merk op dat er in elke verificatietest uitgegaan wordt van de basis-invoerdata en dat daarop enkele veranderingen worden aangebracht. De verificatie wordt telkens uitgevoerd met de modellen I en II uit hoofdstuk 3. Er wordt verwezen naar [16] voor de volledige uitvoer van het programma voor alle testen.



Per model worden de volgende zaken getest:

- **Basistest.** De basis-invoerdata zal worden geoptimaliseerd. De waarden van de oplossing zullen stuk voor stuk worden naberekend. Een vergelijking tussen de uitkomsten van model I en model II kunnen daarnaast een goede indicatie geven van de juistheid van de uitvoer. Waar mogelijk kunnen de waarden van de oplossing ook worden vergeleken met de uitkomsten van het rekenmodel.
- **Criterium i.** Dit criterium stelt dat de totale kosten van het gewicht van de bekabeling in het vliegtuig geminimaliseerd moeten worden. Omdat dit criterium slechts de bekabeling betreft stellen we allereerst dat de gebruiker een vaste plaatsing heeft in de zone Left wing. Vervolgens maken we de kosten van het geplaatste gewicht in zone Fuse1 zeer hoog in vergelijking met de andere zones.
- **Criterium ii.** Dit criterium is nauw verwant aan criterium i. en zal op een zelfde manier geverifieerd worden. Gebruiker wordt gefixeerd in zone Left wing en de kosten van het plaatsen van volume in zone Fuse1 zijn zeer hoog. Door deze verandering aan de basis-invoerdata moet, gegeven de optimalisatiecriteria, ook de routing worden aangepast.
- **Criterium iii.** Door dit criterium worden de totale kosten van het gewicht van de gebruikers, verdelers en generators geminimaliseerd. We stellen wederom dat kosten van het plaatsen van gewicht in zone Fuse1 zeer hoog zijn in vergelijking met de overige zones. De gebruiker mag nu, conform de basis-invoerdata, in elke zone in het vliegtuig worden geplaatst. Echter het is niet optimaal om de gebruiker in Fuse1 te plaatsen omdat dit hoge kosten met zich mee brengt. De gebruiker moet dus in een andere zone geplaatst worden.
- **Criterium iv.** Dit criterium wordt analoog aan criterium iii. geverifieerd. We stellen dat de kosten van het plaatsen van volume in zone Fuse1 zeer hoog zijn. De gebruiker mag, gegeven de optimalisatiecriteria, dus niet in die zone worden geplaatst.
- **Criterium v.** Dit criterium bepaalt dat elke zone een maximaal gewicht heeft dat daar in geplaatst kan worden. In de basisoplossing wordt de gebruiker in zone Fuse1 geplaatst. Daarom stellen we het maximaal plaatsbaar gewicht van zone Fuse1 in op net iets minder dan het totale gewicht geplaatst in zone Fuse1 gegeven de optimale oplossing van de basis-invoerdata. Dit betekent dat de verdeler en bijbehorende bekabelingen nog wel passen in zone Fuse1 maar dat er geen plaats meer is voor de gebruiker. Deze moet dus in een andere zone geplaatst worden.
- **Criterium vi.** Zoals in criterium v. wordt het beschikbare volume van zone Fuse1 ingesteld op iets minder dan het totale gealloceerde volume in die zone gegeven de optimale oplossing van het basismodel. Dit betekent dat de verdeler en bijbehorende bekabelingen nog wel zouden passen in zone Fuse1 maar een gebruiker daarbij niet meer. Deze moet dus wederom in een andere zone worden geplaatst.



- **Criterion vii.** Analooq aan criteria v. en vi.. Het maximaal verloren vermogen in zone Fuse1 wordt gesteld op iets minder het totale verloren vermogen in zone Fuse1 gegeven de optimale oplossing van het basismodel. De verliezen van de verdeler en bijbehorende bekabelingen mogen wel voorkomen in zone Fuse1 maar een extra verbruiker wordt te veel. Deze moet dus in een andere zone worden geplaatst.
- **Criterion viii.** De 'wrong side costs' mogen niet groter worden dan een bepaald maximum. Om dit criterium te testen veranderen we een aantal afstanden tussen de zones uit Figuur 2 zo dat nog slechts één route mogelijk is naar de generator in zone Left wing. Het nemen van andere routes naar de zone Left wing zal namelijk leiden tot te hoge 'wrong side costs'. Vervolgens controleren we dat deze route ook daadwerkelijk gekozen wordt voor de verbinding van de verdeler naar de generator.
- **Criterion ix.** In de basisoplossing ligt het x-coördinaat van het 'centre of gravity' precies op het gewenste x-coördinaat. Omdat de plaatsing van de verbruiker variabel is kunnen we opleggen dat het gewenste 'centre of gravity' ergens anders moet liggen op de x-as en vervolgens verifiëren of de plaatsing van de verbruiker inderdaad wordt aangepast. Omdat het criterium voor het 'centre of gravity' (criterium ix.) staat ingesteld als constraint moeten er ook een bijbehorende minimum- en maximumafwijking van het gewenste 'centre of gravity' worden vastgelegd. We stellen het gewenste 'centre of gravity' bij richting zone Tail van het vliegtuig en de minimale afwijking daarvan op nul. Dit garandeert het verplaatsen van het 'centre of gravity'. Daarbij wordt het gewenste 'centre of gravity' zo gekozen dat de verbruiker in zone Tail moet worden geplaatst.
- **Criterion x.** Per verbinding kan worden opgegeven in welke zones deze wel en niet mogen lopen. We creëren eerst een aantal langere routeringen in het vliegtuig om dit criterium goed te kunnen verifiëren. Het oplossen van dit probleem geeft een uitgangssituatie op basis waarvan we criterium x. verder kunnen verifiëren. We stellen nu in het tweede testvoorbeeld van dit criterium dat de kabel van verbruiker naar verdeler niet meer door een zone mag lopen waar in de basisoplossing van dit criterium wel een kabel doorheen werd gerouteerd. Deze route zal dus moeten veranderen. In het derde testvoorbeeld voegen we voor de verbinding van de verdeler naar de generator een soortgelijke beperking toe.
- **Criterion xi.** Voor dit criterium is het noodzakelijk dat voor elke verbinding de juiste kabel wordt gekozen. Typisch worden dikkere kabels gekozen voor verbindingen over grotere afstanden, er ontstaat dan namelijk een groter verlies op de kabel. Om dit te bewerkstelligen vergroten we een aantal afstanden uit Figuur 2. Dit doen we op zo een manier dat in de eerste test die dit criterium moet verifiëren de kabel tussen de verdeler en generator een stuk dikker moet worden. In een tweede test zorgen we ervoor dat dit ook het geval moet zijn voor de kabel tussen de verbruiker en verdeler.
- **Criterion xii.** Om te bepalen of het plaatsen van de objecten in de juiste zones goed verloopt geven we een aantal mogelijke plaatsingen op en verifiëren dat de objecten in



legale zones worden geplaatst. De generator heeft een gefixeerde plaats, we kiezen in deze verificatie voor zone Tail. De verdeler mag nu in de Cockpit, Fuse1 of in één van de vleugels staan, de verbruiker in zone Tail of zone Fuse2. We verifiëren of een juiste, optimale, oplossing wordt gekozen.

- **criterium xiii.** In dit criterium worden er minimale afstanden afgedwongen tussen verbindingen die een backup functie vervullen. In de modellering kan dit op twee manieren, het aansluiten van één verbruiker op meerdere verdelers of het aansluiten van één verdeler op meerdere generatoren. Voor beide gevallen moet dus een extra object (verdeler of generator) geïntroduceerd worden. Er worden viertal testen opgesteld, eerst wordt na de introductie van een extra object een basisverificatie opgelost. In de basisverificaties zorgen we ervoor dat de twee verbindingen van respectievelijk de verbruiker naar de verdelers en de verdeler naar de generatoren gerouteerd worden door dezelfde zone. Dit impliceert dus dat de minimale afstanden tussen de twee kabels die in beide gevallen de backupverbinding verzorgen 0.0 is. Vervolgens wordt er eerst voor de bekabeling die de backupverbinding van de verbruiker naar de verdelers verzorgt een minimum afstand opgelegd. Daarna wordt ook een minimum afstand opgesteld tussen de verbindingen van de verdeler naar de generatoren. Beide gevallen moeten dus leiden tot het verleggen van de backupbekabeling.
- **Kabeltype.** Voor alle kabels werden tot nu kabels van hetzelfde type gebruikt. Er wordt in deze verificatietest voor alle kabels een ander type gebruikt. Aangezien een ander type andere eigenschappen voor dikte, gewicht, volume, etc. heeft zullen een aantal waarden uit de oplossing ook moeten veranderen. Het materiaal waarvan dit nieuwe type kabel gemaakt is blijft wel hetzelfde als in de basisverificatie.
- **Materiaal.** Alle kabels in het model zijn vervangen door kabels van een ander type. Dit nieuwe type heeft drie aluminium fasedraden in de kern, wat bedoeld is voor het transport van groot vermogen. Voor deze basisverificatie werden alleen kabels met een koperen kern gebruikt. Tevens is in de oplossing te zien dat deze kabel een stuk zwaarder is dan de bekabeling uit de basis-invoerdata.
- **Fixatie.** Als een kabel gefixeerd is hoeven daarvoor geen 'wrong side costs' in rekening te worden gebracht. We fixeren de kabel tussen de verdeler en generator, welke in het originele model 'wrong side costs' veroorzaakte. Deze kosten behoren dus niet meer voor te komen in de uiteindelijke oplossing.
- **Stroomklasse.** In de verificatietesten tot nu toe is telkens dezelfde klasse stroom gebruikt ("DC"). Daarom kiezen we nu de stroomklasse "AC1" voor de verbruiker-verdeler verbinding en "AC3" voor de verdeler-generator verbinding. Dit behoort te leiden tot een efficiëntere omzetting van de stroom in de verdeler. AC→AC omzettingen (van spanning) zijn namelijk effectiever dan DC→DC of DC→AC omzettingen.
- **Aanname model I.** Voor model I is er gesteld dat voor de berekening van het vermogensverlies op de verdeler-generator kabel er mag worden aangenomen dat alle



verbruikers die op de verdeler moeten worden aangesloten daarmee worden verbonden via de routing met de kleinst mogelijke afstand (zie paragraaf 3.1.1). In model I is deze afstand bekend want deze is in de pre-processing reeds berekend. In deze verificatie proberen we een set invoerdata zó op te stellen dat deze aanname gebroken wordt. Volgens een iteratief proces moet er met model I dan toch de juiste oplossing worden bereikt (voor details over dit proces zie [16]). Bij het uitvoeren van deze test met model I moet er dus uitvoer worden gegeven waarin staat vermeld dat de aanname is gebroken. Na het iteratieve proces moet toch een juiste oplossing worden gevonden voor deze test, deze oplossing dient dus vergeleken te worden met de oplossing van model II waar geen sprake is van dergelijke aannamen.

- **Meerdere kabelverbindingen.** Als voorbereiding op grotere vliegtuigmodellen in de validatie worden er in deze verificatietest meerdere objecten geïntroduceerd met elk meerdere kabelverbindingen. Van elk object worden er twee stuks geplaatst, twee verbruikers (één in zone Cockpit de ander in zone Tail), twee verdelers (zones Fuse1 en Fuse2) en twee generatoren (één in elke vleugel). Vervolgens wordt elke verbruiker op elke verdeler aangesloten en elke verdeler op elke generator. Dit impliceert acht kabelverbindingen. Het is nu interessant om te zien of al deze verbindingen goed worden gemaakt en om te kijken of alle vermogensverliezen goed worden doorberekend.

#### 4.1.2 Resultaten

Om tot resultaten te komen is de modellering zoals beschreven in hoofdstukken 2 en 3 geïmplementeerd in een C++ programma genaamd 'epsopt'. Voor meer informatie over dit programma wordt verwezen naar de gebruikershandleiding van dit programma [15]. Een beschrijving van de strategie die aan deze resultaten ten grondslag ligt is beschreven in paragraaf 4.1.1.

##### 4.1.2.1 Basistest

Het programma epsopt is met de invoerdata in staat het optimum te vinden aan de hand van model II. We zien dat het resultaat van model I identiek is aan het resultaat van model II en dus voor deze invoerdata ook het optimum beschrijft.



De uitvoer van het programma bevat onder andere de waarden die de criteria i. tot en met ix. hebben voor de optimale oplossing.

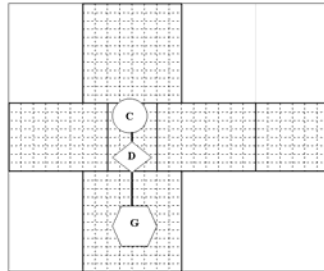
*Tabel 1: de waarden van enkele criteria, gegeven de optimale oplossing van de basisset*

ID	Constraint	Value	ID	Goal	Value	Schaling
v	Total object weight (kg.)	111.0000	i	Total cable weight cost (units)	40.6394	$10^0$
v	Total cable weight (gr.)	40.6394	ii	Total cable volume cost (units)	2.6251	$10^0$
vi	Total object volume (m <sup>3</sup> )	3.4500	iii	Total object weight cost (units)	11.1000	$10^{-4}$
vi	Total cable volume (mm <sup>3</sup> )	2.6251	iv	Total object volume cost (units)	3.4500	$10^{-9}$
vii	Total powerloss in aircraft (Watt)	6.6028 (model I) 6.1595 (model II)				
viii	Total wrongside cost (units)	6000000.0000		Objective value	57.8145	
ix	Centre of gravity point (x-axis)	0.0000				

Opvallend is het verschil in de waarde van criterium vii. voor beide modellen, hier zullen we later op terug komen. We merken op dat alle overige uitvoer voor beide modellen identiek is. Dit geeft een goede indicatie van de juistheid van beide implementaties.

Naast deze uitvoer wordt er ook informatie gegeven over de plaatsing van de objecten en de routing van de kabel. In alle resultaten (zie [16]) worden achtereenvolgens plaatsingen van de verbruikers, verdelers en generators genoemd samen met hun eventuele kabelverbinding(en).

Om een beeld te krijgen van deze plaatsingen en routeringen vatten we deze informatie voor deze verificatietest samen in een volgende figuur (C = verbruiker, D = verdeler en G = generator):



Figuur 3: Oplossing basistest

Zoals wellicht was te verwachten wordt de verbruiker in de resultaten van beide modellen in zone Fuse1 geplaatst. De kabel naar de verdeler kan dan direct worden aangesloten binnenin de zone Fuse1, dit is de kortst mogelijke afstand voor deze verbinding. Vervolgens wordt de kabel vanaf de verdeler getrokken naar de generator in zone Left wing, ook via de kortste route. Door de lage complexiteit van de invoerdata is het gemakkelijk handmatig na te rekenen dat hier de optimale oplossing is gevonden. Om dit te kunnen concluderen zijn alle waarden in de uitvoer eerst handmatig berekend en geverifieerd voor beide modellen.

De waarde van het criterium vii. (totale verloren vermogen in het vliegtuig) verschilt per model. Dit komt omdat over alle verdeler-generator bekabelingen in model I slechts een minimaal vermogensverlies wordt berekend (op basis van de kortste routeringen tussen verbruiker en verdeler, zie paragraaf 3.1.1). Het vermogensverlies wordt voor model II in zijn geheel niet meegenomen (zie paragraaf 2.6). Deze waarden worden echter wel voor beide modellen achteraf (als post-processing) correct berekend.

#### 4.1.2.2 Vergelijking met het rekenmodel

We verifiëren de basistestset met het bestaande rekenmodel in MatLab. Er moet hier echter rekening worden gehouden met het feit dat het rekenmodel voor een tweetal grootheden andere eenheden gebruikt dan epsopt. In epsopt worden alle gewichten in gram en alle volumes in  $\text{mm}^3$  uitgedrukt, in het rekenmodel is dit respectievelijk in kilogram en  $\text{m}^3$ . We lossen dit conversieverschil op door te conformeren aan de eenheden in het rekenmodel.



Als de door epsopt gevonden optimale oplossing in het rekenmodel wordt ingevoerd en we het rekenmodel alle eigenschappen van de bekabeling en objecten laten berekenen leidt dit tot het volgende resultaat:

*Tabel 2: de uitvoer van het rekenmodel gegeven een optimale oplossing uit epsopt*

Aircraft name	: test
Number of generators	: 1
Number of zones	: 6
Number of verbruikers	: 1
Number of verdelers	: 1
Weight of electrical system	: 111.040639
Cost of electrical system	: 114.490642
Moment of the electrical system	: 1110.406394
Power of the electrical system	: 19.202756
Loss of the electrical system	: 6.602756
Ok	: 1
Number of Errors	: 0

Deze waarden zijn vergeleken met de resultaten van epsopt voor beide modellen. Er is geconcludeerd dat deze waarden inderdaad kloppen met de resultaten uit epsopt, zie ook [16]. Zie ook deze referentie voor de verificatie van alle testen genoemd in paragraaf 4.1.1. We concluderen dat de modellen goed werken voor al deze testen.

### 4.1.3 Performance

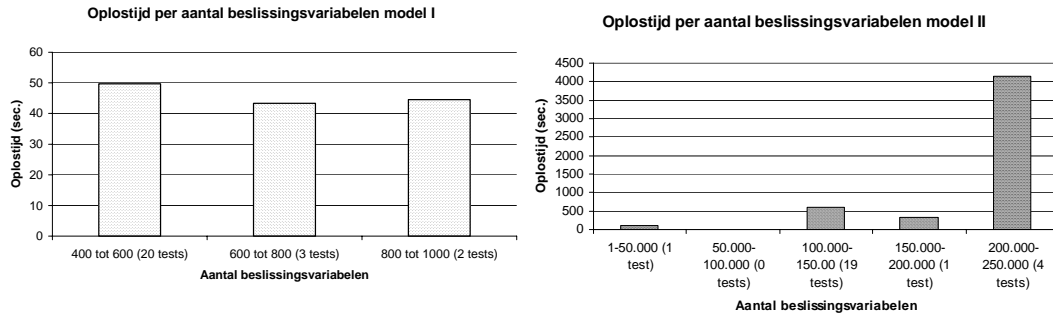
Voor elke verificatietest die is uitgevoerd is bijgehouden hoeveel (binaire) beslissingsvariabelen zijn gebruikt en hoe lang de berekening duurde<sup>14</sup>. Daarbij moet aangemerkt worden dat deze rekentijd afhankelijk kan zijn van andere processen die gelijktijdig op de computer draaien waarop de verificatietesten zijn uitgevoerd. Ook andere technische zaken zoals beschikbaarheid van geheugen en cache spelen daarbij een rol. We nemen echter aan dat door aggregatie van de rekentijden een analyse daarvan toch mogelijk wordt.

We beschouwen eerst een mogelijke correlatie tussen de beslissingsvariabelen en de oplostijd. Er is namelijk rede om aan te nemen dat een model met meerdere beslissingsvariabelen moeilijker oplosbaar is dan een model met minder beslissingsvariabelen omdat er tijdens de optimalisatie meer keuzes gemaakt moeten worden. We zetten de gemiddelde oplostijden uit tegen de gegroepeerde hoeveelheid beslissingsvariabelen voor model I en II.

<sup>14</sup> Het beginpunt van de meting ligt direct na initialisatie van alle objecten. Het eindpunt ligt vlak voor de aanroep van de methode die de rapportage genereert. We nemen aan dat de rekentijd buiten het gemeten interval verwaarloosbaar is.



We doen dit voor 25 testen die zijn gebruikt voor de verificatie (merk op dat er 26 testen gedefinieerd waren in paragraaf 4.1.1, voor de test "meerdere kabelverbindingen" bleek model II geen resultaten te produceren, hierop zal later worden teruggekomen):<sup>15</sup>



Figuur 4: de gemiddelde oplostijden per groep beslissingsvariabelen voor model I en II

Het eerste wat opvalt is dat de gemiddelde oplostijden en het aantal beslissingsvariabelen voor model II een stuk hoger ligt dan voor model I. Dit was reeds de verwachting zoals ook blijkt uit paragraaf 3.1. Een zeer grove correlatie tussen oplostijd en aantal variabelen lijkt dus gerechtvaardigd. Echter als we per model de gegroepeerde hoeveelheden beslissingsvariabelen beschouwen zouden we, gegeven een correlatie, een stijgende verloop van de oplostijden verwachten. Dit effect is slechts duidelijk in Figuur 4 voor de laatste categorie van model II (200.000-250.000 beslissingsvariabelen). Dit valt te verklaren door de grote hoeveelheid geheugen die de testen in deze categorie nodig hadden. Dit geheugen was niet fysiek aanwezig in de gebruikte computer en er werd dus virtueel geheugen gebruikt, de zogenaamde 'swap space'. Dit maakt de performance aanzienlijk slechter. We concluderen dat een correlatie tussen oplostijd en aantal beslissingsvariabelen niet duidelijk aanwezig is voor deze modellen en testen.

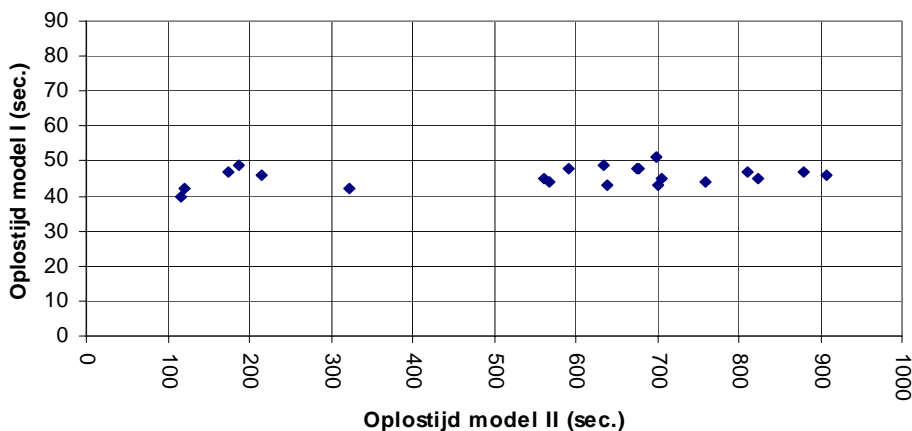
Rest nog de enige correlatie tussen de oplostijden van de modellen I en II te analyseren. Omdat in model I en model II de problemen uit de verificatietesten op een geheel andere manier worden geïmplementeerd is het niet direct duidelijk of er een enige correlatie zal bestaan tussen paren van oplostijden van de oplostijden van model I en model II. We analyseren dit aan de

<sup>15</sup> Voor model I wordt onder de oplostijden ook de rekentijd in de pre-processing meegerekend. Het aantal beslissingsvariabelen bevat ook de beslissingsvariabelen die gebruikt werden in de pre-processing.



hand van de volgende grafiek; we nemen de vier testen voor model II uit Figuur 4 met hoge oplostijden als gevolg van het gebruik van virtueel geheugen hierbij niet op:

### Gepaarde oplostijden model I en model II



Figuur 5: de gepaarde oplostijden voor model I en II, exclusief 'outliers'

Er is te zien dat er ruwweg een tweetal clusters van de paren van oplostijden ontstaan in de grafiek. Dit lijkt te duiden op een correlatie tussen de oplostijden van model I en model II binnen de clusters. Het eerste cluster bevat de basistest, de test op criterium xiii., de derde test op criterium x. en testen op kabeltype, stroomklasse en de aanname van model I. Helaas kunnen we daarbij geen reden geven voor de waargenomen clustervorming. We kunnen wel stellen dat de oplostijden van model I een kleinere spreiding laten zien in vergelijking met de oplostijden voor model II. De oplostijden voor model I zijn stabiel, zij liggen praktisch allemaal binnen het interval [40,50] seconden.

We concluderen dat de performance voor model I superieur is aan die van model II. We zien bijvoorbeeld dat het gebruik van model II voor de test "meerdere kabelverbindingen" tot een onacceptabele grote hoeveelheid geheugenverbruik leidt. Er kan daarom geen resultaat voor deze test worden geproduceerd aan de hand van model II. Voor de validatietesten lijkt model II dus niet bruikbaar, model I echter wel. Daarbij merken we op dat de testen gebruikt voor deze analyse zeer simpele vliegtuigmodellen betreffen. Zoals we zagen voor het gedrag van de oplostijd van model II is het mogelijk dat met grotere invoerdata de rekestijd van model I ook explosief stijgt.

Naast de oplostijden is ook het geheugengebruik voor beide modellen geanalyseerd met behulp van externe programmatuur. Het controleren op problemen en/of fouten die bij het gebruik van geheugen kunnen voorkomen is altijd aan te raden aangezien dit de performance sterk kan



beïnvloeden. Daarbij is het bekend dat in de gebruikte programmeertaal C++ dit soort fouten gemakkelijk zijn te maken. Daartoe is het programma volledig gecontroleerd op geheugen(toewijzings)fouten met behulp van Purify [7] en Valgrind [12].

#### **4.2 Validatie**

Voor de validatie hebben we een zo waarheidsgetrouw mogelijk vliegtuigmodel nodig. We realiseren ons echter dat dit niet binnen de mogelijkheden van de stage ligt. Het opstellen van waarheidsgetrouwe vliegtuigmodellen vereist namelijk veel expertise van vliegtuigen. Alle eigenschappen van de objecten en zones moeten namelijk gevuld worden met realistische waarden. Een groot voordeel van een waarheidsgetrouw vliegtuigmodel is dat de resultaten van epsopt vergeleken kunnen worden de bekabelingsrealiteit. Het vliegtuigmodel wat hier voor validatie is gebruikt valt echter niet als realistisch aan te merken. In het vliegtuigmodel dat wordt gebruikt voor de validatie zijn wel alle elementen in het model aanwezig die in een waarheidsgetrouw model zouden kunnen voorkomen.

Er is gekozen voor het opstellen van eenendertig verbruikers, zes verdelers en twee generatoren. Deze moeten worden geplaatst in een abstracte layout van een vliegtuigmodel dat voor alle validatietesten zal worden gebruikt. De layout van dit vliegtuigmodel bestaat 24 zones.

Eerst zullen we de strategie van het valideren van epsopt voor grotere vliegtuigmodellen bespreken in paragraaf 4.2.1. Dit zal leiden tot een drietal modellen waarvan de resultaten onderling met elkaar vergeleken kunnen worden. Vervolgens wordt er een vliegtuigmodel geconstrueerd in deze paragraaf. Op dit vliegtuigmodel kan dan de teststrategie worden losgelaten. De resultaten van een drietal testen die daarin worden beschreven worden samengevat in paragraaf 4.2.2. In paragraaf 4.2.3 wordt nogmaals teruggekomen op de prestatieindicators die reeds in paragraaf 2.5 ten behoeve van de validatie waren opgesteld. Er wordt nagegaan hoe de kwaliteit van de resultaten die in de validatie zijn gevonden valt te kwantificeren.

##### **4.2.1 Teststrategie**

In de validatietestfase nemen we aan dat alle waarden die epsopt als uitvoer geeft correct zijn. We kijken nu slechts naar de interpretatie van de oplossingen die het programma geeft. De oplossing moet dus plausibel zijn. We kunnen ook een aantal instellingen veranderen en analyseren hoe de oplossing daardoor verandert.

We zoeken naar een enkelvoudige instelling in het vliegtuigmodel die, indien deze veranderd wordt, de totale oplossing drastisch moet kunnen doen veranderen. Als er meerdere instellingen zouden worden veranderd dan is het waarschijnlijk dat de veranderingen in de resultaten te



complex worden om daar een juiste interpretatie aan te geven. Zoals al eerder opgemerkt zijn de optimalisatiecriteria namelijk onderling afhankelijk, wat het vinden van oorzaak en effect relaties kan bemoeilijken. De criteria kunnen dan namelijk met elkaar interacteren. In de hierna komende testen wordt gekeken naar de invloed van het op verschillende wijzen meenemen en/of gebruiken van criterium ix., de positie van het 'centre of gravity', op de oplossing.

Het criterium voor het 'centre of gravity' kan op twee manieren in de optimalisatie worden gebruikt. Beide methoden zullen worden gehanteerd in de validatie waarbij het 'centre of gravity' afwisselend richting de neus en richting de staart van het vliegtuig worden verlegd.

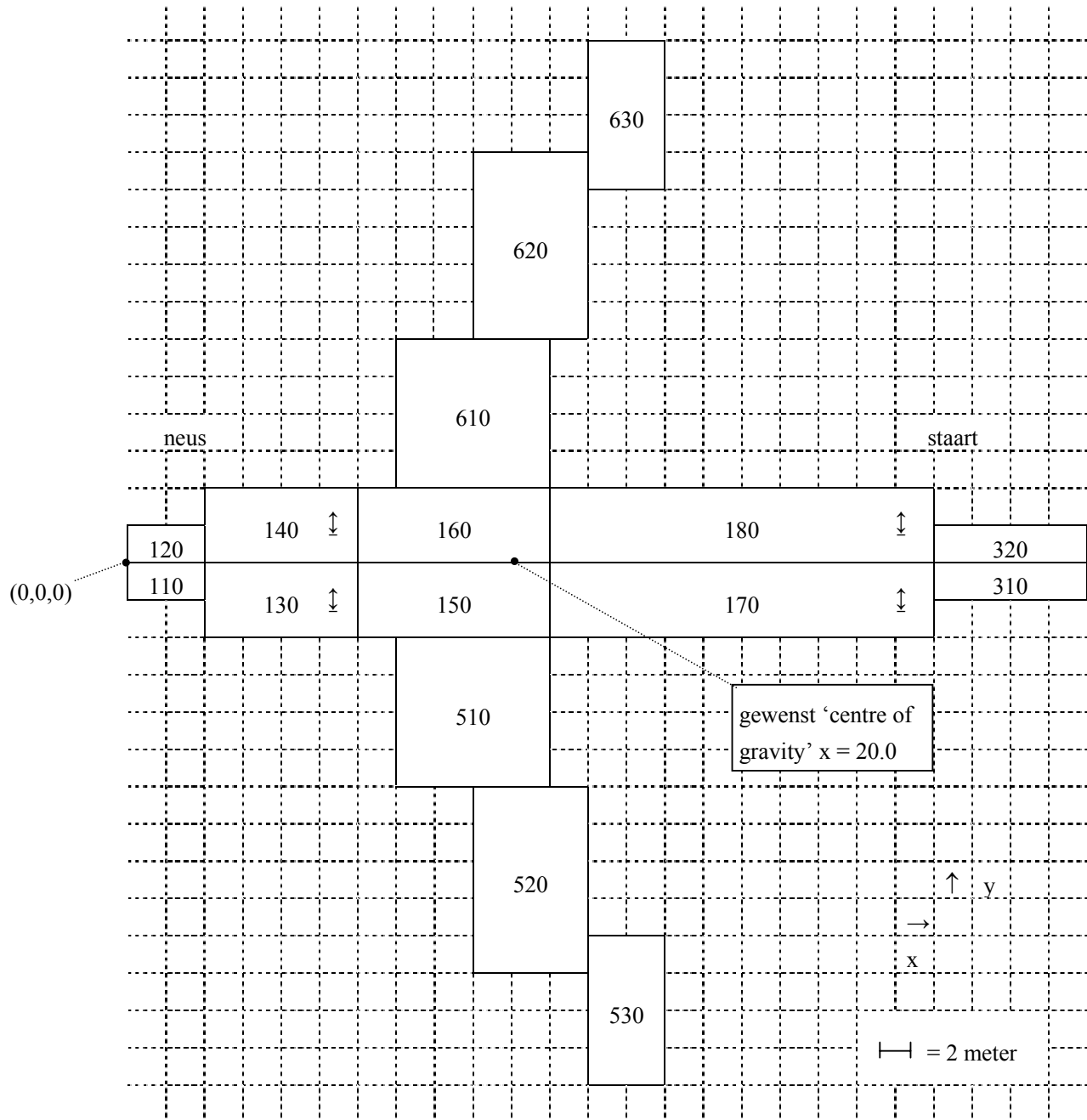
Als eerst zal in paragraaf 4.2.2 de oplossing van het basisvliegtuigmodel worden besproken. Dit is validatietest één ofwel de basistest. Met name interessant aan deze oplossing zal zijn waar het 'centre of gravity' komt te liggen, dit punt zal namelijk als referentie dienen in de volgende twee validatietesten. Het 'centre of gravity' wordt in validatietest één wel meegenomen als constraint, dit gebeurt echter met een boven- en ondergens zo gekozen dat het criterium geen invloed heeft op de optimalisatie.

In de tweede validatietest wordt het criterium voor het 'centre of gravity' meegenomen als doel in de optimalisatie. We stellen daarbij dat het doel is om het 'centre of gravity' zover mogelijk in de neus van het vliegtuig te leggen. Dit criterium wordt, in vergelijking met de andere criteria die in de doelfunctie worden opgenomen, zwaar meegewogen in de doelfunctie. We verwachten nu een plaatsing van de objecten en bekabeling waarbij er alles aan wordt gedaan om het 'centre of gravity' te verschuiven naar de neus van het vliegtuig. In een derde validatietest moet het 'centre of gravity' juist richting de staart van het vliegtuig verschoven worden. Nu wordt er echter voor gekozen het criterium voor het 'centre of gravity' op te nemen als constraint, de gewenste waarde in te vullen voor het gewenste 'centre of gravity', en de minimale/maximale afwijking van deze waarde mee te geven.

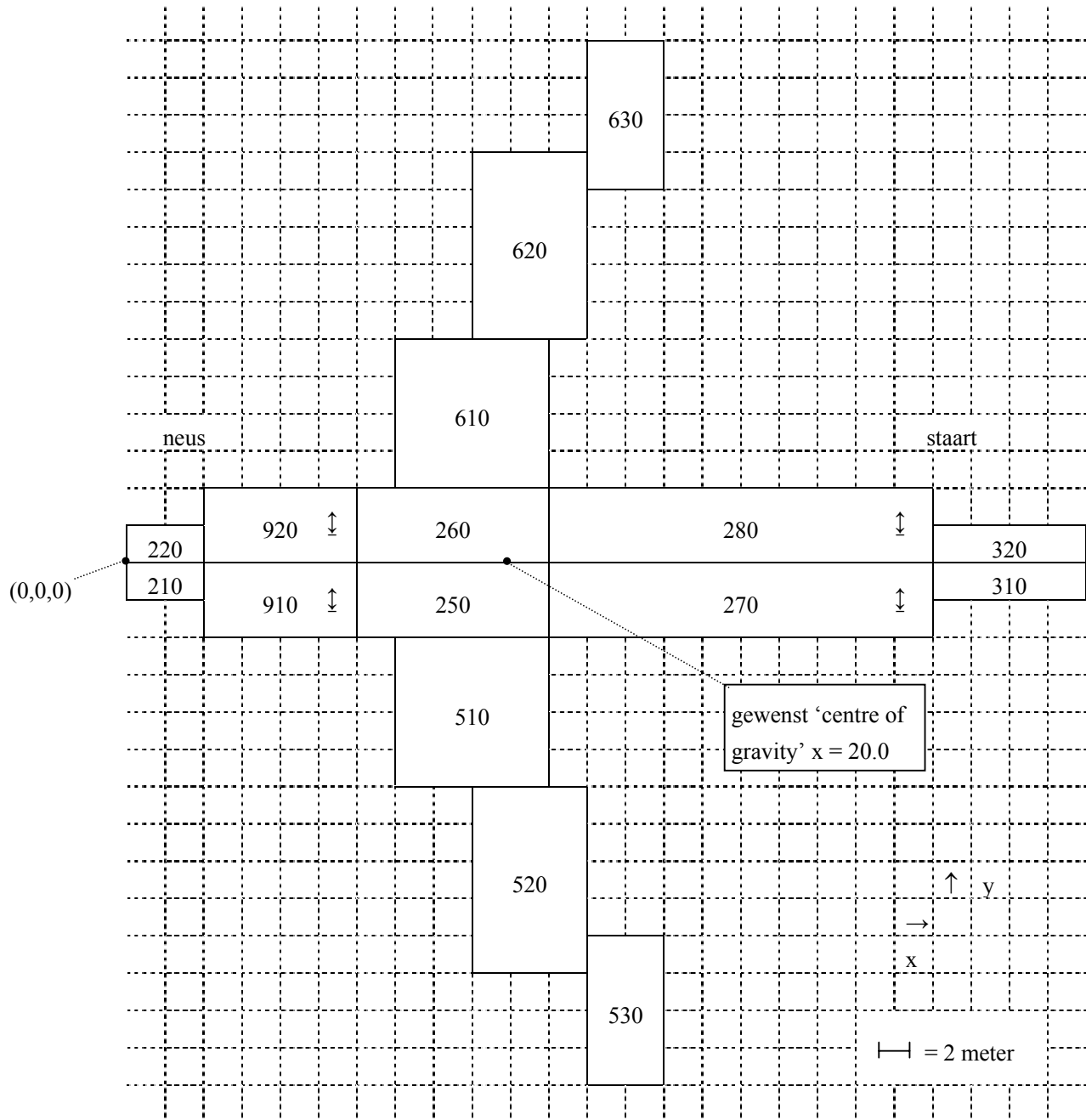
Zoals eerder vermeld zal voor alle validatietesten een zelfde vliegtuigmodel met 24 zones worden gebruikt. We kiezen er voor om een vliegtuig te ontwerpen waar voor de meeste zones een boven- en een onderverdieping zijn gedefinieerd. De zones in de vleugels en de staart hebben geen verdiepingen.



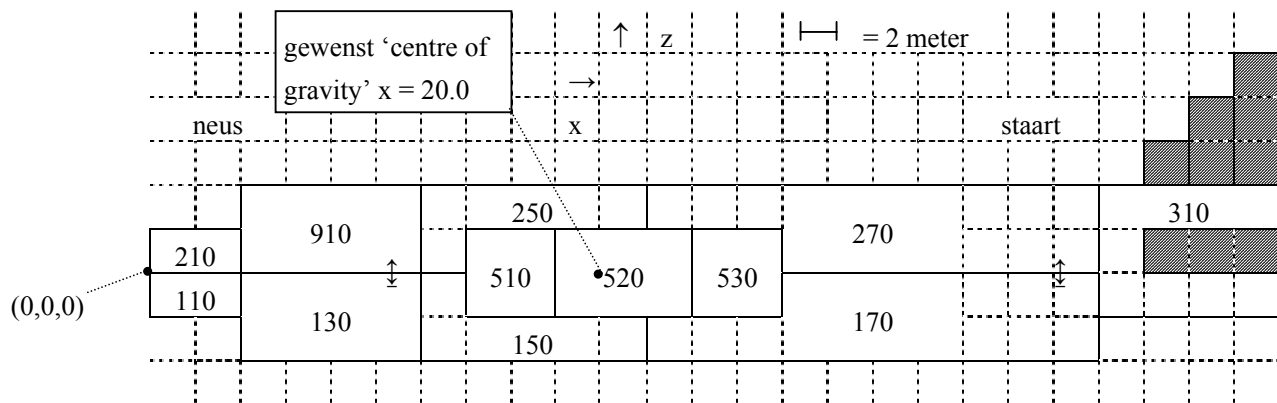
We zullen in de gehele validatie uitgaan van de volgende layout voor het vliegtuigmodel:



Figuur 6: onderste niveau van het vliegtuigmodel voor de validatie



Figuur 7: bovenste niveau van het vliegtuigmodel voor de validatie



Figuur 8: zijaanzicht van het vliegtuigmodel voor de validatie

#### 4.2.2 Validatietesten

Er gaan drie validatietesten worden uitgevoerd. Eerst wordt er een basistest uitgevoerd en vervolgens worden twee testen uitgevoerd waarin wijzigingen worden aangebracht in criterium ix., dat het 'centre of gravity' beïnvloed.

##### 4.2.2.1 Basistest

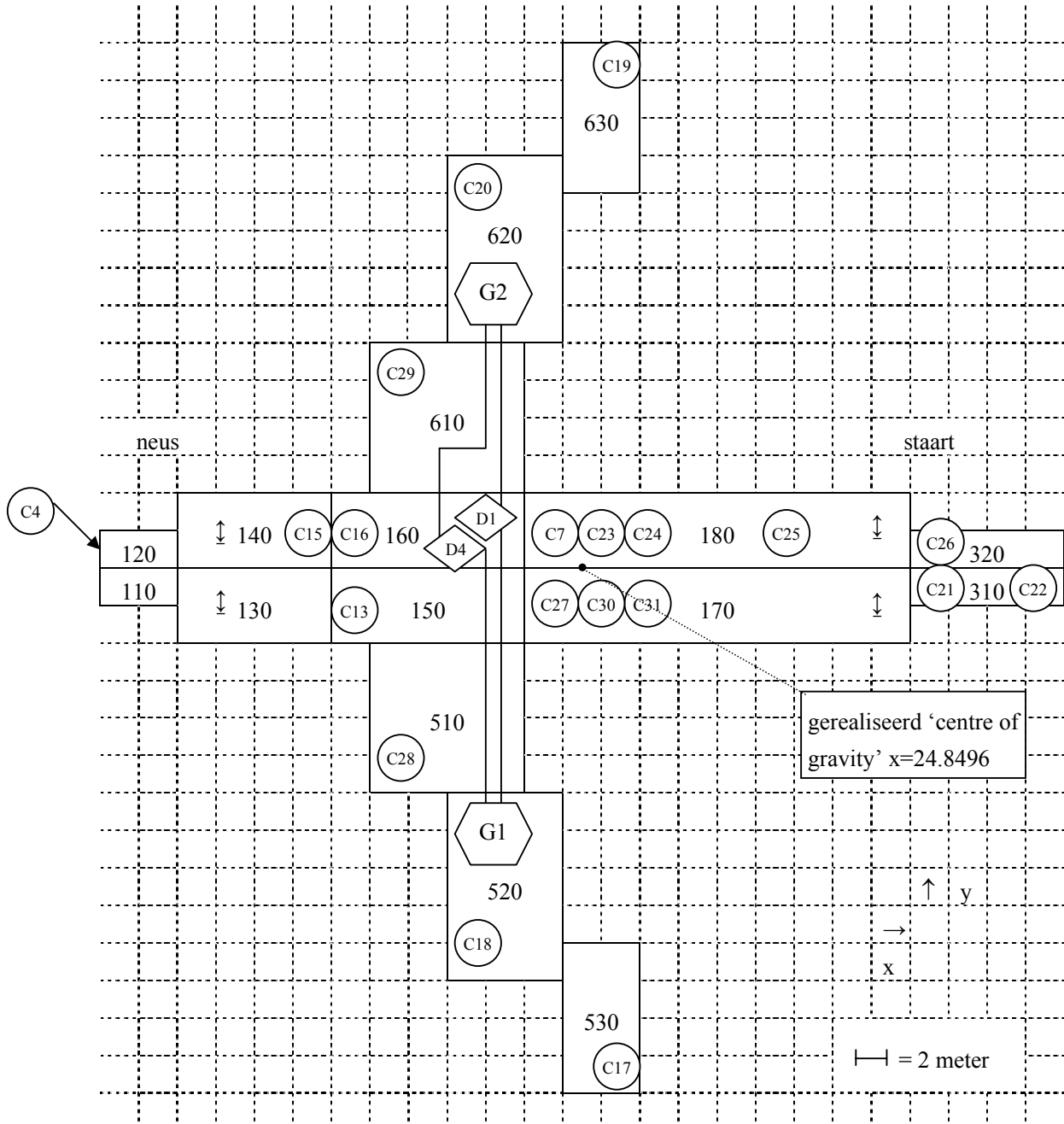
In de basistest worden de criteria i. tot en met iv. in de doelfunctie van de optimalisatie worden opgenomen. Dit is een logische keuze omdat deze criteria tezamen de kosten van het gewicht en volume van de bekabeling en de objecten beschrijven. De volumes en gewichten van de objecten worden daarbij geschaald om de verschillende eenheden van de volumes en gewichten van de objecten en bekabeling te compenseren.

De overige criteria worden ingesteld als constraint. Daarbij proberen we echter de boven- en ondergrenzen van deze constraints zo te kiezen dat de constraints niet beperkend zijn voor de uiteindelijke oplossing. De strategie hierachter is dat het optimalisatieprobleem oplosbaar blijft. Als een oplossing daarbij gevonden is kunnen later extra beperkingen worden toegevoegd daar waar dat gewenst is. Er wordt vanuit gegaan dat voor de pre-processing van model I het berekenen van de 5 beste routeringen voldoende is om tot correcte resultaten te komen.

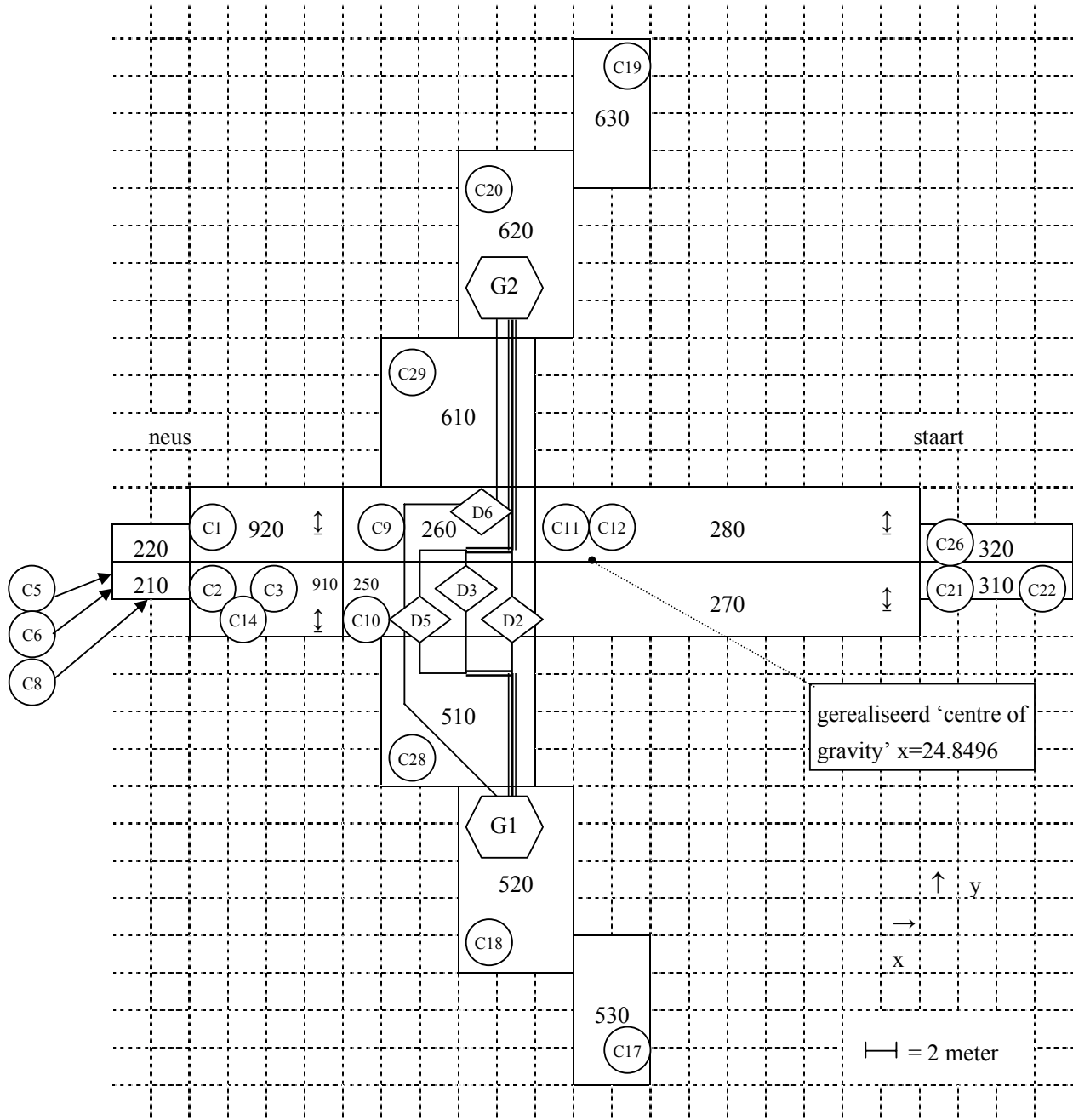
We geven hier een schematische samenvatting van het resultaat van die optimalisatie. Daartoe geven we in Figuur 9 en Figuur 10 de layout van het vliegtuigmodel voor validatie uit paragraaf 4.2.1 weer.



Hierin zijn alle objecten getekend die zijn geplaatst in het vliegtuig conform het resultaat van de optimalisatie:



Figuur 9: onderste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie, ingevuld met de gevonden oplossing



Figuur 10: bovenste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie, ingevuld met de gevonden oplossing

In de beide figuren zijn ook alle bekabelingen van de verdelers naar de generatoren opgenomen. De overige bekabeling is niet opgenomen om de figuren overzichtelijk te houden. In het



resultaat dat word geproduceerd door epsopt wordt duidelijk dat voor elke verbinding tussen twee objecten die in het model wordt gemaakt de kortste routing wordt gekozen. Dit lijkt correct omdat er geen extra beperkingen waren opgelegd aan de oplossing door middel van de invoerdata. Omdat het doel van de optimalisatie het minimaliseren van de kosten van het gewicht en volume van de objecten en bekabeling was en omdat de kortste kabelafstanden de kleinste kosten met zich meebrengen lijkt de routingen uit de oplossing logisch.

In de validatie is gesteld dat de keuzes van de plaatsingen van de verdelers belangrijk zijn en dat de keuzes van de plaatsingen van de verbruikers beperkt zijn. Als we nu de plaatsing van alle verdelers analyseren zien we dat zij alle zes in de centrale zones 160, 250 en 260 zijn geplaatst. Daarbij gaan we er vanuit dat dit te verklaren valt door de minimalisatie van de kabellengte van en naar deze verdelers. Alle verdelers moeten met relatief zware bekabeling worden aangesloten op de generatoren en moeten uit optimaliteitsoverwegingen dus zo dicht mogelijk bij deze generatoren worden geplaatst. Of zij daarbij aan de linker- of rechterkant van het vliegtuig worden geplaatst doet er niet toe; elke verdeler moet immers op beide generatoren worden aangesloten.

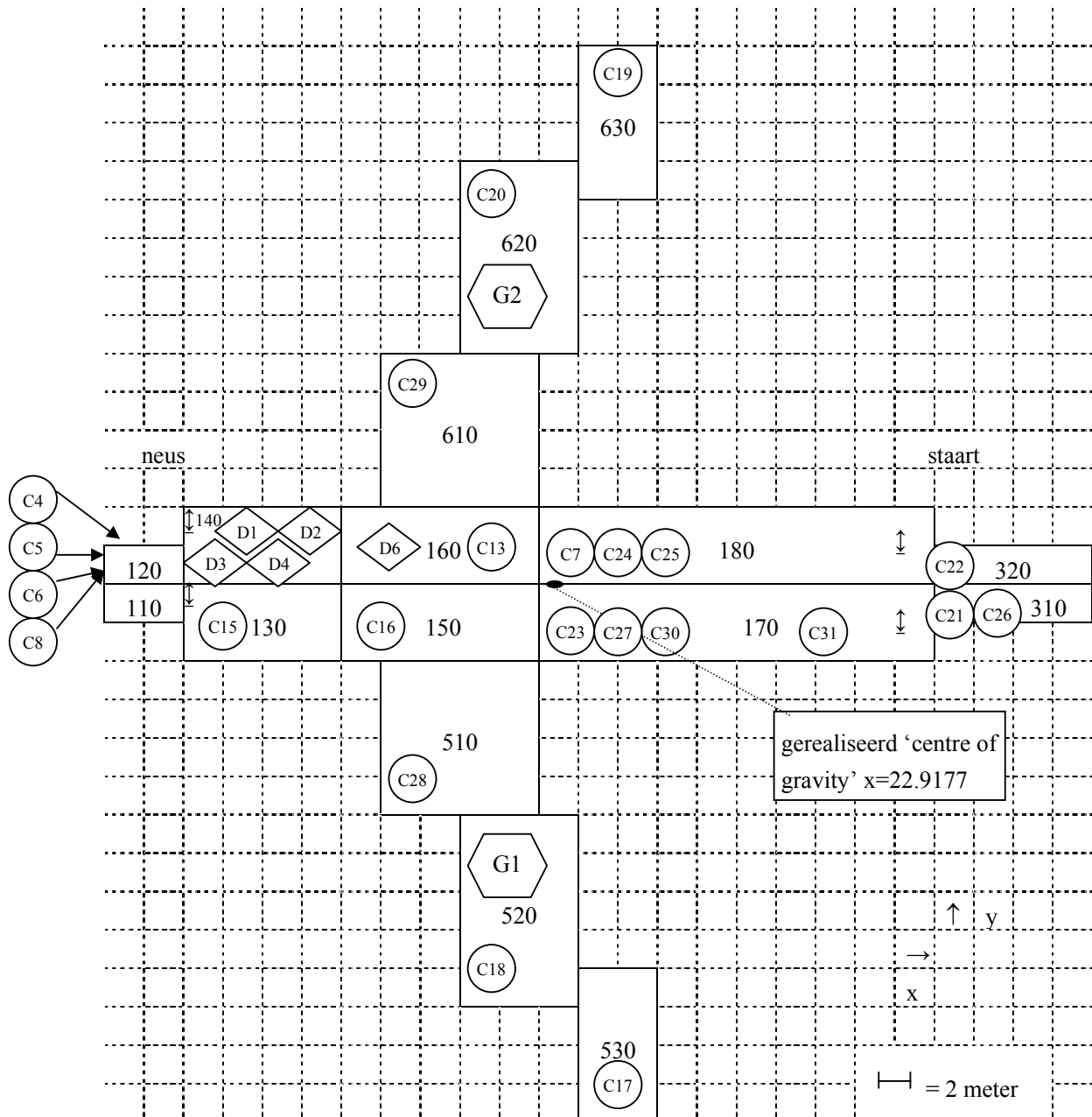
De plaatsing van de verbruikers volgt uit de plaatsing van de verdelers. De plaatsingsmogelijkheden van de verbruikers zijn namelijk over het algemeen beperkt tot een tweetal zones waarvan zich er één aan de linkerkant van het vliegtuig bevindt en één aan de rechterkant. Daarnaast zijn deze twee zones over algemeen burens. Als nu een verdeler aan de linkerkant van het vliegtuig wordt geplaatst is het aannemelijk dat ook alle verbruiker die op deze verdeler moet worden aangesloten aan dezelfde kant van het vliegtuig worden geplaatst. Dit resulteert wederom in de kortst mogelijke routingen. We zien in de resultaten dat dit precies het geval is in de gevonden oplossing, alle verbruikers staan aan dezelfde kant als de verdelers waarop zij zijn aangesloten. De enige uitzonderingen op deze regel zijn verbruikers C10 en C13, zij zijn geplaatst in respectievelijk zones 250 en 150 daar waar hun verdelers zijn geplaatst in respectievelijk zones 260 en 160. De plaatsing van deze verbruikers blijkt echter te kloppen als we kijken naar de alternatieve mogelijke plaatsingen van deze verbruikers. De afstanden van deze plaatsingen tot de verdelers zijn voor beide verbruikers even lang als de afstanden in de huidige oplossing! Dit komt omdat de afstanden van 150 → 160 en van 250 → 260 gelijk zijn aan de 'distances inside' van de zones 160 en 260.

#### **4.2.2.2 Validatietest twee**

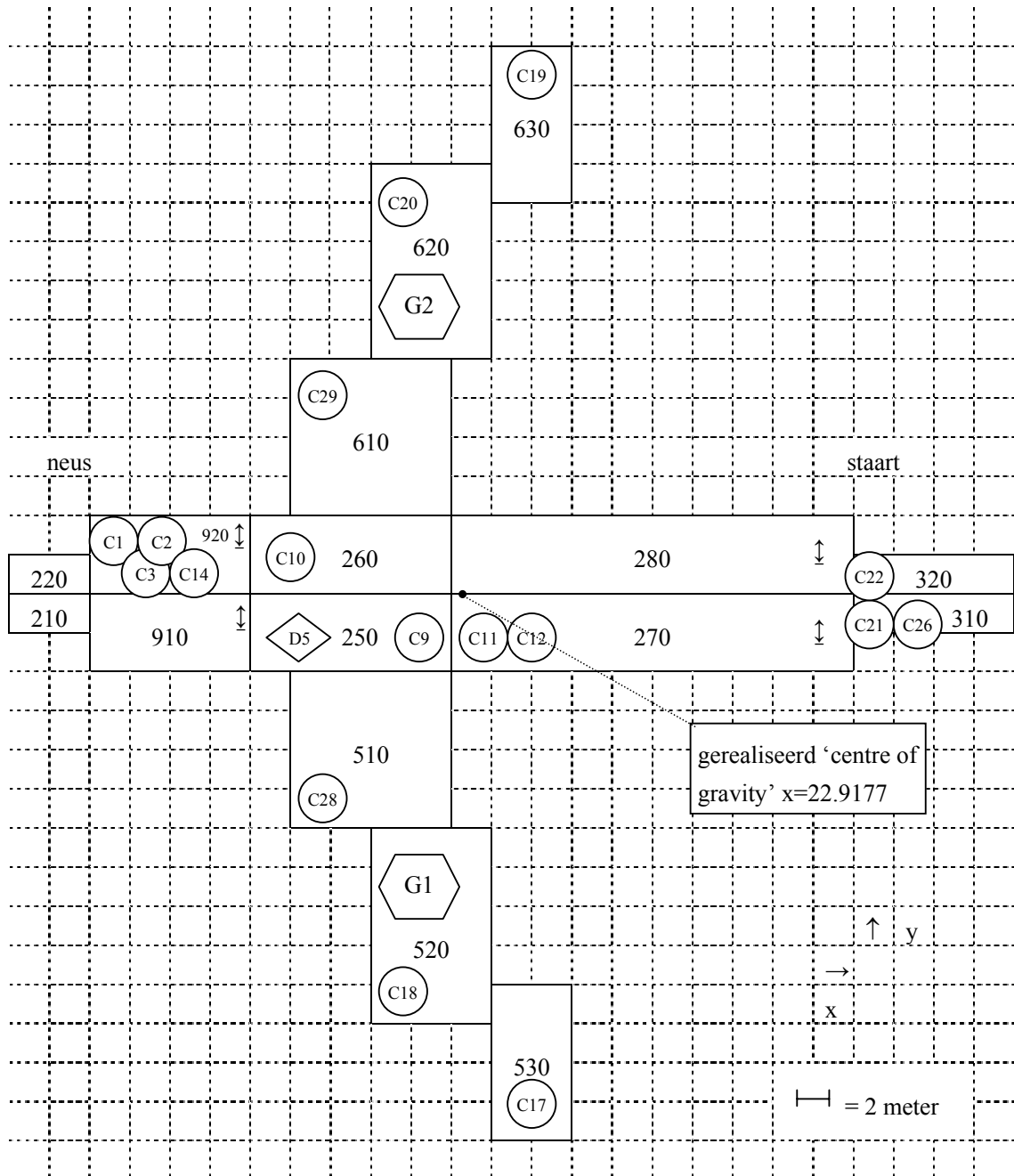
Als tweede test stellen we het 'centre of gravity' zover mogelijk in de neus van het vliegtuig moet komen te liggen door het desbetreffende criterium op te nemen in de doelfunctie. We stellen daarbij de schalingsfactor voor dit doel zo in dat het verleggen van het 'centre of gravity' naar de neus van het vliegtuig een zeer belangrijk doel wordt in de optimalisatie in verhouding



tot de andere doelen. Als gewenst 'centre of gravity' stellen we  $x = 22.0$ . Er is namelijk eerder reeds empirisch vastgesteld dat het behalen van dit doel onmogelijk is gegeven dit model. Verder was voor validatietest één het 'centre of gravity' 24.8496. We geven hier wederom de layout van het validatievliegtuig met daarin aangegeven de plaatsingen van alle objecten gegeven de oplossing van deze tweede validatietest. Daarbij tekenen we niet de verbindingen tussen de verdelers en de generatoren in het vliegtuig omdat dat zou leiden tot een onoverzichtelijk figuur:







Figuur 12: bovenste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie bij een minimaal 'centre of gravity'



Het resultaat voor het geoptimaliseerde 'centre of gravity' zoals in beide figuren is te zien is  $x = 22.9177$ . We zien dan dat de afwijking van het gewenste 'centre of gravity' 0.9177 meter is ten opzichte van het gewenste 'centre of gravity'. Het is echter goed mogelijk dat deze oplossing niet optimaal is. De redenen daarvoor zijn uitvoerig beschreven in paragraaf 3.1 en [16]. Samengevat ligt de oorzaak in het feit dat er in model I voor een pre-processing wordt gekozen waarin de S beste paden voor de bekabeling tussen objecten worden bepaald. Voor de verificatietesten was de gekozen waarde van vijf voor S voldoende. Er werden geen verschillen het model II geconstateerd. Daarbij merken we op dat model II voor het gedefinieerde EPS systeem wel de optimale oplossing berekent. Ook voor de basistest leek  $S = 5$  voldoende. Voor deze tweede test echter worden in de oplossing voornamelijk de routeringen 3 en 4 gekozen voor alle verbindingen. Daarbij moet worden aangemerkt routeringen met index 0 het optimale (kortste) pad tussen een tweetal objecten wordt beschreven, met index 1 het op-één-na beste (kortste) pad etc. Het is dus goed mogelijk dat verhoging van S leidt tot een andere, betere, oplossing.

Het feit dat langere routeringen worden gekozen valt te verklaren uit de bijdrage van het gewicht van de bekabeling aan het verplaatsen van het 'centre of gravity'. Als we bv. de routing bekijken van de gebruiker C1 die is geplaatst in zone 920 naar verdeler D1 in zone 140 zien we dat deze route wordt geleid via de volgende zones:  $920 \rightarrow 220 \rightarrow 210 \rightarrow 910 \rightarrow 130 \rightarrow 140$  (route index 2). De afstand van deze routing is veel langer dan de optimale routing (route index 0) die direct te maken is tussen de zones 920 en 140. We zien echter dat de gekozen routing relatief veel meer bijdraagt aan de verschuiving van het 'centre of gravity' richting de neus van het vliegtuig dan de optimale routing.



Als we nu de routeringen van de verdelers naar de generatoren beschouwen zien we een zelfde effect optreden:

*Tabel 3: de routeringen tussen de verdelers en generatoren gegeven een minimaal 'centre of gravity'*

Van verdelers	Naar generator	Route index	Via route
D1	G1	2	140 → 920 → 910 → 250 → 510 → 520
D1	G2	4	140 → 130 → 910 → 920 → 260 → 610 → 620
D2	G1	2	140 → 920 → 910 → 250 → 510 → 520
D2	G2	4	140 → 130 → 910 → 920 → 260 → 610 → 620
D3	G1	2	140 → 920 → 910 → 250 → 510 → 520
D3	G2	4	140 → 130 → 910 → 920 → 260 → 610 → 620
D4	G1	4	250 → 910 → 920 → 140 → 130 → 150 → 510 → 520
D4	G2	3	250 → 910 → 130 → 140 → 160 → 610 → 620
D5	G1	4	160 → 140 → 920 → 910 → 250 → 510 → 520
D5	G2	4	160 → 140 → 130 → 910 → 920 → 260 → 610 → 620
D6	G1	4	160 → 140 → 920 → 910 → 250 → 510 → 520
D6	G2	4	160 → 140 → 130 → 910 → 920 → 260 → 610 → 620

Zoals voor het gegeven voorbeeld voor de kabel vanaf de gebruiker C1 zien we ook voor de bekabeling vanaf de verdelers dat deze zo wordt gerouteerd dat de kabel bijdraagt aan het verleggen van het 'centre of gravity' richting de neus van het vliegtuig. Omdat voor de verbindingen uit Tabel 3 vaak voor route index 4 wordt gekozen is het waarschijnlijk dat deze oplossing niet het optimum beschrijft (als de waarde voor S groter was gesteld en er wordt voor een van de verbindingen voor een route index groter dan 4 gekozen dan is het zeker dat er in deze oplossing niet het minimale 'centre of gravity' is gevonden).

We kiezen er echter voor deze validatietest niet nogmaals uit te voeren met een grotere waarde voor S. De reden hiervoor is tweeledig. Ten eerste zal er voor geen enkele reële keuze voor S het bewijsbaar zijn dat het optimum wel is gevonden. Ten tweede zullen de routeringen tussen de objecten een bizar verloop krijgen waarbij alle kabels langs de in de neus gelegen zones worden gerouteerd. Deze oplossing is niet realistisch te noemen. Een betere strategie zal zijn een balans te vinden tussen het doel om het 'centre of gravity' in de neus van het vliegtuig te leggen en die criteria stellen dat de kosten van het gewicht en volume van de bekabelingen moet worden geminimaliseerd. De interpretatie van deze strategie valt buiten de validatie zoals die hier beschreven zal worden.

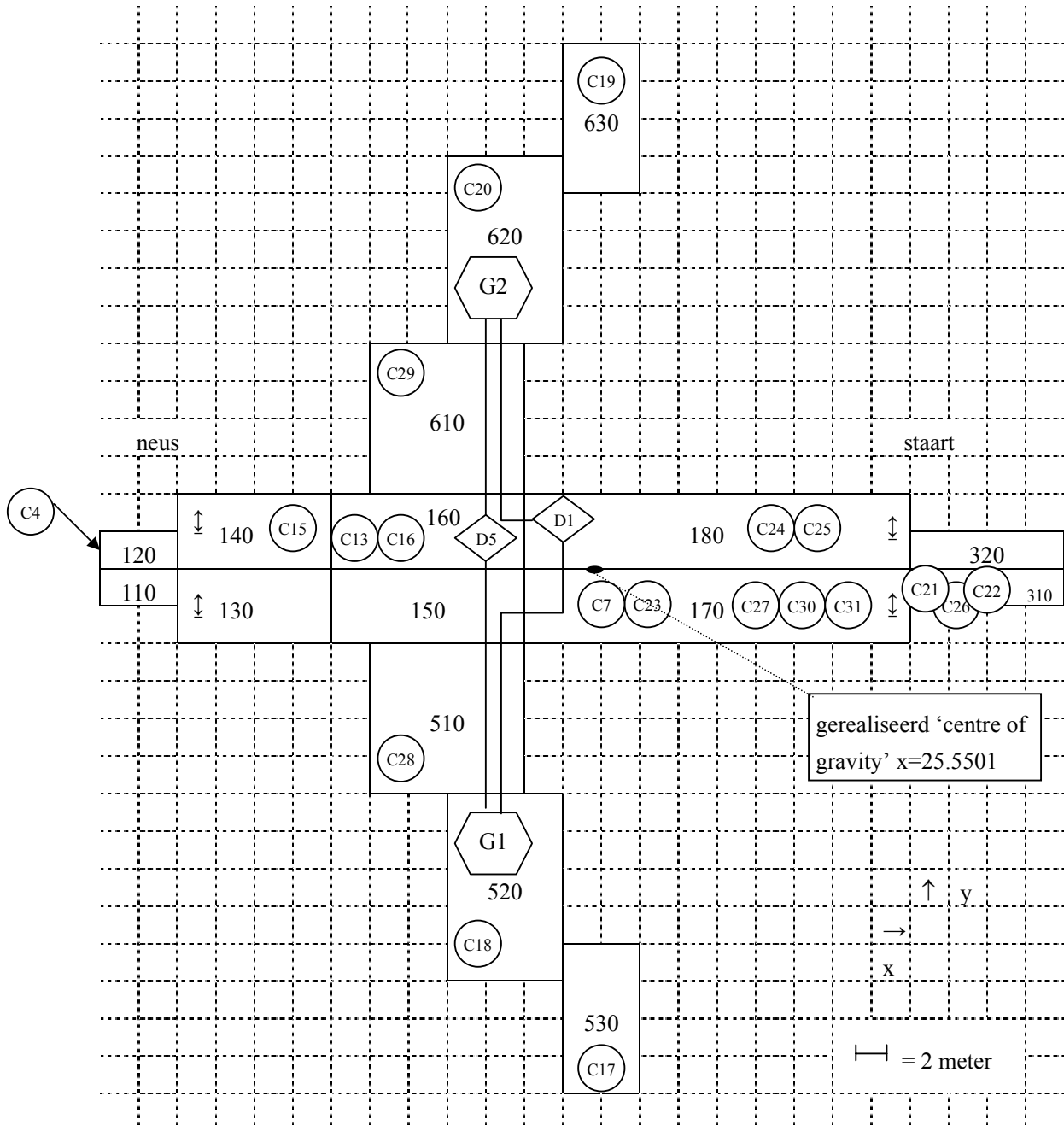


#### 4.2.2.3 Validatietest drie

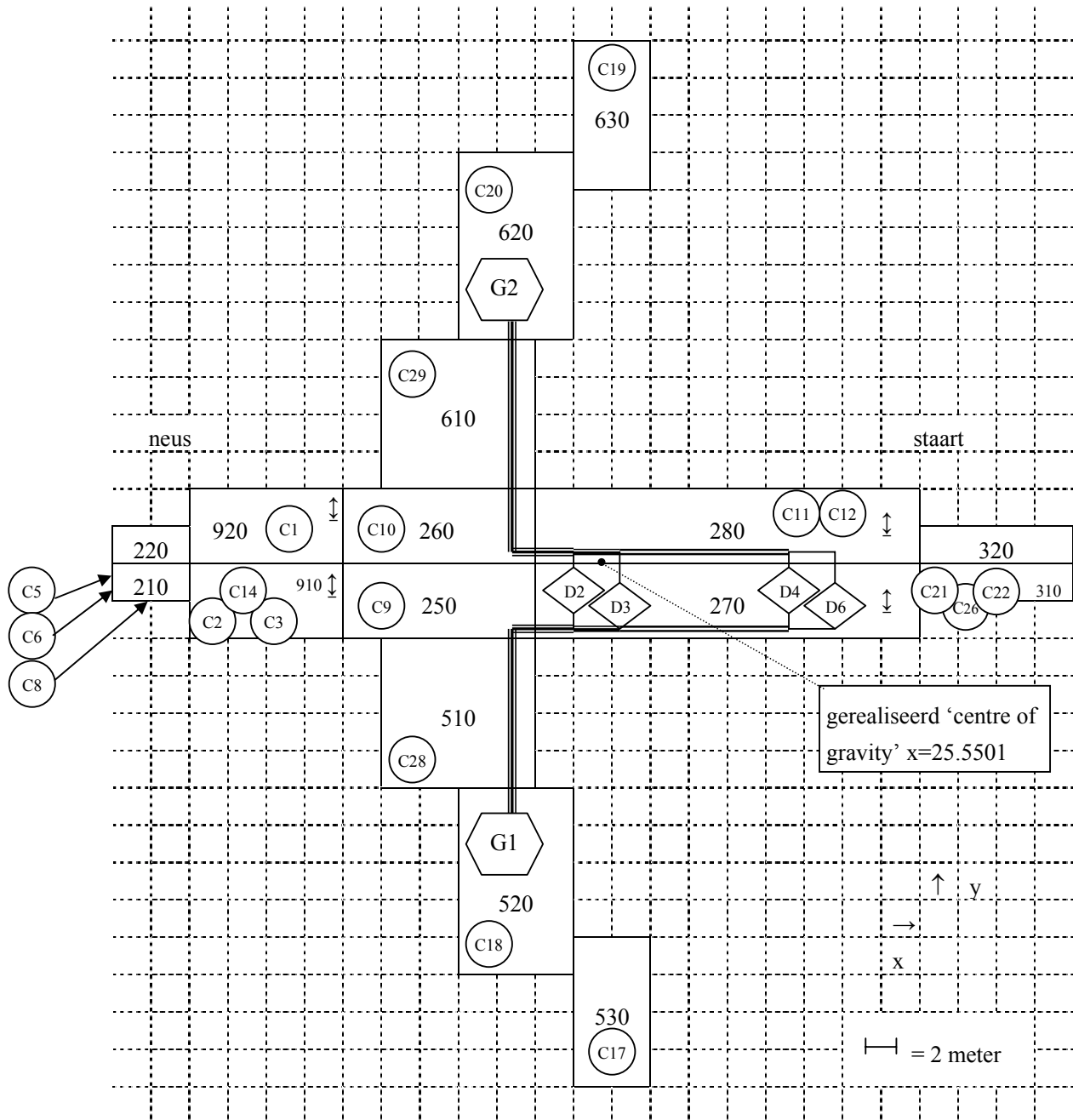
In een derde validatie van epsopt moet het 'centre of gravity' naar de staart van het vliegtuig verplaatst worden. We stellen daarvoor dat het 'centre of gravity' minimaal op  $x = 25.55$  moet komen te liggen. We veronderstellen dat dit niet onmogelijk is voor oplossingen van model I. Om de verschuiving van het 'centre of gravity' te bewerkstelligen veranderen we het gewenste 'centre of gravity' naar 25.5500 en de ondergrens van de afwijking van het 'centre of gravity' naar 0.0. Hierbij wordt criterium ix. als constraint meegenomen. Deze veranderingen van de basis-invoerdata moeten ook voor deze validatietest een verplaatsing van objecten en/of bekabeling teweeg brengen. Omdat de criteria i. tot en met iv. geminimaliseerd worden zal het 'centre of gravity' zeer dicht bij het nieuwe gewenste 'centre of gravity' blijven liggen, gezien de oplossing uit de basistest.



Dat dit inderdaad het geval is kan worden opgemaakt uit de volgende layouts van het vliegtuigmodel waarin de plaatsing van de objecten en de bekabeling tussen verdelers en generatoren is te zien, ingevuld met de resultaten van deze validatietest.



Figuur 13: onderste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie bij een minimaal x-coördinaat van 25.55 voor het 'centre of gravity'



Figuur 14: bovenste niveau van het vliegtuigmodel voor validatie bij een minimaal x-coördinaat van 25.55 voor het 'centre of gravity'

We zien in Figuur 13 en Figuur 14 dat er inderdaad sprake is van een verplaatsing van de objecten ten opzichte van hun plaatsing in de basisvalidatietest uit Figuur 9 en Figuur 10. Zoals



we reeds eerder hebben opgemerkt hebben de plaatsingen van de verdelers en de routeringen van de kabels voor alle verbindingen de meeste invloed op het verleggen van 'centre of gravity'. We zien dat in de oplossing van deze validatietest het 'centre of gravity' verschuift van x-coördinaat 24.8496 in de basisverificatietest naar 25.5501. Dit 'centre of gravity' ligt net boven het minimum dat vereist werd in de optimalisatie.

In de volledige oplossing valt te zien dat voor bijna elke verbinding een routeringsindex van 0 of 1 wordt gekozen. Dit houdt in dat, in tegenstelling tot de validatietest waarbij het 'centre of gravity' werd geminimaliseerd, er weinig redenen zijn om aan te nemen dat er hier een oplossing is gevonden die ver van het daadwerkelijk optimum verwijderd is. Zoals al eerder vermeld kunnen hier echter geen garanties voor worden gegeven.

Alle verdelers worden, in vergelijking met de oplossing van de basisverificatietest, verplaatst van hun centrale posities ter hoogte van de vleugels naar de mogelijke zones "achter" de vleugels (zones 170, 180, 270 en 280). Dit draagt bij aan het verleggen van het 'centre of gravity' maar blijkt niet voldoende. Zoals reeds opgemerkt in de analyse van de basisoplossing is het logisch dat de verbruikers aan dezelfde kant van het vliegtuig komen te staan als de verdeler waarop zij worden aangesloten. Voor de basisoplossing was dit ook daadwerkelijk het geval, voor deze validatietest blijkt dit voor elf verbruikers niet op te gaan. Twee van deze verbruikers kunnen slechts in één zone geplaatst worden, deze verbruikers worden hier niet beschouwd. Voor de resterende negen verbruikers wordt duidelijk dat deze aan de andere kant van het vliegtuig komen te staan als wordt gekeken naar de routeringen naar de verdelers die voor deze verbruikers wordt gekozen. We zien dat elk van deze routeringen in meer of mindere mate bijdragen aan verschuiven van het 'centre of gravity' naar de staart van het vliegtuig.

Een goed voorbeeld van een verbinding tussen verdeler en verbruiker waarbij het 'centre of gravity' wordt gemanipuleerd is de verbinding tussen verbruiker C11 die is geplaatst in zone 280 en verdeler D6 die is geplaatst in zone 270. Deze routing wordt achtereenvolgens langs de volgende zones geleid: 280 → 320 → 310 → 270. Het mag duidelijk zijn dat het leggen van deze zware aluminium kabel via de achterste zones van het vliegtuig een relatief groot effect heeft op de 'centre of gravity' van het totale gewicht in het vliegtuig. Van de negen verbruikers die aan een andere kant van het vliegtuig worden geplaatst als hun bijbehorende verdelers zijn er vijf verbruikers (C11, C12, C21, C24 en C25) waarbij de routing naar hun verdeler wordt geleid langs de zones 310 en 320 uit het vliegtuig.

De overige vier verbruikers dragen ook bij aan de verplaatsing van het 'centre of gravity'. De bijdragen van deze verbruikers (C10, C16, C23 en C26) zijn echter kleiner. Zo wordt voor de verbinding van de verbruiker C10, geplaatst in zone 260, naar de verdeler D6, geplaatst in zone



270, de volgende routing gekozen: 260 → 280 → 270 (route 1). Daarbij wordt niet gekozen voor routeringsindex 0 welke de route 260 → 250 → 270 bevat. Deze route draagt immers minder bij aan de verplaatsing van het 'centre of gravity'!

We concluderen dat door de combinatie van het verplaatsen van de verdelers en het veranderen van de kabelroutingen het 'centre of gravity' verschuift tot zeer dicht bij het gewenste 'centre of gravity'.

#### 4.2.3 Prestatieindicatoren

Met de prestatieindicatoren zoals opgesteld in paragraaf 2.5 proberen we de kwaliteit van een oplossing en de achterliggende oplossingsmethode te kwantificeren. Daartoe worden de indicatoren beoordeeld voor de drie validatietesten die in dit hoofdstuk zijn uitgevoerd. Voor de duidelijkheid nummeren we de validatietesten met 1, 2 en 3 waarbij test 1 de basisvalidatietest betreft en testen 2 en 3 respectievelijk de testen op verschuiving van het 'centre of gravity' middels doel en constraint.

De resultaten voor een aantal verschillende prestatieindicatoren voor de validatietesten kunnen als volgt in een tabel worden weergegeven:

*Tabel 4: een opsomming van een aantal prestatieindicatoren voor de validatietests*

Prestatieindicator	Test 1	Test 2	Test 3
Gewicht van de totale bekabeling (kg)	50.35	207.93	102.10
Gemiddelde kabelgewicht per zone (kg)	2.10	8.66	4.25
Volume van de totale bekabeling (mm <sup>3</sup> )	3609.49	15035.66	7095.32
Gemiddeld kabelvolume per zone (mm <sup>3</sup> )	150.40	626.49	295.64
Gerealiseerd 'centre of gravity'	24.85	22.92	25.55
Oplostijd (exclusief pre-processing)	17m 55s	17m 13s	17m 11s

De precieze waarden van de prestatieindicatoren zijn mogelijk niet-realistisch, omdat ze beïnvloed worden door enkele niet-realistische waarden voor eigenschappen van sommige objecten (zie paragraaf 4.2). Omdat er in de validatie getracht is vliegtuigmodellen op te stellen die de werkelijkheid benaderen geven de indicatoren ook een indicatie van de kwaliteit van de programmatuur die is ontwikkeld. Een aantal prestatieindicatoren dienen nader te worden toelicht:

- **Afstand van het massamiddelpunt van de bekabeling plus apparatuur tot het gewenste massamiddelpunt.** Dit item is uitvoerig geanalyseerd en getest in paragraaf 4.2.2.
- **Vermijdbare 'wrong side costs'.** Het plaatsen van de verbruikers aan een andere kant dan de verdelers waarop zij worden aangesloten is besproken in paragraaf 4.2.2.



- **Complexiteit parametrisering oplosmethode.** Deze complexiteit is zeer hoog. In paragraaf 4.2.2 is bijvoorbeeld te zien dat kleine veranderingen in enkele parameters van de optimalisatiecriteria grote veranderingen teweeg kunnen brengen in de oplossing. Daarbij bedenken we ons dat ook het opnemen van meerdere criteria in de doelfunctie en het instellen van de schalingsfactoren voor elk van deze criteria tot complexe keuzes kan leiden. Een "trial & error" strategie wordt te alle tijde aangeraden.
- **Garantie van de optimaliteit van de oplossing of een bandbreedte waarbinnen het optimum valt.** Zoals al eerder gesteld valt voor model I, het model dat is gebruikt in de validatie, geen garantie te geven voor de optimaliteit van de oplossing. Voor model II kan deze garantie wel worden geboden in de verificatietesten, dit model bleek echter niet geschikt voor grotere vliegtuigmodellen. Ook is er geen bandbreedte aan te geven waarbinnen het optimum komt te liggen, wel is er aan te geven dat de optimaliteit van de oplossing in het gebruikte model sterk afhangt van het aantal kortste routeringen dat in de pre-processing van dit model wordt berekend (S). Als er voor de routeringen in een oplossing routes worden gekozen die de langste afstand hebben uit alle routes die voortkwamen uit de pre-processing kan dit wijzen op een te klein gekozen S. Het is dan waarschijnlijk dat de oplossing niet optimaal is. Daarentegen alleen de kortste routes worden gekozen die voortkwamen uit de pre-processing mag niet worden geconcludeerd dat de optimale oplossing is gevonden, het is dan ook slechts zeer waarschijnlijk dat er geen betere oplossingen bestaan.
- **(Reken)snelheid van de uitvoering van de optimalisatie.** Voor het uitvoeren van test 1 was een oplostijd van in totaal 24 minuten en 42 seconden nodig. Daarvan was 6m 47s nodig voor de pre-processing. In totaal was er dus 17m 55s nodig voor de daadwerkelijke optimalisatie. Voor de testen 2 en 3 was dit respectievelijk 17m 13s en 17m 11s. Er is dus sprake van een zeer stabiel verloop van deze tijden. In het algemeen blijkt echter dat de correlatie tussen de grootte van het probleem (uitgedrukt in het aantal beslissingsvariabelen) en de oplostijd voor het EPS systeem niet aanwezig blijkt te zijn, zie paragraaf 4.1.3. De tijd die nodig is voor de pre-processing kan wel goed voorspeld worden. In de pre-processing wordt voor elke kabelverbinding tussen objecten een aantal optimale routes (S) berekend. Voor de validatietesten zijn dit bijvoorbeeld 5070 routes. Aangezien dit kleine lineaire problemen zijn met een zelfde structuur kan de benodigde tijd voor de pre-processing wel goed voorspeld worden.
- **Aantal constraints die worden gebroken in de oplossing. Eventueel met een weging van de praktische implicaties daarvan.** Als een constraint wordt gebroken produceert het programma geen oplossing, slechts een melding met een indicatie waarvoor het probleem niet oplosbaar was. Het enige punt dat hier kan worden aangemerkt is de gebrekkige implementatie van het vermogensverlies op de kabels tussen de verdelers en de generatoren. Er wordt benadrukt dat de kabelkeuze voor deze verbindingen wel juist is maar dat de



bepanking op het maximale vermogensverlies in elke zone niet correct wordt berekend (zie ook paragraaf 2.6 en hoofstuk 3).



## 5 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk geven we een samenvatting en de conclusies die volgen uit de stage "Optimalisatie van de bekabeling van het *Electrical Power System*". Daarnaast worden enkele aanbevelingen gegeven voor vervolgonderzoek naar dit complexe optimaliseringsprobleem.

### 5.1 Samenvatting en conclusies

In de stage is een groot deel van het optimaliseringsprobleem dat voortkomt uit het EPS systeem opgelost. Na de beschrijving en afbakening van het EPS systeem zijn een dertiental optimalisatiecriteria geëxtraheerd. Deze criteria tezamen beschrijven de kern van het probleem dat voorkomt uit het EPS systeem.

Na een beschrijving van het EPS systeem is een modellering gemaakt voor het optimalisatieprobleem dat dit systeem met zich mee brengt. Het optimalisatieprobleem bestaat uit twee, onderling afhankelijke, delen:

1. Het plaatsen van elk object (generator, verdeler of verbruiker van stroom) in een zone van het vliegtuigmodel.
2. Het routeren van de stroomkabels die deze objecten met elkaar moeten verbinden.

Om tot optimalisatie over te gaan moet eerst het probleem wiskundig geformuleerd worden. Dit leidde tot een tweetal modellen. Daarbij is gekozen voor een model dat, gegeven de veronderstellingen, gegarandeerd de optimale oplossing vindt en voor een ander model dat deze optimale oplossing zeer goed benadert. De modellen zijn beide geheeltallige lineaire programmeringsproblemen, echter de complexiteit van de twee modellen verschilt sterk. Het model dat de garantie van een optimale oplossing geeft bleek later daardoor onbruikbaar voor grote EPS problemen.

Beide modellen zijn geïmplementeerd in een programma genaamd "epsopt". De gebruikers van dit programma worden doorverwezen naar de gebruikershandleiding in [15]. De correcte werking van de programmatuur is vóór daadwerkelijk gebruik eerst aangetoond door middel van verificatie- en validatietesten. In de verificatie zijn daarvoor de vergelijkingen tussen de twee opgestelde modellen en het rekenmodel gebruikt. De resultaten van deze drie onafhankelijke modellen kloppen exact met elkaar. Het model dat de optimale oplossing garandeert bleek teveel computergeheugen te vereisen om grotere EPS problemen op te lossen.



In de validatie is aangetoond dat de programmatuur ook goede resultaten produceert voor grotere EPS problemen. Er worden een drietal EPS problemen geformuleerd die de (bekabelings)realiteit benaderen. De uitkomsten zijn betrouwbaar. De conclusie is dat de programmatuur correct functioneert, ook voor realistische vliegtuigmodellen.

Naast het correct functioneren biedt de programmatuur veel instellingen om de optimalisatie te beïnvloeden. De opmaak van een vliegtuigmodel dient te gebeuren in MatLab en is object-georiënteerd. Daarbij volgt de programmatuur de opmaak uit het bestaande rekenmodel, aangevuld met een aantal extra instellingen. Dit laat aan de gebruiker een ruime keus in het opstellen van vliegtuigmodellen.

## 5.2 Aanbevelingen

Na het einde van deze stage zijn er nog aantal punten die kunnen worden verbeterd aan de huidige programmatuur en blijven een aantal problemen open staan voor verder onderzoek. Er wordt getracht hier een kort overzicht te geven van deze punten

- Het rekenmodel en de programmatuur die is opgeleverd in de stage kunnen beter met elkaar geïntegreerd worden. Er bestaan momenteel een aantal eigenschappen voor de optimalisatie van het EPS systeem die niet zijn gedefinieerd in het rekenmodel, zie de gebruikershandleiding van epsopt voor de technische details [15]. Deze integratie zal het gebruik van de EPS optimalisatie- en reken-programmatuur een stuk makkelijker maken voor eindgebruikers.
- De programmatuur kan gevalideerd worden met realistischere zoneringen en objectgegevens. Zoals reeds opgemerkt in hoofdstuk 4.2 is het niet gelukt om in deze stage een realistisch vliegtuigmodel te construeren, dit vereist simpelweg te veel vliegtuigexpertise. Het formuleren van een realistisch vliegtuig kan bijzonder nuttig zijn voor een verdere validatie, er kan dan een vergelijking worden gemaakt met de bekabelingsrealiteit in vliegtuigen tegenwoordig. Wellicht kan dit aan de ene kant leiden tot de wens naar meer of andere optimalisatiecriteria in de programmatuur, zoals bijvoorbeeld het toevoegen van een 'centre of gravity' in de breedterichting (y-as) van het vliegtuig. We merken op dat vooralsnog de programmatuur voldoet aan de vooraf opgestelde functionaliteit. Aan de andere kant kan het toetsen van de programmatuur met de praktijk meer inzicht leveren voor het beter oplossen van EPS problemen.
- Het volledig implementeren van de vermogensverliezen per zone op de kabel van de verdelers naar de generatoren (zie paragrafen 2.6 en 3.1.1). Dit punt kan lastig zijn omdat er een geheeltallig kwadratisch programmeringsprobleem ontstaat. Dat dit het geval is kan gemakkelijk worden ingezien door op te merken dat om het vermogensverlies te bepalen in het model de stroomsterkte in de verdeler gekwadrateerd moet worden waarbij deze



stroomsterkte afhankelijk is van de lengte van de bekabeling van de verdelers naar de verbruikers (waarbij de routing tussen deze objecten een beslissing is in het model).

- Omdat voor grotere problemen model I (zie paragraaf 3.1.1) zal worden ingezet wordt de keuze van de waarde  $S$ , gebruikt voor het pre-processen van de  $S$  beste routingens die per verbinding worden uitgerekend, steeds belangrijker. Voor alle testen die zijn bekeken in dit verslag is uitgegaan van  $S = 5$ . We merken op dat voor slechts één validatietest deze keuze bezwaarlijk leek. Daarbij moet worden aangemerkt dat de toegepaste strategie, het minimaliseren van 'centre of gravity' tegen elke prijs, wellicht niet realistisch is. Mocht met de programmatuur toch dit type testen worden uitgevoerd dan is een verdere analyse naar een juiste waarde voor  $S$  aan te raden.





## 6 Referenties

- [1] Eppstein, D. (1997). Finding the  $k$  Shortest Paths. Proceedings of the 35th Symposium Foundations of Computer Science, IEEE, pp.154-165.
- [2] Faasse, P.R. (2002). User documentation of the POA matlab model. Internal document.
- [3] Faasse, P.R. (2002). Object model description of the Power Optimized Aircraft simulation model. Internal document.
- [4] Fourer, F. (2000). Non-Linear Programming FAQ, Optimization Technology Center of Northwestern University and Argonne National Laboratory. URL: <http://www-unix.mcs.anl.gov/otc/Guide/faq/nonlinear-programming-faq.html>
- [5] Harbison, S.P., Steele, G.L. jr. (1995). C – a reference manual. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [6] Hershberger, J., Maxel. M. en Suri, S. (2003). Finding the  $k$  Shortest Simple Paths: A new algorithm and its implementation. Proceedings of the 5th Workshop on Algorithm Engineering & Experiments (ALENEX), SIAM.
- [7] IBM Rational. Rational PurifyPlus Linux & UNIX Eval Assembly 2003a.06.12. Evaluatie versie.
- [8] IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology (1983), IEEE Std 829.
- [9] ILOG Cplex 8.1 en ILOG Concert Technology 1.3 documentation home page (2003). URL: <http://www.cplex.com>
- [10] Kloske, D.A. en Smith, R.E. (1994). Bulk cable routing using genetic algorithms, TCGA Report No. 94001, The clearinghouse for Genetic Algorithms, University of Alabama.
- [11] Ridder, A. (2001). Syllabus Mathematische Programmering, VU huisdrukkerij.
- [12] Seward, J., Nethercote, N., Fitzhardinge, J. (2003). Valgrind stable release 2.0.0. URL: <http://gemini.pds.twi.tudelft.nl/usrlcaldoc/valgrind/>.
- [13] Stroustrup, B. (1997). The C++ programming language. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- [14] Tijms, H.C. en Kalvelagen, E.M.F. (1994). Modelbouw in de operations research. Academic Service, Schoonhoven.
- [15] Visser. M.J.A. (2004). Gebruikershandleiding epsopt. NLR memorandum AVCE-2004-027.
- [16] Visser, M.J.A. (2004). Optimalisatie van de bekabeling van het *Electrical Power System*. NLR memorandum AVCE-2004-026.
- [17] Vliet, H. van (1996), Software Engineering – principles and practice, John Wiley & Sons ltd, West Sussex, England.
- [18] Vygen, J. (1998). Algorithms for Detailed Placement of Standard Cells, proceedings of the Special Interface Group on Design Automation (SIGDA), Design, Automation and Test (DATE), IEEE, pp. 321.



- [19] Waal, P. de (2003). Optimisation problem for EPS model version 1.1, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam.
- [20] Wegkamp, E.J.A. (2002). Feasibility study Power Optimised Aircraft – Electrical Power System Model, Issue 1, NLR-CR-2002-344.
- [21] Wijk, R. van. (2003). Optimalisatie bekabeling EPS model. NLR memorandum AVCE-2003-020.
- [22] Wolsey, L.A.(1998). Integer and programming. John Wiley & Sons, Inc.