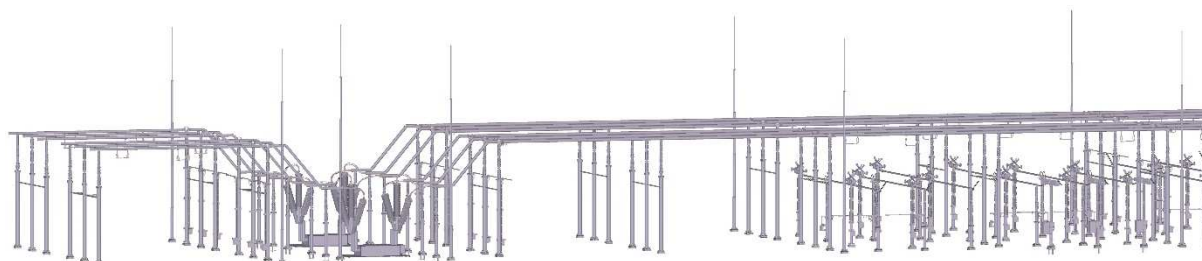

Systematisch stroomlijnen

Systematisch ontwerpen op het gebied van hoogspanning



Auteur	Bas van Beek & David Strube
Datum	29 mei 2018
Status	definitief
Versie	1.0

Algemene informatie

Afstudeerproject

Systematisch stroomlijnen

Afstudeerbedrijf

Bedrijf: Petersburg Consultants B.V.
Gevestigd te: Doorwerth

Bedrijfsbegeleider

Naam: Allard Keizer
E-mail: a.keizer@petersburg.nl
Telefoon: 06-53413240

Projectteam

Naam: Bas van Beek
Studentennummer: 555099
Afstudeerrichting: Constructie
E-mail: b.vanbeek1@student.han.nl
B.vanbeek@petersburg.nl
Telefoon: 06-42322021

Naam: David Strube
Studentennummer: 548154
Afstudeerrichting: Constructie
E-mail: DL.Strube@student.han.nl
D.strube@petersburg.nl
Telefoon: 06-23101692

Afstudeerbegeleiders HAN

Eerste begeleider

Naam: Kees van der Zijden
E-mail: K.vdzijden@han.nl

Tweede begeleider

Naam: Jaap Rikken
E-mail: Jaap.Rikken@han.nl

Datum	Versie	Opmerkingen	Auteur
01-05-2018	0.1	Concept	Bas van Beek & David Strube
22-05-2018	0.2	Opmerkingen verwerkt en gecontroleerd op grammatica, spelling en zinsopbouw. Concept	Bas van Beek & David Strube
29-05-2018	1.0	Definitief	Bas van Beek & David Strube

Voorwoord

Voor u ligt de scriptie 'systematisch stroomlijnen'. Dit is het eindresultaat van een onderzoek naar een manier om het ontwerpproces bij Petersburg Consultants B.V. te optimaliseren. Deze scriptie is geschreven in het kader van ons afstuderen aan de opleiding Civiele techniek aan de HAN in Arnhem en in opdracht van Petersburg Consultants B.V. We zijn hier februari 2018 begonnen met het onderzoek en hebben het eind mei 2018 afgerond.

Met de hulp van onze begeleiders van de HAN, Kees van der Zijden en Jaap Rikken, en onze begeleiders van het bedrijf, Allard Keizer en Erik Groot, hebben wij dit onderzoek tot een succesvol einde kunnen brengen. Tijdens de assistenties hebben we altijd waardevolle feedback en tips gehad en we konden altijd bij onze begeleiders terecht met vragen.

Bij dezen willen wij graag onze begeleiders bedanken. Zij hebben ons alle vier goed begeleid en gemotiveerd. Soms hadden we iemand nodig om mee te sparren om onze ideeën een richting op te sturen, en dat hebben deze vier begeleiders met veel genoegen en plezier gedaan. Ook willen wij onze collega's van Petersburg Consultants B.V. bedanken die ons hebben geholpen tijdens het onderzoek. Door middel van interviews en evaluatie sessies hebben zij ons verder geholpen. Verschillende constructeurs en ingenieurs hebben met ons mee gedacht over nuttige invullingen van het afstudeeronderzoek.

In onze ogen moet het onderzoek een raamwerk bieden voor toekomstige standaardiseringen die Petersburg Consultants B.V. in de hoogspanning wil gaan maken. Onze visie is dat de bouwwerken in de toekomst allemaal in 3D ontworpen zullen worden waarbij er niet alleen gebruik wordt gemaakt van 3D visualisatie binnen modellen, maar ook voor het rekenen en inpassen in 3D omgevingen. Dergelijke modellen gaan steeds meer oplossingen bieden, en zullen bijdragen aan de haalbaarheidsstudies en ontwerpen van dergelijke projecten. De modellen zullen steeds hanteerbaarder worden, omdat de software steeds meer voor mensen doet. Deze ontwikkelingen zijn niet tegen te houden maar het is wel zaak om de ontwikkelingen in goede banen te leiden. Dit onderzoek probeert dit te doen door, het verifiëren van de middelen die hier ontwikkeld zijn door kennis van boeken en constructeurs te raadplegen. Wellicht is dit afstudeeronderzoek een inspiratie voor meer bedrijven om modellen slimmer te maken.

Wij wensen u veel leesplezier.

Bas van Beek en David Strube

Doorwerth, 29 mei 2018.

Samenvatting

Begin 2017 heeft Petersburg Consultants B.V. besloten om van AutoCAD over te stappen naar 3D modelleren en BIM-software (Tekla Structures) met het idee om efficiënter te kunnen ontwerpen door modellen uit te wisselen tussen Tekla en verschillende rekenprogramma's. Hiernaast was het de bedoeling om het te gebruiken bij de communicatie met andere partijen. Door een drukke periode en te weinig ervaring met de software is er echter nog weinig gebruik gemaakt van het potentieel dat Tekla Structures aan de gebruikers biedt. Tekla Structures wordt nog gebruikt als een tekenpakket en er worden geen modellen uitgewisseld tussen Tekla Structures en bijvoorbeeld het rekenprogramma RFEM. Tekla Structures biedt ook de mogelijkheid om parametrische componenten te maken, zodat er sneller gemodelleerd kan worden. Hier is echter nog geen gebruik van gemaakt. Een aanpassing aanbrengen in een component kost daarom veel moeite en tijd.

Het doel van dit onderzoek is om het ontwerpproces van hoogspanningsstations te optimaliseren door informatiestromen te automatiseren en te optimaliseren. Het ideaalbeeld is dat de verschillende informatiestromen die voortkomen uit het ontwerpproces automatisch uitgewisseld kunnen worden. De parameters voor zowel de teken- als rekenmodellen moeten uit een centrale informatiebank worden gehaald. Hiermee wordt het ontwerpproces minder foutgevoelig en komen alle modellen overeen.

Aan de hand van deze probleemstelling is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: "Op welke manier kan het ontwerpproces van een hoogspanningsstation geautomatiseerd en geoptimaliseerd worden?"

In dit onderzoek is kwalitatief onderzoek gedaan naar het ontwerpproces van een hoogspanningsstation, omdat Petersburg Consultants B.V. het afgelopen jaar een groot project voor de uitbreiding van een hoogspanningsstation heeft gedaan en er de komende jaren meerdere vergelijkbare projecten uitgevoerd zullen worden.

Ter ondersteuning van het beantwoorden van de onderzoeksvraag zijn vier vooronderzoeken uitgevoerd. Er is een algemeen literatuuronderzoek gedaan naar de opbouw van het Nederlandse hoogspanningsnet en van hoogspanningsstations en wat de eisen zijn voor het ontwerpen van een hoogspanningsstation en zijn specifieke componenten. Om de problemen in het ontwerpproces in kaart te brengen zijn interviews met de civiele ingenieurs en constructeurs van het bedrijf gehouden. Ook is er onderzoek gedaan naar de termen BIM en parametrisch ontwerpen, zodat duidelijk is wat deze begrippen betekenen en er geen verwarring kan ontstaan bij het gebruik van deze begrippen. Als laatste is er onderzocht wat de mogelijkheden zijn die de softwarepakketten bieden die Petersburg Consultants B.V. in huis heeft. Ook is er gekeken naar alternatieven voor deze softwarepakketten om vast te stellen of andere softwarepakketten misschien toereikender zijn.

Uit de vooronderzoeken is gebleken dat er bij het personeel van Petersburg Consultants B.V. de behoefte is om snel modellen uit te kunnen wisselen om dubbel werk te voorkomen. Ook bleek dat er behoefte is om snel belastingen te kunnen bepalen en deze in de rekenmodellen te plaatsen.

Aan de hand van de conclusies uit het vooronderzoek is een op maat gemaakte oplossing voor Petersburg Consultants B.V. ontwikkeld door de afstudeerders.

Tegen het einde van het onderzoek is er een evaluatie gehouden onder het personeel. Hierbij zijn de tools die voor Petersburg Consultants B.V. zijn ontwikkeld gedemonstreerd en heeft het personeel de kans gekregen om hun mening te geven. Hier is uit gebleken dat het personeel veel waarde en potentie ziet in deze tools en dat de benodigde tijd om teken- en rekenmodellen op te stellen zelfs gehalveerd zou kunnen worden. De tools moeten nog wel verder doorontwikkeld worden, maar Petersburg Consultants B.V. heeft de intentie om deze tools in de toekomst te gaan gebruiken.

Abstract

At the start of 2017 Petersburg Consultants B.V. decided to step over from AutoCAD to 3D modeling- and BIM-software (Tekla Structures) to be able to design faster with the ability to exchange models between Tekla Structures and an array of calculation software. Besides, this it was with the intention to use it for communication with other parties. However, due to a busy period and not enough experience with the software, the potential that Tekla Structures has, hasn't been fully utilized. Tekla Structures is still being used as CAD software and the ability to exchange models between different software packages isn't used. Tekla Structures also offers the possibility to create parametric components, which speeds up the process of modeling, however this also hasn't been utilized yet. Due to this, making an adjustment in a component costs a lot of time and effort.

The goal of this research is to optimize the design process of high voltage stations by automating the flow of data. The ideal result is that the different data flows that originate from the design process will be able to exchange automatically. Furthermore, all parameters which are used to generate the design models and calculation models should originate from one central data bank to reduce the error sensitivity of the design process.

Based on this issue the following main question has been formulated: "In which manner can the design process of a high-voltage station be optimized and automated?" In this thesis the design process of a high voltage station has been investigated, because Petersburg Consultants B.V. engineered an extensive project for the expansion of a high voltage station and because there will be more comparable projects in the foreseeable future.

To be able to answer the main question of this thesis, there have been done four preliminary researches. The first preliminary research is a literature review of the structure of the Dutch high-voltage grid and the corresponding High-voltage stations, what the requirements are for designing a high-voltage station and the specific high-voltage components. The second preliminary research is to determine the problems that occur in the design process. To achieve an overview of the design process interviews have been held with the engineers of the company. There has also been preliminary research to define the terms BIM and parametric design to make clear what these concepts mean and that there can't arise confusion when these concepts are used. The last preliminary research is to determine the potential the software packages offer that Petersburg Consultants uses and if there is better software out there.

It turned out that the engineers of Petersburg Consultants would like to have the ability to be able to quickly exchange models to prevent having to do double work. It also turned out that there is a need to be able to quickly determine forces and put them into the calculation models. Based on the conclusions from the preliminary researches a tailored solution has been developed for Petersburg Consultants B.V.

Near the conclusion of the research project there has been an evaluation session with the staff of Petersburg Consultants B.V. In this session, the tools that were tailor-made for Petersburg Consultants have been demonstrated. The staff has also gotten the chance to give their opinion on the tools. The staff thinks that these tools have a lot of value and potential, they also think that the needed time for making drawing and calculation models could be halved when using these tools. The tools need a lot of further development, but Petersburg Consultants B.V. has the intention to use these tools in the foreseeable future.

Inhoud

Algemene informatie.....	1
Voorwoord.....	3
Samenvatting	4
Abstract.....	5
Afkortingenlijst	9
Begrippenlijst.....	10
1. Inleiding	11
1.1 Aanleiding.....	11
1.2 Leeswijzer	11
2. Probleemanalyse	12
2.1 Doelstelling	12
2.2 Scope.....	12
2.3 Onderzoeksvraag	12
2.4 Deelvragen.....	13
3. Onderzoeksmethode	14
3.1 Literatuurstudie	14
3.1.1 Civiele en elektrotechnische achtergronden.....	14
3.1.2 Softwarepakketten	14
3.1.3 BIM & parametrisch ontwerpen.....	14
3.2 Interviews	15
3.2.1 Ontwerpproces	15
3.3 Praktisch onderzoek.....	15
3.3.1 Proof of concept	15
4. Vooronderzoeken	16
4.1 Civiel- en elektrotechnische achtergronden	16
4.1.1 Het hoogspanningsnet.....	16
4.1.2 Hoogspanningsstations en de belangrijkste componenten.....	17
4.1.3 De steunisolator en de pantograafscheider	17
4.1.4 Materiaaleigenschappen.....	17
4.1.5 Bezwijkmechanismen	17
4.1.6 Krachten ten gevolge van kortsluiting	18
4.1.7 Uitgangspunten voor de berekeningen	18
4.2 Ontwerpproces	18
4.2.1 Hoe zit het ontwerpproces van een hoogspanningsstation en een hoogspanningscomponent in elkaar?	19

4.2.2	Wat wil het personeel van Petersburg Consultants B.V. verbeterd zien aan het ontwerpproces?	19
4.3	Softwarepakketten	19
4.4	BIM & parametrisch ontwerpen.....	21
4.5	Proof of concept.....	21
5.	Systematisch ontwerpen& het ontwerpproces	23
5.1	Genereren en koppelen van een reken- en tekenmodel	24
5.2	Een parametrische component maken in Tekla	29
5.3	RFEM	30
5.4	Optimalisatie berekeningen	31
6.	Validatie van de rekentools	34
6.1	Belastingen	34
6.1.1	Eigen gewicht	34
6.1.2	Wind- en ijsbelasting	35
6.1.3	Kortsluiting	36
6.2	Ondersteuningsconstructie voor een steunisolator	36
6.2.1	Uitgangspunten	36
6.2.2	Belastingcombinaties.....	37
6.2.3	Resultaten van de handberekening	38
6.2.4	Conclusie	38
6.3	Ondersteuningsconstructie voor een pantograafscheider	39
6.3.1	Uitgangspunten	39
6.3.2	Belastingcombinaties.....	40
6.3.3	Resultaten van de handberekening	40
6.4	RFEM-rekenmodel	41
6.4.1	Ondersteuningsconstructie steunisolator.....	41
6.4.2	Ondersteuningsconstructie pantograafscheider.....	42
6.5	Validatie van de berekeningen	43
7.	Koppelingen	44
7.1	Tekla Structures – RFEM	44
7.2	Tekla Structures – IDEA Statica/RFEM – IDEA Statica	44
7.3	Excel – RFEM.....	45
8.	Evaluatie	46
8.1	Opzet van de evaluatiesessies	46
8.2	Evaluatie van de tekentools.....	46
8.3	Evaluatie van de rekentools.....	47

9. Conclusie.....	48
10. Aanbevelingen.....	49
Bibliografie	50
11. Bijlagen.....	52
Bijlage A Vooronderzoeken.....	52
Bijlage A-1 Civiele en elektrotechnische achtergronden.....	52
Bijlage A-2 Ontwerpproces	52
Bijlage A-3 Softwarepakketten	52
Bijlage A-4 BIM & Parametrisch ontwerpen	52
Bijlage B Ontwerpproces in grote lijnen	52
Bijlage C Handleiding Schematisch Modelleren	52
Bijlage D Belastingen bepalen	52
Bijlage D-1 Rapportage.....	52
Bijlage D-2 Spreadsheets	52
Bijlage E Controleberekening steunisolator	52
Bijlage E-1 Verslag	52
Bijlage E-2 Spreadsheet	52
Bijlage E-3 Tekeningen	52
Bijlage E-4 RFEM toetsing.....	52
Bijlage F Controleberekening pantograafscheider	52
Bijlage F-1 RFEM toetsing.....	52
Bijlage F-2 Verslag	52
Bijlage F-3 Spreadsheet	52
Bijlage G Handleiding parametrisch ontwerpen.....	52
Bijlage H Evaluatie	52
Bijlage H-1 Verslag.....	52
Bijlage H-2 Evaluatieformulieren	52
Bijlage H-3 Inge vulde evaluatieformulieren.....	52
Bijlage I Procesverslag	52

Afkortingenlijst

AC
BIM
DC
HVDC
kV
DO
UO
VO

Wisselstroom
Building Information Modelling
Direct current of gelijkstroom
High voltage direct current
Kilovolt
Definitief ontwerp
Uitvoeringsontwerp
Voorontwerp

Begrippenlijst

Building Information Modelling	Een werkmethode waarmee informatie aan een ontwerp vastgemaakt wordt en waarbij een model met meerdere partijen gedeeld en tegelijk bewerkt kan worden.
Component (Tekla)	Een blok bestaande uit verschillende onderdelen (vergelijkbaar met een Autocad block).
Component (hoogspanning)	Een onderdeel op een hoogspanningsstation, bijvoorbeeld een steunisolator.
Hoofdrail	Een stroom voerende buis of kabel op een hoogspanningsstation die de velden met elkaar verbindt.
Hoogspanningsstation	Een knooppunt in het elektriciteitsnet.
IDEA StatiCa	Een rekenprogramma waarmee verbindingdetails berekend kunnen worden.
Klapaarder	Een mechanisch hoogspanningsonderdeel dat een stroom voerende rail kan aarden wanneer spanningsloosheid is vereist.
Ondersteuningsconstructie	Een op maat gemaakte constructie waar de verschillende hoogspanningsonderdelen van een hoogspanningsstation op staan.
Pantograafscheider	Een mechanisch hoogspanningsonderdeel dat een veldrail met een hoofdrail verbindt, deze kan losgekoppeld worden als spanningsloosheid in een veld is vereist.
RFEM	Een eindig elementenprogramma waarmee constructies berekend kunnen worden.
Rhinoceros/Grasshopper	Een algoritmisch 3D ontwerpprogramma gebaseerd op visueel programmeren.
Spanningsloos	Wanneer er geen stroom door een doorgaans stroom voerend onderdeel loopt.
Steunisolator	Een hoogspanningsonderdeel waarmee stroom voerende rails in de open lucht van niet stroom voerende onderdelen gescheiden worden.
Tekla Structures	Een 3D modelleerprogramma met BIM-elementen
TenneT	De grootste netbeheerder van Nederland en tevens een van de belangrijkste opdrachtgevers van Petersburg Consultants B.V.
Veldrail	Een stroom voerende buis of kabel op een hoogspanningsstation die op een veld loopt (vergelijkbaar met de hoofdrail)
Galapagos	Een tool in Grasshopper om antwoorden te vinden voor berekeningen door middel van wiskundige strategieën.
Script	Een uitgeschreven handeling waarmee de computer een taak uitvoert.
Boolean	Een datatype wat waar (True) of niet waar (False) kan zijn.

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Het hoogspanningsnet vormt een onmisbaar onderdeel van de Europese infrastructuur. De belangrijkste functie hiervan is het efficiënt transporteren van elektrische energie van de producent naar de afnemer. In het hoogspanningsnet bevinden zich sub-netten met verschillende netspanningen. Om deze netten met elkaar te verbinden zijn er hoogspanningsstations opgenomen in het hoogspanningsnet. Een voorbeeld hiervan is station Borssele.

Onlangs heeft Petersburg Consultants B.V. het engineeringwerk voor de uitbreiding van dit hoogspanningsstation uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt van ontwerp- en rekensoftware, namelijk Tekla Structures en RFEM. Deze softwarepakketten zijn recent aangeschaft met de achterliggende gedachte om sneller te kunnen ontwerpen dan met Autocad. Tijdens het project bleek dat er nog veel moet gebeuren om optimaal gebruik te kunnen maken van deze software. Er wordt veel handmatig getekend in Tekla Structures. Er wordt wel gebruik gemaakt van componenten, maar deze zijn niet parametrisch. Als er een kleine aanpassing aan het onderdeel gedaan moet worden, kost dit veel tijd en moeite. Verder bestaat de mogelijkheid om modellen tussen Tekla Structures en RFEM uit te wisselen, maar hier wordt geen gebruik van gemaakt.

Er is wel onderzoek gedaan naar deze link, maar hieruit bleek dat het veel werk is om de link tussen Tekla Structures en RFEM op te zetten. Doordat er geen gebruik wordt gemaakt van de mogelijkheid om modellen tussen Tekla Structures en RFEM uit te wisselen, wordt er nu dubbel werk gedaan. Het model wordt namelijk zowel in Tekla Structures als in RFEM gemaakt. Petersburg Consultants B.V. heeft gevraagd of er de mogelijkheid bestaat om het ontwerpproces te optimaliseren en op welke manier dit het beste kan.

1.2 Leeswijzer

- In hoofdstuk 2 zal de doelstelling van het project worden geformuleerd op basis van de aanleiding en de probleemstelling die in dit hoofdstuk zijn benoemd. Hiernaast worden de scope, de onderzoeksvraag en de deelvragen behandeld.
- In hoofdstuk 3 zullen de onderzoeksmethoden die tijdens het afstudeerproject zijn gehanteerd worden toegelicht.
- In hoofdstuk 4 zullen de vooronderzoeken worden behandeld. Er zal hier ingegaan worden op de onderwerpen die in de vooronderzoeken zijn onderzocht en welke uitgangspunten hieruit zijn voortgekomen.
- Hoofdstuk 5 gaat over het systematisch ontwerpen en automatisch genereren van de teken- en rekenmodellen gebruik makend van Grasshopper, Tekla en RFEM. Na dit onderdeel wordt ingegaan op hoe een berekening automatisch kan worden geoptimaliseerd.
- In hoofdstuk 6 wordt de toetsing van twee ondersteuningsconstructies doorgenomen. De ondersteuningen zijn zowel met een handberekening als met behulp van RFEM getoetst.
- In hoofdstuk 7 worden de koppelingen voor het uitwisselen van modellen tussen verschillende softwarepakketten behandeld.
- In hoofdstuk 8 wordt aan de hand van een evaluatie gekeken naar de bruikbaarheid van de tool en of het personeel enthousiast is om de tool ook daadwerkelijk te gaan gebruiken.
- In hoofdstuk 9 wordt een conclusie getrokken uit de verzamelde resultaten.
- Ten slotte worden er in hoofdstuk 10 aanbevelingen gedaan.

2. Probleemanalyse

2.1 Doelstelling

Het doel van het afstudeerproject is om het ontwerpproces van hoogspanningsstations te optimaliseren door informatiestromen te automatiseren. Het ideaalbeeld is dat de verschillende informatiestromen die voortkomen uit het ontwerpproces automatisch uitgewisseld kunnen worden.

2.2 Scope

- Er is onderzoek gedaan naar een enkel type hoogspanningsstation, het betreft een openluchtstation voor 380 kV met 2500 A voor de transformator- en generatorvelden, 8000 A voor het railsysteem, 4000 A voor het dwarskoppelveld en 5000 A voor de langskoppelvelden. Verdere uitleg over dit onderwerp is te vinden in bijlage A "Civiele en elektrotechnische achtergronden".
- Alle relevante bezwijkmechanismen van de ondersteuningsconstructies zijn meegenomen in het ontwerp.
- Binnen de parametrische ontwerpen van de componenten zijn optimalisatiestappen ingebouwd. Deze stappen genereren feedback om ontwerpbeslissingen te maken.
- Tijdens het onderzoek is geen nadruk gelegd op het leren van programmeertalen om zo de gewenste doelen te behalen. In plaats van het gebruik van complexe programmeertalen is een "visual programming" programma "Grasshopper" gekozen. Met deze stap is al het ICT werk uit handen genomen.
- In dit onderzoek is de nadruk gelegd op berekeningen omtrent de ondersteuning van de hoogspanningscomponenten. De berekening in combinatie met de functionaliteiten die Tekla heeft om het gekozen ontwerp te visualiseren is de focus van het onderzoek. Bij het visuele onderdeel hoort hoofdzakelijk het 3D-model en niet bestellijsten en tekeningen die van dit 3D-model kunnen worden gegenereerd.
- Detailberekeningen zijn in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten, wegens het beschikbare tijdsbestek. Wel is er onderzoek gedaan naar bestaande koppelingen tussen teken- en rekensoftware waarmee dergelijke berekeningen wel gedaan kunnen worden. Overigens moeten deze koppelingen niet verward worden met het hoofdmodel in Grasshopper dat output levert aan Tekla structures en RFEM. Deze modellen zijn handgemaakt en maken geen deel uit van de directe al bestaande koppeling tussen Tekla en RFEM.
- Grondmechanica is in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten, omdat de nadruk is gelegd bij het uitwerken van de stalen onderdelen van de hoogspanningscomponenten. Wel zijn de afstudeerders zich bewust van het feit dat de grondslag een effect heeft op de rotatie van de fundering. De grondmechanica is een complex onderdeel dat een losstaand onderzoek verdient.

2.3 Onderzoeksvraag

Voor het afstudeerproject is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: "Op welke manier kan het ontwerpproces van een hoogspanningsstation geautomatiseerd en (al of niet) geoptimaliseerd worden?"

2.4 Deelvragen

Ter ondersteuning van het onderzoek is een aantal deelvragen opgesteld. Deze zullen in het rapport beantwoord worden.

- Hoe zit het ontwerpproces van een hoogspanningsstation en een hoogspanningscomponent in elkaar?
- Wat wil het personeel van Petersburg Consultants B.V. verbeterd zien aan het ontwerpproces?
- Welke eisen spelen een rol bij het inpassen van de componenten bij een hoogspanningsstation?
- Wat zijn de materiaaleigenschappen die mee moeten worden genomen in de parameters voor de ontwerptool?
- Welke bezwijkmechanismen spelen een rol op de hoogspanningscomponenten?
- Uit welke onderdelen bestaan de hoogspanningscomponenten?
- Is de software van Petersburg Consultants B.V. toereikend genoeg om de doelen te realiseren?
- Welke andere programma's kunnen er gebruikt worden om dezelfde doelen te bereiken en werken deze beter?
- Wat is de definitie van BIM, en hoe past dit binnen dit afstudeerproject?
- Wat is de definitie van parametrisch ontwerpen, en hoe past dit binnen dit afstudeerproject?

3. Onderzoeksmethode

Tijdens dit afstudeeronderzoek is gebruik gemaakt van een aantal verschillende onderzoeksmethoden. Het is belangrijk om deze methoden duidelijk toe te lichten, zodat het aantoonbaar is dat er goed en betrouwbaar onderzoek is verricht. Voor toelichting over de gebruikte onderzoeksmethoden kan het document PVA afstudeerproject V1.0 worden gelezen. Tijdens de start van dit onderzoek is besloten welke onderzoeksmethoden gebruikt gaan worden. Hoofdzakelijk waren dit literatuurstudies, interviews en casestudies.

3.1 Literatuurstudie

De literatuurstudies beslaan het grootste deel van de vooronderzoeken. Het doel van de vooronderzoeken is hoofdzakelijk om overzicht op de factoren die een rol spelen bij het toetsen van hoogspanningsconstructies te krijgen. Ook wordt onderzocht wat de huidige staat van de software en programmatuur is. Verder wordt een apart onderzoek verricht naar de betekenis van de termen BIM en parametrisch ontwerpen.

3.1.1 Civiele en elektrotechnische achtergronden

Voor het vooronderzoek civiele en elektrotechnische achtergronden is een literatuuronderzoek uitgevoerd. Er is gebruik gemaakt van boeken en websites. Het vooronderzoek is uitgevoerd om het elektriciteitsnet en haar functies beter te begrijpen. De informatie in dit onderzoek is opgedaan door middel van deskresearch. Het is een kwalitatief onderzoek waarbij feitelijke informatie is gebruikt. Dit onderzoek is bedoeld om antwoord te geven op de deelvragen uit de onderstaande tabel.

Deelvragen
- Welke eisen spelen een rol bij het inpassen van de componenten bij een hoogspanningsstation?
- Wat zijn de materiaaleigenschappen die mee moeten worden genomen in de parameters voor de ontwerp tool?
- Welke bezwijkmechanismen spelen een rol op de hoogspanningscomponenten?
- Uit welke onderdelen bestaan de hoogspanningscomponenten?

3.1.2 Softwarepakketten

Het vooronderzoek softwarepakketten is erop gericht om enerzijds een blik te werpen op de software die hedendaags beschikbaar is en anderzijds is het een alternatieve studie voor verschillende programma's. De keuze over welke softwarepakketten is bekeken, berust op de software die Petersburg Consultants B.V. momenteel gebruikt en de mogelijke concurrentie van de gebruikte software.

Het vooronderzoek "Softwarepakketten" is kwalitatief onderzoek, omdat de mogelijkheden vastgesteld zijn door middel van informatie van de leveranciers van de pakketten in combinatie met inzicht over het ontwerpproces van Petersburg Consultants B.V. zelf.

Deelvragen
- Is de software van Petersburg Consultants B.V. toereikend genoeg om de doelen te realiseren?
- Welke andere programma's kunnen er gebruikt worden om dezelfde doelen te bereiken?

3.1.3 BIM & parametrisch ontwerpen

Het vooronderzoek BIM & parametrisch ontwerpen is gericht op de vraag wat de termen BIM en parametrisch ontwerpen betekenen. Het vooronderzoek is kwalitatief. De concepten die worden gebruikt om de onderwerpen mee uit te leggen zijn afkomstig uit wetenschappelijk onderzoek. Ook dit vooronderzoek is volledig uitgevoerd door middel van deskresearch.

Deelvragen
- Wat is de definitie van BIM, en hoe past dit binnen dit afstudeerproject?
- Wat is de definitie van parametrisch ontwerpen, en hoe past dit binnen dit afstudeerproject?

3.2 Interviews

Om een duidelijk beeld te krijgen van het ontwerpproces van een hoogspanningsstation is een aantal interviews afgenomen bij de tekenaars en constructeurs van Petersburg Consultants B.V. Er is gebruik gemaakt van een half gestructureerd diepte-interview afkomstig uit het boek *Basisboek Interviewen* van B.B. Hulst (2017.) Uit deze interviews is het vooronderzoek ontwerpproces voortgekomen.

Deelvragen
- Hoe zit het ontwerpproces van een hoogspanningsstation en een hoogspanningscomponent in elkaar?
- Wat wil het personeel van Petersburg Consultants B.V. verbeterd zien aan het ontwerpproces?

3.2.1 Ontwerpproces

Uit de verzamelde data van de interviews is een beeld gemaakt van het ontwerpproces. Buiten de pas besproken interviews zitten hier ook bordfoto's bij. Op deze bordfoto's is het ontwerpproces schematisch weergegeven door de personeelsleden tijdens de interviews. De resultaten van dit onderdeel worden als kwalitatief onderzoek beschouwd. Het ontwerpproces is in kaart gebracht door middel van fieldresearch. De interviews zijn zowel kwantitatief als kwalitatief geanalyseerd. Er is namelijk gebruik gemaakt van een vragenlijst om de rode lijn van de interviews mee te bewaken, maar er is ook van deze lijst afgeweken als de geïnterviewde extra informatie hadden over het ontwerpproces waar nog niet naar gekeken was.

Tijdens het vooronderzoek Ontwerpproces is wel gekeken naar extra informatie over de constructies door dit te vragen aan specialisten. Dit onderdeel mag dan ook worden beschouwd als fieldresearch. Er zijn verder berekeningen uitgevoerd ten behoeve van het beschrijven van de constructies. Dit onderdeel is ook deskresearch.

3.3 Praktisch onderzoek

Na het afronden van het vooronderzoek Softwarepakketten moest worden gekeken of de geselecteerde programma's genoeg mogelijkheden bieden om het onderzoek tot een succesvol einde te brengen. De beste manier om hierachter te komen is door middel van de methoden "constructive design research". Met deze methode worden bewerkingen doorgevoerd waarna direct gekeken wordt wat het resultaat is.

Deelvragen
- Is de software van Petersburg Consultants B.V. toereikend genoeg om de doelen te realiseren?

3.3.1 Proof of concept

Tijdens het praktijkonderzoek is gebruik gemaakt van de programma's Tekla, Grasshopper en Rhinoceros. Het idee was om een voorvertoning van het eindproduct te maken. Het Proof of Concept is een praktijkonderzoek dat beschouwd wordt als een kwantitatief onderzoek, omdat er onderzocht is of de gewenste doelen door middel van de geselecteerde programma's te behalen zijn. Het concept is ontwikkeld aan de hand van meerdere dagen deskresearch. Er is gekozen om een simpele constructie, zoals een ondersteuning voor een hoogspanningscomponent, te onderzoeken, want dit maakt het minder ingewikkeld om een tool te ontwikkelen met de gewenste functies.

4. Vooronderzoeken

Met de vooronderzoeken is getracht een groot deel van de deelvragen te beantwoorden en is de benodigde kennis en informatie verzameld om het afstudeerproject uit te kunnen voeren. Er is een aantal literatuuronderzoeken gedaan die zijn verdeeld over drie onderzoeken: civiel- en elektrotechnische achtergronden, softwarepakketten en BIM & parametrisch ontwerpen. Verder zijn er nog interviews bij het personeel van Petersburg Consultants B.V. afgenomen. Hier is het vooronderzoek ontwerpproces uit voortgekomen. Als laatste is er nog een praktisch onderzoek gedaan om te kunnen bepalen of het mogelijk is om het resultaat te bereiken dat de afstudeerders voor ogen hebben.

4.1 Civiel- en elektrotechnische achtergronden

Het literatuuronderzoek civiele en elektrotechnische achtergronden richt zich op de algemene zaken en de achtergronden die een rol spelen bij het afstudeerproject. De onderzoeken die in dit literatuuronderzoek zijn opgenomen, zijn veelal te klein om ze in een apart onderzoek op te nemen. Zie bijlage A.1 voor desbetreffend onderzoek

4.1.1 Het hoogspanningsnet

Als eerste is er onderzocht hoe het hoogspanningsnet is opgebouwd. Dit onderzoek is gedaan om inzicht te krijgen in de functie van het hoogspanningsnet en hoe het hoogspanningsnet is opgebouwd. Dit biedt de lezers een beter inzicht van het vakgebied waarin dit project zich bevindt. In dit onderzoek is duidelijk geworden wat de functie van het hoogspanningsnet is, namelijk het over grote afstanden transporteren van elektriciteit van de producent naar de afnemer. Hierbij wordt gebruik gemaakt van verschillende netspanningen, van 1 kV voor het distribueren van elektriciteit tot 380 kV voor het transport over lange afstanden. In enkele gevallen wordt er gebruik gemaakt van 450 kV DC voor het transporteren van elektriciteit over afstanden van honderden kilometers.



Afbeelding 4.1: Het hoogspanningsnet van Nederland. Bron: www.tennet.eu

4.1.2 Hoogspanningsstations en de belangrijkste componenten.

In het hoofdstuk "Hoogspanningsstations en de belangrijkste componenten" is onderzocht wat de functie van verschillende typen hoogspanningsstations is en hoe een hoogspanningsstation is opgebouwd. Hieruit is geconcludeerd dat een hoogspanningsstation fungeert als een kruispunt in het hoogspanningsnet waar verbindingen worden op- en afgeschakeld en waar spanningen omhoog en omlaag worden getransformeerd.



Afbeelding 4.2: Het nieuwe deel van station Borssele in aanbouw. Bron: Foto van Petersburg Consultants B.V.

4.1.3 De steunisolator en de pantograafscheider

In de volgende twee hoofdstukken van dit literatuuronderzoek zijn twee componenten onderzocht. Er is hier ingegaan op de functies van de componenten, hoe deze zijn opgebouwd en welke eisen er door TenneT worden gesteld aan de componenten. Deze eisen zijn als uitgangspunten genomen voor het project.

4.1.4 Materiaaleigenschappen

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de deelvraag: 'Wat zijn de materiaaleigenschappen die mee moeten worden genomen in de parameters voor de ontwerptool?' Er is onderzoek gedaan naar de materiaaleigenschappen van staal, keramiek en van aluminium. Deze materialen komen allemaal terug in de componenten die in dit project zijn gebruikt. Per materiaal is onderzocht wat de kenmerken zijn qua stijfheid, soortelijk gewicht, treksterkte en druksterkte. Voor de capaciteit van de kunststof wordt in de berekeningen uitgegaan van een topdwarskracht van 14 kN, omdat dit door de fabrikant van de steunisolators is opgegeven.

4.1.5 Bezwijkmechanismen

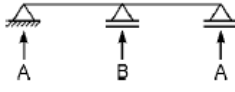
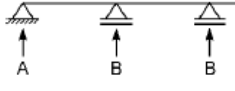
In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de deelvraag: "Welke bezwijkmechanismen spelen een rol op de hoogspanningscomponenten?"

Er is hier ingegaan op de bezwijkmechanismen kip, knik, vermoeiing, buiging, plooi, druk en trek. Verder is bepaald op welke bezwijkmechanismen de ondersteuningsconstructie getoetst dient te worden.

4.1.6 Krachten ten gevolge van kortsluiting

In hoofdstuk 9 van dit literatuuronderzoek is onderzocht wat het fenomeen kortsluiting is en wat kortsluitkrachten zijn. Daarnaast zijn de uitgangspunten bepaald voor het berekenen van de kortsluitkrachten die op de constructie werken.

In de berekeningen van de kortsluitkrachten zal uitgegaan worden van een vaste geleider in de vorm van een aluminium buis met een doorsnede van 160 mm en een wanddikte van 8 mm. Verder is er uitgegaan van een nominale stroom van 4000 A, een stootkortsluitstroom van 63.000 A en een topwaarde kortsluitstroom van 160.000 A. Voor de belastingafdracht is uitgegaan van een "simple support", zie afbeelding 4.3. Hierbij wordt de belasting gelijk verdeeld over de steunpunten. De kortsluitkrachten zijn berekend volgens de NEN-EN-IEC 60865-1 2012

Type of beam and support			α	$\beta^*)$	γ
Single span beam	A and B: simple supports		A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: fixed support B: simple support		A: 0,625 B: 0,375	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	A and B: fixed supports		A: 0,5 B: 0,5	$\frac{8}{16} = 0,5$	3,56
Continuous beam with equidistant simple supports	Two spans		A: 0,375 B: 1,25	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	Three or more spans		A: 0,4 B: 1,1	$\frac{8}{11} = 0,73$	3,56
* Plasticity effects included.					

Afbeelding 4-3: Tabel 3 uit NEN-EN-IEC 60865-1 2012. Bron: NEN-EN-IEC 60865-1 2012

4.1.7 Uitgangspunten voor de berekeningen

Als laatste zijn de uitgangspunten voor de berekeningen vastgesteld. Hiermee is ook antwoord gegeven op de deelvraag: "Welke eisen spelen een rol bij het inpassen van de componenten bij een hoogspanningsstation?"

De uitgangspunten voor de berekeningen zijn bepaald aan de hand van de Specificatie constructieberekeningen van TenneT. Hierin staan de belastinggevallen die op de constructie geplaatst dienen te worden, zowel de normale als de bijzondere belastinggevallen, en de belastingcombinaties voor de UGT, BGT en buitengewone belastingen weergegeven. Verder is aangegeven wat de maximale verplaatsing aan de bovenkant van de constructie mag zijn. Voor de steunisolator geldt een maximale verplaatsing van 1/150 maal de hoogte van de constructie en voor de pantograafscheider geldt een maximale verplaatsing van 1/300 maal de hoogte van de constructie.

4.2 Ontwerpproces

Met het vooronderzoek ontwerpproces zijn de volgende deelvragen beantwoord:

- Hoe zit het ontwerpproces van een hoogspanningsstation en een hoogspanningscomponent in elkaar?
- Wat wil het personeel van Petersburg Consultants B.V. verbeterd zien aan het ontwerpproces?

Het vooronderzoek is gedaan door middel van interviews met de tekenaars en constructeurs van Petersburg Consultants B.V. Er is een standaard vragenlijst opgesteld als richtlijn, maar vanwege de gekozen interviewmethodiek, half gestructureerd diepte-interview, kon hiervan afgeweken worden, mochten deze niet toereikend zijn. In de volgende paragrafen wordt per deelvraag ingegaan op de resultaten van het onderzoek en de uitgangspunten die hieruit voort zijn gekomen. Zie bijlage A.2 voor dit vooronderzoek.

4.2.1 Hoe zit het ontwerpproces van een hoogspanningsstation en een hoogspanningscomponent in elkaar?

Op bovenstaande vraag werden er tegenstrijdige antwoorden gegeven. De ene persoon geeft aan dat de constructeur begint met de toetsing en dat hij de daaruit volgende afmetingen doorgeeft aan de tekenaar, zodat de tekenaar aan de slag kan. De andere persoon zegt dat er door de tekenaar en de constructeur gelijkop gewerkt wordt en dat er gaandeweg aanpassingen aan het ontwerp worden aangebracht als blijkt dat dat nodig is. Dit is ook afhankelijk van het project.

Vaak kan er ook tegelijk gewerkt worden, omdat TenneT doorgaans al een VO heeft, voordat aan het project begonnen wordt. Dit bevat voldoende informatie voor de tekenaars om te beginnen met tekenen. Als later mocht blijken dat er nog aanpassingen gedaan moeten worden in het ontwerp dan kunnen deze alsnog relatief snel worden doorgevoerd. Verder heeft TenneT standaard bouwstenen die op elk project toegepast dienen te worden. Dankzij deze bouwstenen kan er sneller ontworpen worden, omdat de tekenaar deze alleen maar in het model hoeft te plaatsen.

4.2.2 Wat wil het personeel van Petersburg Consultants B.V. verbeterd zien aan het ontwerpproces?

Uit de interviews blijkt dat het personeel graag een parametrisch model wil zien dat uit te wisselen is tussen de verschillende softwarepakketten. Momenteel worden er meerdere modellen gemaakt voor één project, dit is dubbel werk en het kan dus efficiënter. Een gevaar is wel dat er bij het uitwisselen van modellen informatie verloren kan gaan. Als hier goed mee wordt omgegaan, kan dit veel opleveren.

De senior constructeur gaf aan dat een parametrisch model potentie heeft, maar het is niet echt toepasbaar op de ondersteuningsconstructies van de hoogspanningscomponenten, omdat dit vrij simpele constructies zijn. Op ingewikkeldere constructies is dit wel van toepassing. Een ander punt dat het personeel graag verbeterd zou willen zien is het berekenen van de belastingen, hier gaat momenteel de meeste tijd in zitten voor de constructeurs.

Verder kwam het personeel nog met een aantal ideeën voor mogelijke functionaliteiten: automatische clashcontroles, automatisch controleren of de afstanden tussen constructies groot genoeg zijn voor de spanningsafstanden, automatisch wijzigingen doorvoeren in meerdere modellen als er een aanpassing in één model wordt gedaan en het automatisch op correcte wijze genereren van tekeningen van een 3D model.

4.3 Softwarepakketten

Het vooronderzoek softwarepakketten richt zich op de softwarepakketten die Petersburg Consultants B.V. momenteel in gebruik heeft en op enkele andere softwarepakketten. Met dit vooronderzoek zijn de volgende deelvragen beantwoord:

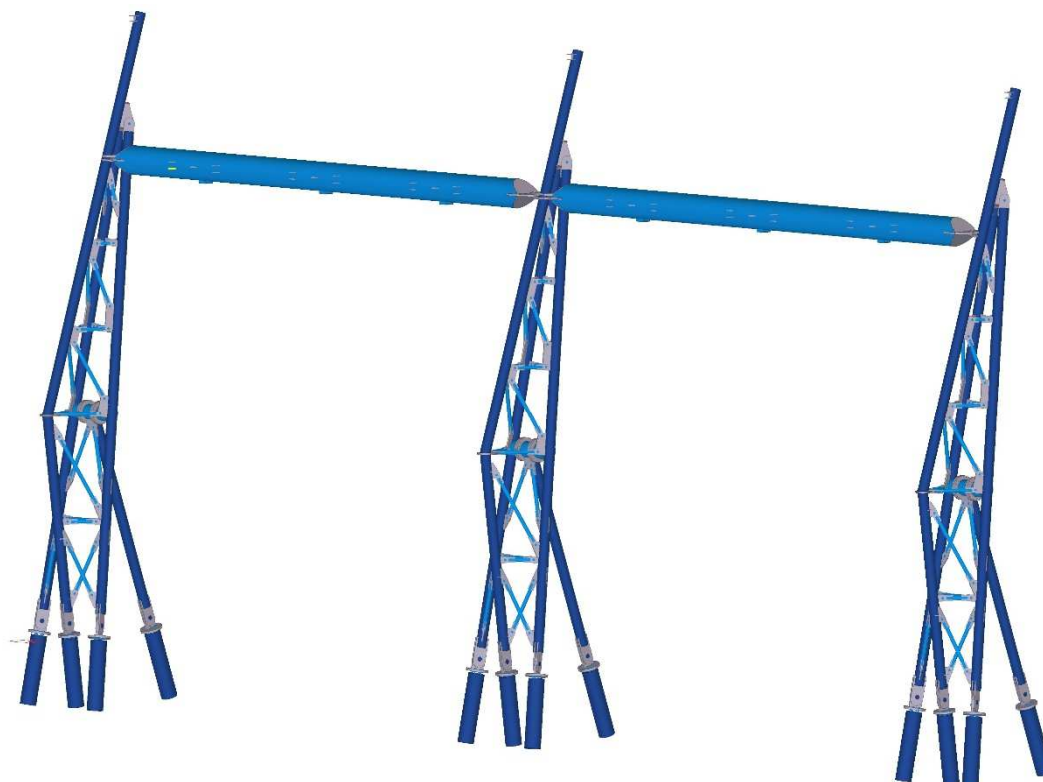
- Is de software van Petersburg Consultants B.V. toereikend genoeg om de doelen te realiseren?
- Welke andere programma's kunnen er gebruikt worden om dezelfde doelen te bereiken en werken deze beter?

Petersburg Consultants B.V. heeft momenteel Tekla Structures en RFEM in gebruik en er wordt overwogen om IDEA Statica aan te schaffen. Naast deze softwarepakketten wordt er ook veel gebruik gemaakt van Microsoft Excel voor berekeningen.

Tekla Structures biedt veel mogelijkheden die toegepast kunnen worden in het afstudeerproject. Zo kunnen componenten worden geparametriseerd, zodat er snel aanpassingen aan een model gedaan kunnen worden. Verder biedt Tekla Structures ook de mogelijkheid om rekenmodellen klaar te zetten voor rekenprogramma's

als RFEM. Er kunnen belastinggevallen en belastingen op het 3D model geplaatst worden en daarna kan het model geëxporteerd worden.

RFEM biedt ook een aantal mogelijkheden die toegepast kunnen worden. Er kan vanuit verschillende programma's data geïmporteerd worden. Er kan data vanuit AutoCAD en Tekla Structures geïmporteerd worden, er kan informatie van het model naar Excel geëxporteerd worden en er kan informatie vanuit Excel geïmporteerd worden.



Afbeelding 4.4: Concordepoortaal gemodelleerd in Tekla Structures. Bron: Tekla model van Petersburg Consultants B.V.

De software die Petersburg Consultants B.V. al gebruikt biedt dus veel mogelijkheden, maar er is besloten om ook naar een aantal andere softwarepakketten te kijken om te bepalen of deze programma's eventueel beter werken. Dit zijn IDEA Statica en Rhinoceros/Grasshopper.

IDEA Statica kan goed van pas komen om verbindingsdetails te ontwerpen. Door middel van een directe koppeling kan een verbindingdetail vanuit Tekla geïmporteerd worden en kan een knoop met alle snedekrachten vanuit RFEM geïmporteerd worden. Er bestaat momenteel nog geen mogelijkheid om de verbinding naar Tekla Structures te exporteren, maar hieraan wordt gewerkt.

Rhinoceros/Grasshopper is een programma waarmee in een visuele omgeving geprogrammeerd kan worden. Om dit te kunnen doen is geen basiskennis van programmeertaal vereist, maar het is wel handig als de gebruiker een basis heeft. Met Rhinoceros/Grasshopper kunnen parametrische modellen gemaakt worden. De twee programma's zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden. Rhinoceros is een modelleringsomgeving. Alle modellen worden in dit programma als eerst gevisualiseerd. Grasshopper is het codeerprogramma. Door middel van het slepen van visuele blokjes kan een model gemaakt worden dat reageert op input van de gebruiker. In Grasshopper kan een live link met Tekla Structures opgezet worden. Na het installeren van de link zijn er diverse mogelijkheden om civiele bouwmodellen in Tekla te parametriseren. Rhinoceros/Grasshopper is een belangrijk programma dat ook in industrieën zoals ruimtevaart en architectuur wordt gebruikt. Zie bijlage A.3 voor het gehele onderzoek.

4.4 BIM & parametrisch ontwerpen

Het literatuuronderzoek BIM & parametrisch ontwerpen heeft zich gericht op het onderzoeken van de betekenis van de termen BIM en parametrisch ontwerpen. Met dit vooronderzoek is antwoord gegeven op de volgende deelvragen:

- Wat is de definitie van BIM, en hoe past dit binnen dit afstudeerproject?
- Wat is de definitie van parametrisch ontwerpen, en hoe past dit binnen dit afstudeerproject?

Er is besloten om dit te onderzoeken, omdat er veel verwarring kan optreden bij het gebruik van deze termen. Ook wordt voornamelijk de term BIM te pas en te onpas gebruikt.

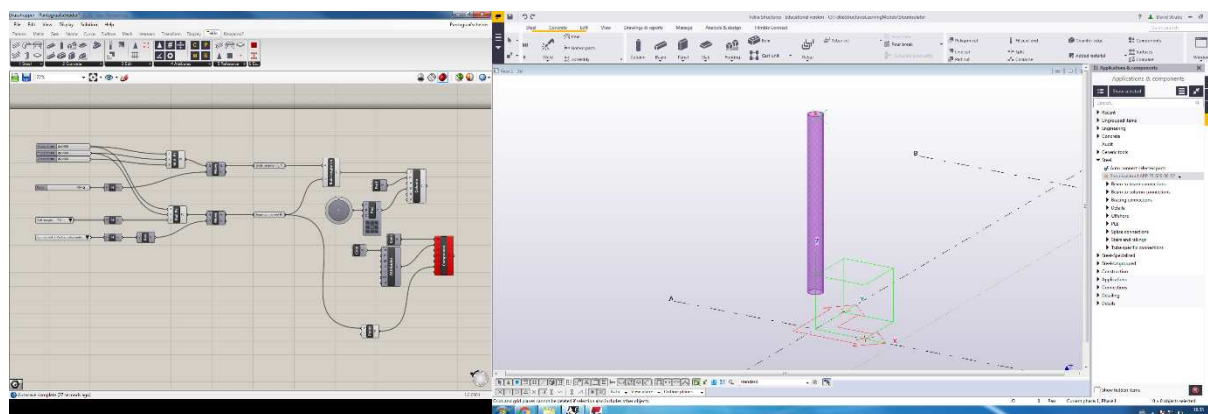
Uit het onderzoek is gebleken dat BIM per situatie anders te definiëren is. Doordat de term BIM een zeer breed toepassingsgebied heeft en omdat het afstudeerproject zich maar op een klein aspect van BIM richt, is besloten om de term niet meer toe te passen. In plaats daarvan zal er over informatiestromen gesproken worden, omdat dat relevanter is voor het afstudeerproject.

Parametrisch ontwerpen is een manier van ontwerpen waarbij gebruik wordt gemaakt van objectgeoriënteerde 3D modelleersoftware. Aan de objecten zit informatie gekoppeld, deze informatie kan veranderd worden waardoor het object ook verandert. Deze informatie kan handmatig aangepast worden, maar er kan ook gebruik worden gemaakt van een rekenprogramma dat de resultaten gelijk in het model verwerkt. Zie bijlage A.4 voor meer details over dit vooronderzoek.

4.5 Proof of concept

Uit de literatuuronderzoeken kwamen interessante bevindingen. In het bijzonder leken de programma's Rhinoceros/Grasshopper veel potentie te bieden. Het werd al snel duidelijk dat Tekla een link had om de twee softwarepakketten samen te laten werken. Deze bevindingen legden de grondslag voor de manier waarop de afstudeerders het ontwikkelen van de "tool" gingen aanpakken. Om te kijken of de bedachte mogelijkheden ook daadwerkelijk te maken zijn, is een proof of concept gemaakt.

De deelvraag van de proof of concept luidde: "Is het mogelijk om een eenvoudig parametrisch 3D ontwerp te maken van een ondersteuningsbuis van de steunisolator waarin de lengte bepaald wordt aan de hand van opgegeven parameters?" Het was de bedoeling het ontwerp zo simpel mogelijk te maken. Na twee weken proberen kwam er al snel een resultaat naar boven. In figuur 4.3 is het proefexemplaar te zien.



Afbeelding 4.5: Grasshopper naar Tekla Proof of Concept Bron: Eigen werk

Aan de hand van een paar simpele invoerparameters werd een buis in Tekla gegenereerd met een lengte die paste bij het vooraf bekeken ontwerp. Het was een succes. Nu er een antwoord was gegeven op de deelvraag was de proof of concept een belangrijke mijlpaal die het verloop van het afstudeerproject ging bepalen.

De buislengte werd gegenereerd aan de hand van vier simpele vragen:

- Wat is het startpunt van de constructie?
- Wat is de lengte van de ondersteuning?

-
- Hoe hoog zit de bovenste rail van de constructie?
 - Wat is de naam van de component die op de buis staat (de naam bepaalt de lengte die de buis inkort)?

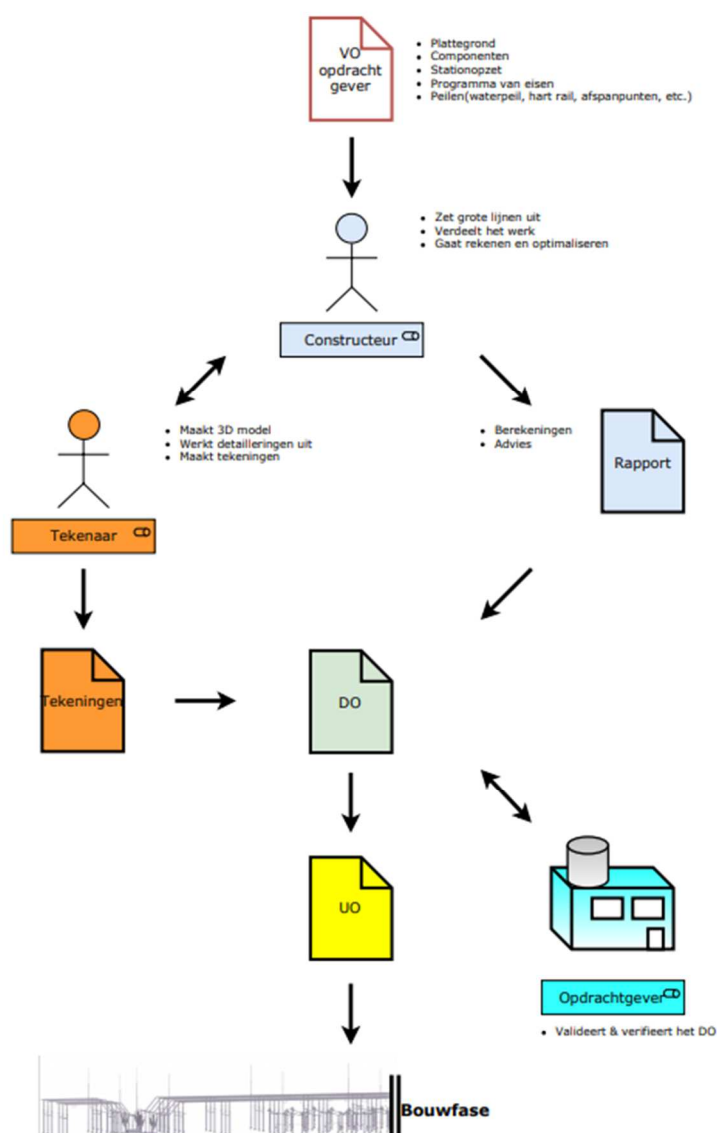
Aan de hand van deze vragen wordt gekeken op welke X- en Y-coördinaten de buis gegeneerd moet worden en van welke Z-coördinaat tot welke Z-coördinaat de buis moet lopen.

Het is logisch dat de antwoorden op deze vragen de positie van de buis kunnen bepalen. Echter werkt Tekla normaal gesproken niet zo. Als een model wordt getekend, moet een tekenaar de definitieve dimensies van het model weten. Zowel de opbouw als kleine veranderingen moeten handmatig worden gedaan. Dit kost veel tijd. Het besef van deze complicaties geeft het ontwikkelde Proof of Concept een gelijk al zichtbare waarde. Om deze reden is besloten om door te gaan met Grasshopper en de software als basis te gebruiken voor de te maken modellen.

5. Systematisch ontwerpen& het ontwerpproces

Uit de vooronderzoeken en het ontwikkelproces is gebleken dat er vergaande automatisering- en optimalisatiesslagen kunnen worden doorgevoerd om het ontwerpproces van een hoogspanningscomponent efficiënter te maken. Dit hoofdstuk gaat over de invulling van de behoeftes van Petersburg Consultants B.V. naar aanleiding van de vooronderzoeken. Uit deze onderzoeken is gebleken dat er moet worden omgegaan met bepaalde informatiestromen binnen het bedrijf. Met deze stromen wordt alle input en output van het ontwerpproces bedoeld. De tool is ontwikkeld met het doel om deze informatiestromen te optimaliseren.

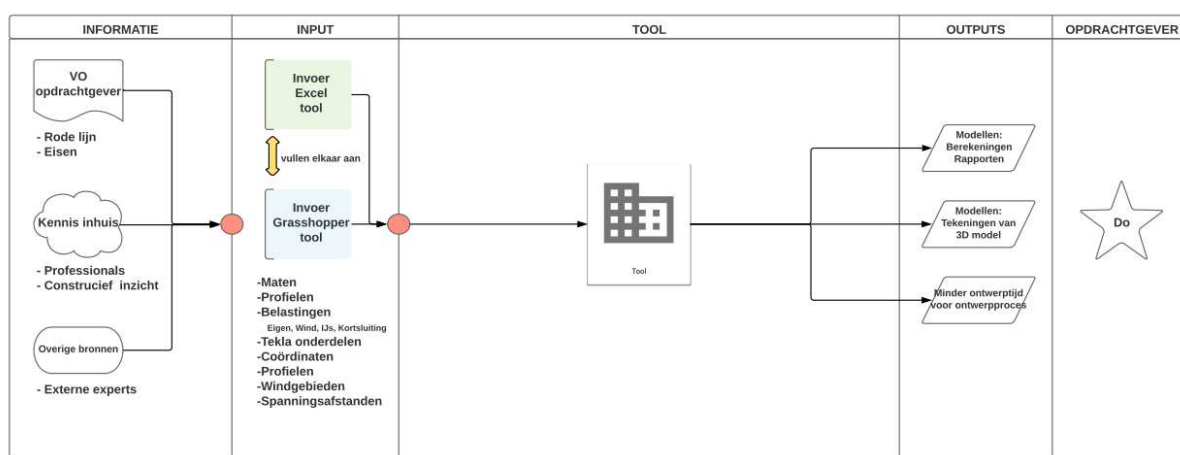
Eerst is het van belang om de grote lijnen van het project uit te zetten. Het onderzoek gebruikt het proces van VO naar UO van een hoogspanningsstation als leidraad voor het onderzoek. In afbeelding 5.1 zijn de grote lijnen inzichtelijk gemaakt door middel van een stroomschema. In bijlage B is een grotere versie van onderstaande afbeelding opgenomen. Het is een figuur dat betrekking heeft op het interne ontwerpproces. Natuurlijk is er ook contact met klanten, maar de nadruk ligt hier op het opstellen van de modellen waarmee het ontwerp gerealiseerd kan worden.



Afbeelding 5.1: Ontwerpproces intern in grote lijnen Bron: Eigen werk

Uit de interviews met bordfoto's bleek dat het onderzoek het meeste invloed had op het proces van VO naar DO. In het proces ontstaat op enig moment een wisselwerking tussen de constructeur en tekenaar. Deze wisselwerking is ook zichtbaar in afbeelding 5.1. Het kan tot problemen leiden als het personeel tegelijkertijd met de verschillende modellen aan het werk gaat. Dit kan als gevolg hebben dat er verschillen ontstaan, omdat het bijwerken van de reken- en tekenmodellen hoofdzakelijk berust op mondelinge communicatie. De tool is bedoeld om een uitkomst te zijn voor dit proces. Als het model van de hoogspanningscomponent berust op een script dat attributen deelt tussen verschillende modellen, dan kunnen er geen verschillen meer optreden op basis van miscommunicatie. Het is belangrijk om te begrijpen hoe het proces normaal gesproken gaat. Opmerkelijk is dat een constructeur veel informatie moet bewerken en distribueren naar de tekenaars. Om een concrete invulling te geven aan hoe de tool de verschillende informatie hanteert is afbeelding 5.2 opgesteld. Dit proces speelt zich af tussen VO en DO.

HOOGSPANNINGSCOMPONENT TOOL



Afbeelding 5.2: Stroomschema VO naar DO Bron: Eigen werk

5.1 Genereren en koppelen van een reken- en tekenmodel

Uit afbeelding 5.2 wordt duidelijk waaronder de ontwerptool binnen het volledige ontwerpproces valt. In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe de tool werkt vanuit het perspectief van de gebruiker. De nadruk wordt gelegd op waar de tool uit bestaat, wat de tool doet en welke input nodig is om de tool succesvol te laten werken. Voor een uitgebreide beschrijving over de opbouw van de tool kan bijlage C "Handleiding Schematisch Modelleren" worden gelezen.

De gebruiker begint zoals altijd aan het begin van een ontwerpproces met het verzamelen van gegevens. Veel informatie is al bekend. Zo wordt er in het VO al een maatvoering gegeven met betrekking tot de veldrailhoogte en hoofd railhoogte. Er kan door middel van een paar maten al snel een grof model worden gegenereerd. Ook moet vastgesteld worden of de gebruiker een tekenmodel of rekenmodel wilt genereren. Afhankelijk van deze behoefte moet de desbetreffende informatie worden ingevuld. Het invulproces is verdeeld over twee programma's, maar het centrale informatiepunt is het hoofdmodel in het programma Grasshopper. Vanuit dit model kan de gebruiker alle data in één oogopslag zien. Hier kan de gebruiker kiezen of het data uit Excel wil halen of dat de gebruiker zelf handmatig waarden wil invoeren. Om een helder beeld te geven over de input die het model nodig heeft en waar deze input kan worden ingevuld is een overzicht gegeven in tabel 5.3. Ook wordt een rol aan de inputdata gegeven, zodat helder wordt of een tekenaar (Tek) of constructeur (Con) input kan leveren aan dit model.

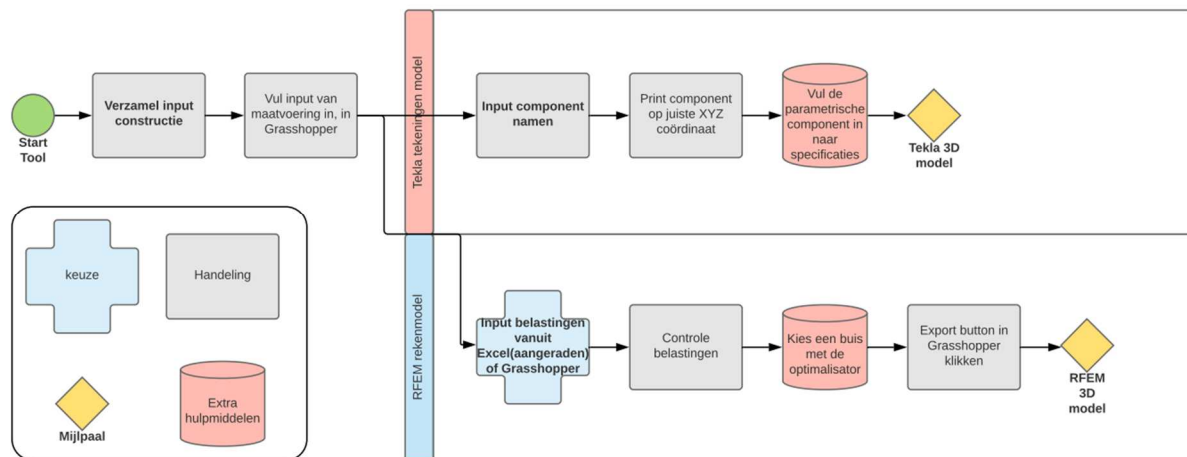
Input hoofdmodel		
Input waarde	Programma('s)	Rol
Funderingstype (Tekla Component) - Naam	Grasshopper	Tek
Ondersteuningstype (Tekla Component) - Naam	Grasshopper	Tek
Hoogspanningscomponent (Tekla Component) - Naam	Grasshopper	Tek
Klem type (Tekla Component) - Naam	Grasshopper	Tek
Railprofiel (Tekla Component) - Naam	Grasshopper	Tek
Basispunt constructie - {x, y, z} waarde in mm	Grasshopper	Tek
Stelhoogte fundering - maat in mm	Grasshopper	Tek
Lengte component - maat in mm	Grasshopper	Tek
Hoogte veldrail- maat in mm	Grasshopper	Tek
Belastingen input uit Grasshopper of Excel	Grasshopper of Excel	Con
Buisprofiel constructie	Grasshopper	Con

Tabel 5.3: Alle input voor de modellen Bron: Eigen werk

Uit de tabel wordt duidelijk dat er voor de belastingen meer manieren zijn om data in het hoofdmodel in te voeren. Echter, de gebruiker kan het beste kiezen om de maatvoering in te voeren in Grasshopper en de belastingen te lezen uit de ingevulde Excelsheet. In Afbeelding 5.4 is de werkmethode aangegeven die de mogelijkheden van de tool zo optimaal mogelijk benut. Ook wordt het zichtbaar dat het niet om veel input gaat. Natuurlijk moet er een aantal dingen worden uitgezocht, maar het feit dat er door middel van vragen een duidelijke lijst is van wat er gedaan moet worden om een model te genereren, maakt dat hier al een efficiëntie slag wordt gemaakt. In plaats dat een project blanco begint, is er nu al een basis om binnen enkele minuten een grof model te genereren.

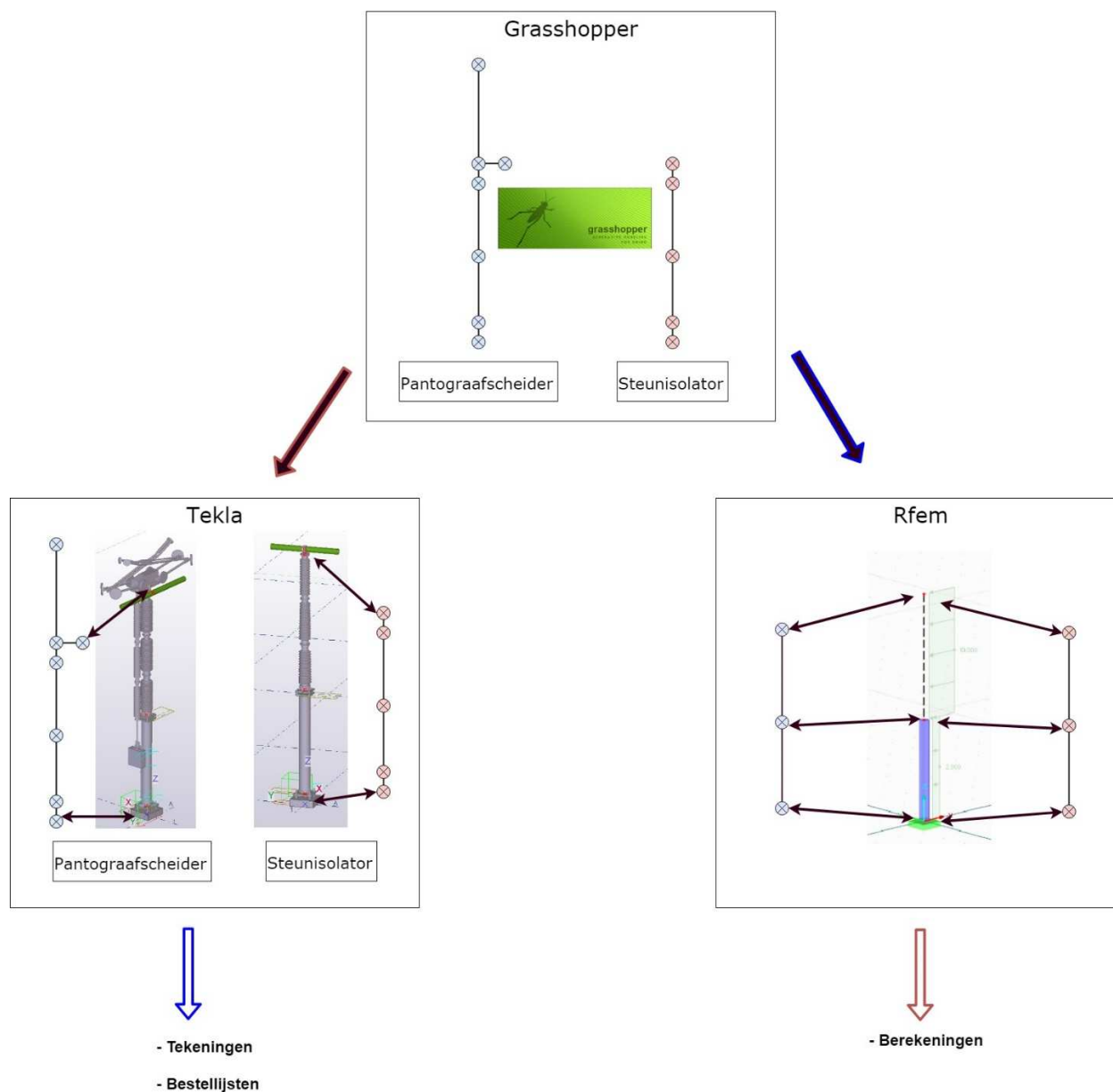
WERKMETHODE TOOL

David Strube | Bas van Beek



Afbeelding 5.4: De werkwijze voor het gebruik van de tools. Bron: Eigen werk

Als de inputwaarden van het hoofdmodel gegeven zijn, wordt het model correct opgebouwd in twee programma's. In tabel 5.3 is te zien op basis van welke geometrie van het hoofdmodel (model met rode kruisen) de andere twee modellen worden opgebouwd. De link voor het Tekla teken model is een live link. Dit houdt in dat alle input waarden die worden veranderd in het hoofdmodel direct zichtbaar zijn in Tekla. Dit kan nuttig zijn als er een onderdeel moet worden ingepast. De gebruiker kan zo bijvoorbeeld de stelhoogte van de fundering juist instellen op basis van de ruimte die zichtbaar is in het tekenmodel.



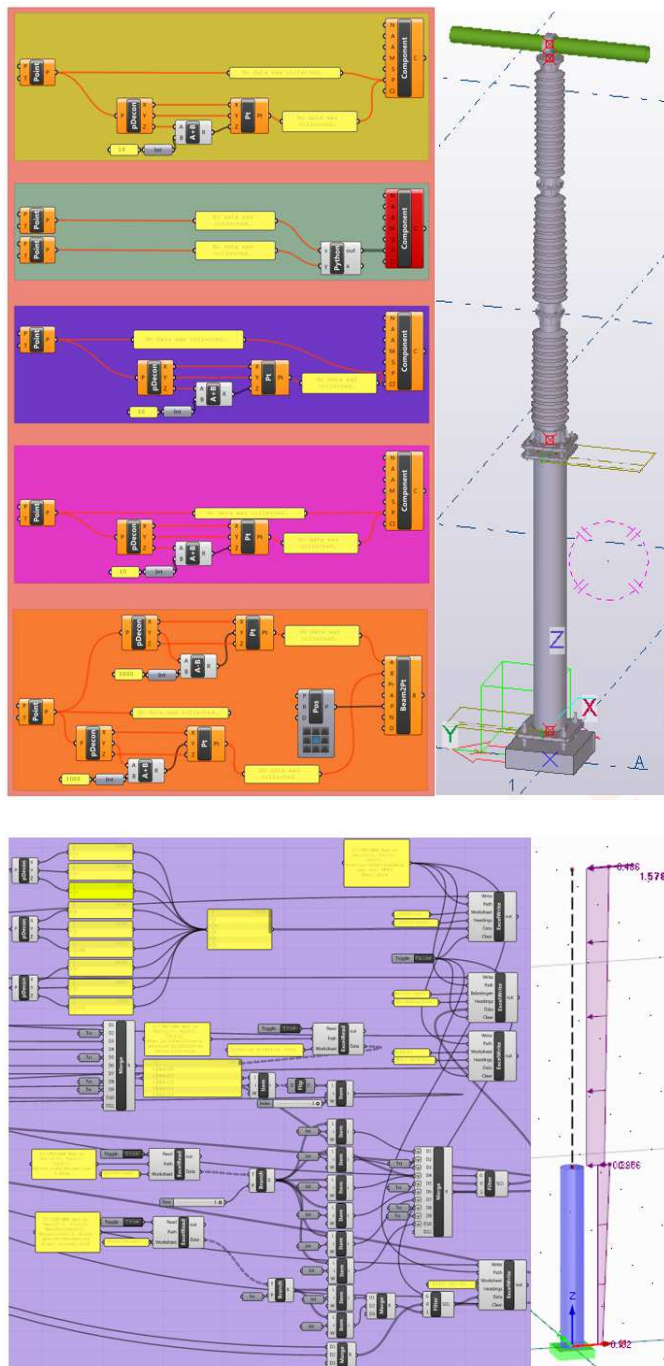
Afbeelding 5.5: Gedeelde geometrie modellen Bron: Eigen werk

Het Tekla model wordt gegenereerd door de input van tabel 5.3 te hangen aan de punten die worden gegenereerd zoals te zien is in figuur 5.5. Elke component heeft zijn eigen punt uit Grasshopper. De structuur wordt zo opgezet dat onderdelen niet overlappen en op de juiste plek worden gegenereerd. In principe verschijnt er gelijk een grof ontwerp van een steunisolator op het scherm. Het script is volledig op zichzelf staand. Dit houdt in dat het model overal gereproduceerd kan worden mits de componenten in de Tekla componenten bibliotheek staan.

Het RFEM-rekenmodel is niet een live link. Pas als alle waardes zijn ingevuld, kan een model worden gegenereerd. Voor de geometrie van het model wordt dezelfde geometrie gebruikt als op het tekenmodel. Zoals te zien is in afbeelding 5.5 wordt de onderkant van de staalconstructie gebruikt als referentiepunt, het einde van de ondersteuning en de bovenkant van de ondersteuning. Om de belastingen voor het rekenmodel in te vullen kan het invulschema uit afbeelding 5.6 gebruikt worden of de Excelsheets voor de belasting. Beide invulmogelijkheden zijn gelinkt aan het hoofdmodel. Wel wordt aangeraden de Excelsheets te gebruiken voor de invoer voor belastingen. De Grasshopper invoermogelijkheid is hoofdzakelijk bedoeld als extra middel om handmatig input door te kunnen voeren.

Afbeelding 5.6: Invoerformulier RFEM Bron: Eigen werk

Om een overzicht te krijgen over het werk dat het Grasshopper script voor de constructeurs en tekenaars doet, is een overzicht van de blokken van het hoofdmodel gegeven met daarnaast het resultaat van het desbetreffende visuele script. Deze overzichten zijn te zien in afbeelding 5.7. Aan de linkerkant staat het script en aan de rechterkant het gegenereerde model.



Afbeelding 5.7: Script & resultaten van het teken- en rekenmodel. Bron: Eigen werk

Voor een uitgebreide beschrijving van de opbouw van het visuele script van de modellen kan bijlage C worden gebruikt.

5.2 Een parametrische component maken in Tekla

Om de tool voor het modelleren te kunnen laten werken, was het een vereiste om een parametrische component in Tekla Structures te maken.

Een component in Tekla Structures is vergelijkbaar met een block in AutoCAD of een family in Revit. Het is een object dat uit verschillende onderdelen bestaat. Deze onderdelen zijn samengevoegd en gekoppeld tot één blok. In Tekla Structures kunnen verschillende categorieën aan componenten gemaakt worden. Dit zijn onderdelen, verbindingen, verbindingsdetails en details. De component die voor de tool is gemaakt, is een onderdeel.

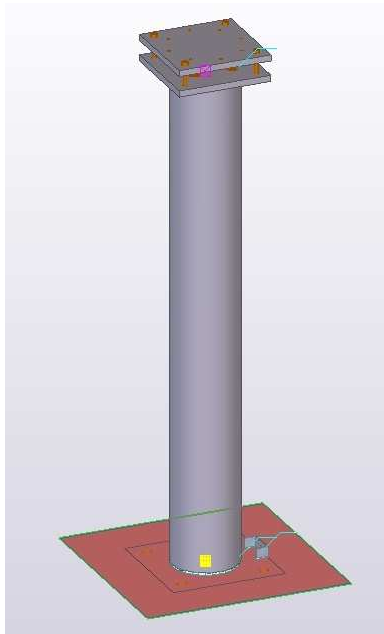
Met behulp van een componenteditor kan de gemaakte component handmatig aangepast worden of kan er een parametrische component van gemaakt worden. Het maken van de parameters gebeurt in een venster dat overeenkomsten heeft met Excel (zie afbeelding 5.8).

Naam	Formule	Waarde	Type waarde	Type variabele	Zichtba...	Tekst in dialoogvenster
P1	P	P	Tekst	Parameter	Zichtb...	Prefix pos
P2	1	1	Nummer	Parameter	Zichtb...	Startnummer pos
P3	OS	OS	Tekst	Parameter	Zichtb...	Prefix merk
P4	1	1	Nummer	Parameter	Zichtb...	Startnummer merk
P5			Tekst	Parameter	Zichtb...	Afwerking
P6	1	1	Nummer	Parameter	Zichtb...	Klasse
P7	Buis	Buis	Tekst	Parameter	Zichtb...	Naam buis
P8	Voetplaat	Voetplaat	Tekst	Parameter	Zichtb...	Naam voetplaat
P9	Kopplaat	Kopplaat	Tekst	Parameter	Zichtb...	Naam kopplaat
P10	Stelplaat	Stelplaat	Tekst	Parameter	Zichtb...	Naam stelplaat
P11	Aardingsbevestiging	Aardingsbevesti...	Tekst	Parameter	Zichtb...	Naam aardingsbevestiging
P12	B323.9/8	B323.9/8	Profiel	Parameter	Zichtb...	Profiel buis
P13	PL40	PL40	Profiel	Parameter	Zichtb...	Profiel voetplaat
P14	PL30	PL30	Profiel	Parameter	Zichtb...	Profiel kopplaat
P15	PL30	PL30	Profiel	Parameter	Zichtb...	Profiel stelplaat
P16	UNP140	UNP140	Profiel	Parameter	Zichtb...	Profiel aardingsbevestiging
P17	S235JR	S235JR	Materiaal	Parameter	Zichtb...	Materiaal buis
P18	S355JR	S355JR	Materiaal	Parameter	Zichtb...	Materiaal voetplaat
P19	S355JR	S355JR	Materiaal	Parameter	Zichtb...	Materiaal kopplaat
P20	S235JR	S235JR	Materiaal	Parameter	Zichtb...	Materiaal stelplaat
P21	S235JR	S235JR	Materiaal	Parameter	Zichtb...	Materiaal aardingsbevestiging

Afbeelding 5.8: Het variabelenvenster in de gebruikerscomponenten editor. Bron: Eigen werk.

In de tab “formule” kan een formule ingevuld worden zoals in Excel om bijvoorbeeld de lengte van de buis van de constructie te bepalen. Voordat de formules in dit venster gezet kunnen worden, moeten de onderdelen van de component aan een aantal vlakken gekoppeld worden, zie afbeelding 5.9. Dit zijn als het ware de nulpunten in de component, ten opzichte van deze vlakken worden de afmetingen berekend.

Als eerste is er een component met een paar functies gemaakt, zodat de hoogte veranderd kan worden. Dit was het minimale dat nodig was om een “proof of concept” te kunnen maken van de parametrische tekentool in Rhinoceros/Grasshopper.



Afbeelding 5.9: Het koppelen van een onderdeel aan een vlak: het rode vlak is het vlak waaraan het onderdeel gekoppeld wordt. Bron: Eigen werk.

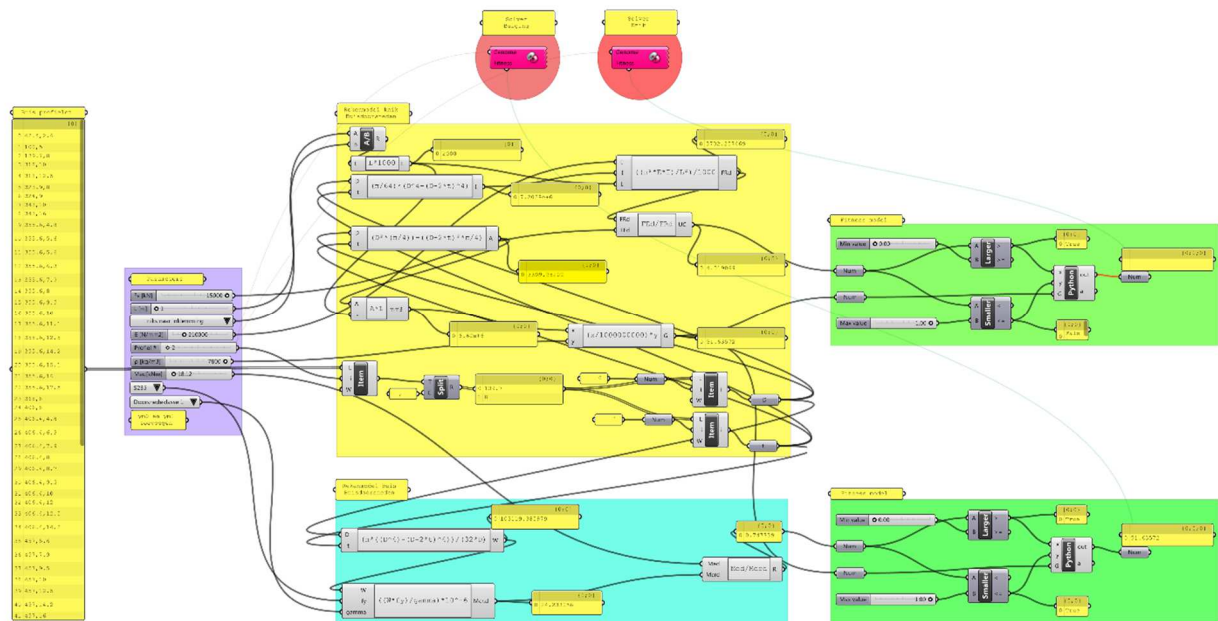
Uiteindelijk is de component verder geparametriseerd, zodat ook de bouten en platen aangepast kunnen worden. De eerste component die parametrisch is gemaakt is de ondersteuning voor een steunisolator. Daarna is ook de ondersteuning voor een pantograafscheider parametrisch gemaakt. Nadat de parametrische componenten zijn gemaakt, is er een handleiding geschreven, zodat de tekenaars weten hoe ze een parametrische ondersteuningsconstructie in Tekla Structures kunnen maken.

5.3 RFEM

Het RFEM-model van de pantograafscheider is niet toegevoegd aan de tool. In verband met de planning opgenomen in het Plan van Aanpak is ervoor gekozen hier geen geautomatiseerd model van te maken. Wel is er een apart model gemaakt volgens dezelfde uitgangspunten als die van de steunisolator. In principe is deze component hetzelfde, alleen zijn de oppervlakte en het gewicht van de constructie anders.

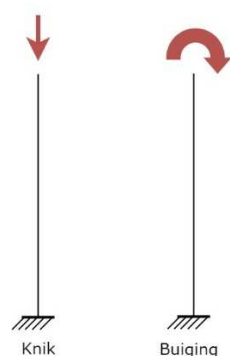
5.4 Optimalisatie berekeningen

Het buisprofiel bepalen van de hoogspanningscomponent is een belangrijk onderdeel van de berekeningen. In het kader van de onderzoeksvraag is het ook belangrijk dat rekenwerk zoals het kiezen van een optimaal profiel automatisch gebeurt. Precies voor deze doeleinden is een ander Grasshopper model opgezet. In afbeelding 5.10 is een overzicht van dit model te zien. Rondom elk onderdeel is een kleur gekozen. Aan de hand van deze kleurgebieden wordt uitgelegd wat het model binnen die grenzen doet.



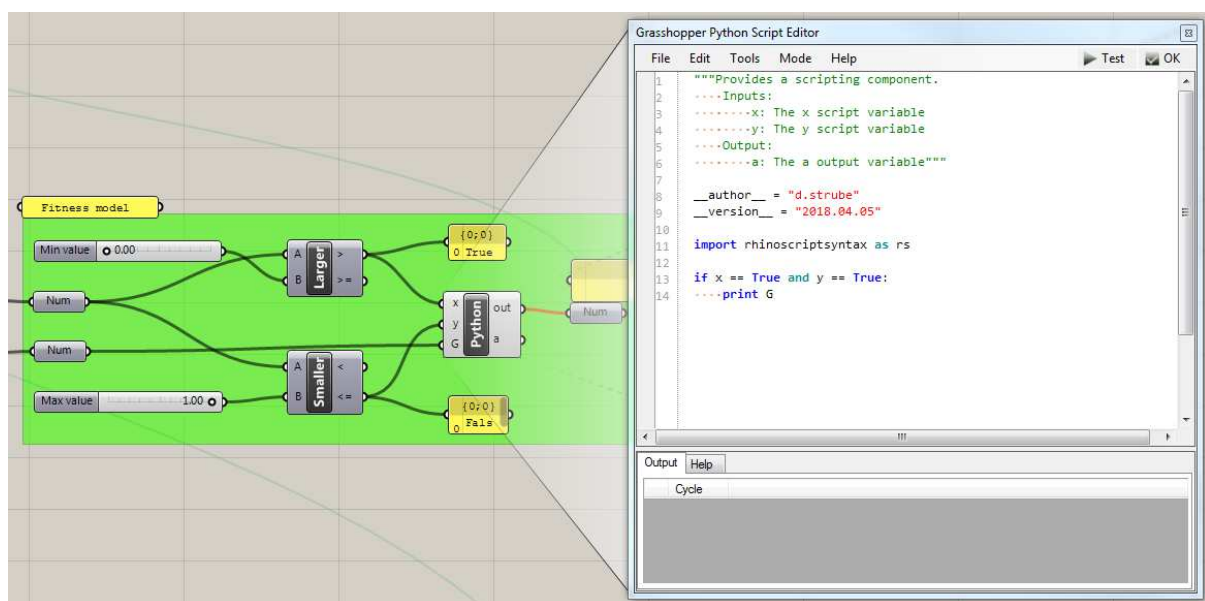
Afbeelding 5.10: Globale weergave van het model voor het optimaliseren van een buisprofiel. Bron: Eigen Grasshopper model

Het Grasshopper model wordt uitgevoerd in de volgorde van links naar rechts. In het paarse vlak aan de linkerkant staan de parameters die nodig zijn om de formules uit te rekenen. De parameters zijn: "Fv [kN] = verticale kracht, lengte, type oplegging, elasticiteitsmodules, profieldiameter en plaatdikte, soortelijk gewicht [kg/m³], Med [kNm] = optredend moment en doorsnedeklasse". Het grote gele blok aan de linkerkant van de constructie is een kleine database met buisprofielen. Vervolgens staat in het middelste gele blok het rekenmodel voor knik. In het gele gebied zijn alle formules opgenomen die de knikcapaciteit van een kolom berekend. Stel dat het mechanicaschema van knik er anders uit ziet met bijvoorbeeld een scharnieroplegging boven en een inklemming beneden, dan kan dit worden ingesteld met een drop down menu die de kniklengte bepaalt. Er kan ook worden gekozen tussen verschillende situaties. In het lichtblauwe gedeelte zijn alle formules voor het bepalen van de buigcapaciteit van een buisprofiel opgenomen. Als de capaciteiten van de buis zijn bepaald, wordt er getoetst aan de opgegeven optredende krachten.



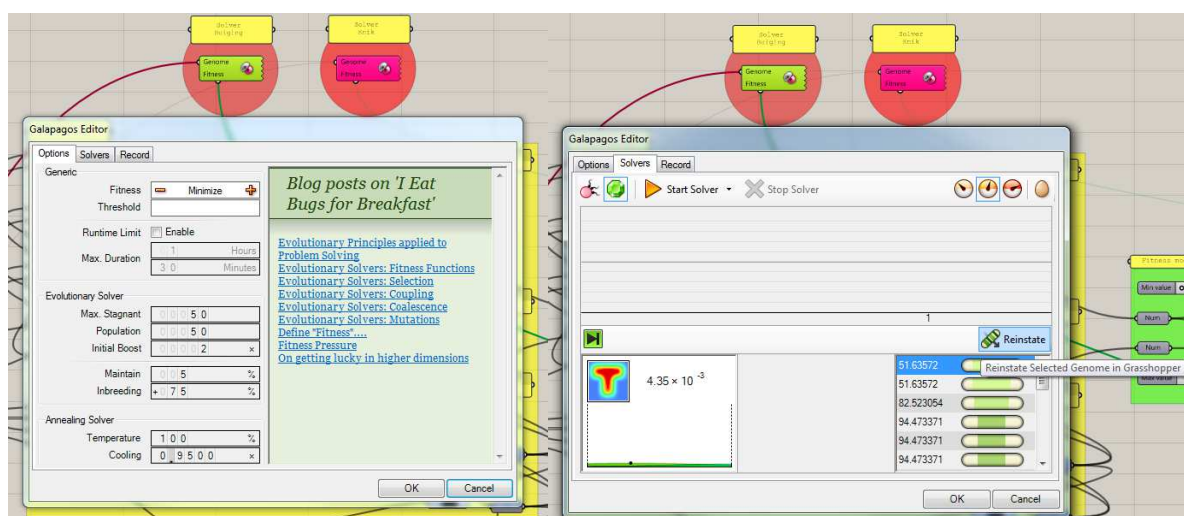
Afbeelding 5.11: Mechanicaschema. Bron: Eigen werk

Na het opzetten van de berekeningen en toetsingen, kunnen de berekeningen geautomatiseerd worden. Om dit te doen moeten er eisen worden gesteld aan de resultaten van de berekeningen door middel van een unity check. De eis is dat deze waarde niet lager mag zijn dan 0,0 en niet hoger dan 1,0. Stel dat er een unity check van tussen de 0,6 tot 1,0 uit mag komen, dan kan dit worden ingesteld met de sliders in het groene vlak. Na het bepalen van de minima en maxima van de unity check, dient er een Python script gebruikt worden om de voorwaarden te bepalen. Python is een programmeertaal die veel mogelijkheden biedt en goed is op te pakken voor beginners. Het Python script dat is gebruikt is te zien in figuur 5.12. Het is een eenvoudig script, maar het werkt goed. Het script kijkt naar de output van het blok er links naast. Uit dit blok komt het statement "waar" (True) of "onwaar" (False). Als het getal van x groter is dan nul, dan komt er "waar" te staan. Als het blok eronder aangeeft dat de waarde kleiner is dan één, dan volgt wederom de output: "waar". Als deze twee voorwaarden allebei "waar" zijn dan print het script het gewicht van de buis. Dit is wat het groene gedeelte doet.



Afbeelding 5.12: Python script. Bron: Eigen werk

Nu het "Fitness model" is bepaald, wordt "Galapagos" aan de berekening toegevoegd. "Galapagos" is een solver die door middel van wiskundige strategieën antwoorden in de berekeningen invoert. De solver is te zien in figuur 5.13.



Figuur 5.13: Galapagos solver functie. Bron: Eigen werk

De "fitness functie" van de solver wordt aangesloten op de output van het Python script. Vervolgens wordt in de solver aangegeven dat de waarde van het gewicht moet worden geminimaliseerd. Daarna moeten de parameters die variabel zijn, worden aangesloten op de "genome" van de solver. Er kunnen zoveel variabelen aan worden gehangen als de gebruiker wil. In dit geval wordt de buisdikte en diameter aan de "genome" van de solver gekoppeld.

Samenvattend, de "fitness functie" is het gewicht van de buis en de "genome" de buisdiameter en dikte. Nu wordt er gedrukt op start solver. Alle buisdiameters in combinatie met wanddiktes worden getest. De resultaten waarvan de buis het minst weegt worden vervolgens in de lijst rechtsonder in figuur 5.13 gezet mits de unity check een waarde heeft tussen nul en één. Als de beste opties zijn gekozen, wordt gedrukt op "reïnstate". Nu worden de parameters waarmee het geminimaliseerde gewicht is bereikt automatisch ingesteld.

Wanneer de gebruiker het buisprofiel heeft gevonden, kan het profiel ook worden ingesteld voor het hoofdmodel.



Afbeelding 5.14: De Galapos solver Bron: Eigen werk

6. Validatie van de rekentools

Om te kunnen begrijpen en controleren of de resultaten van de rekentool voor het automatisch bepalen van een profiel ook daadwerkelijk correct zijn, is besloten om de ondersteuningsconstructies met een handberekening en met behulp van RFEM te toetsen. De toetsingen zijn uitgevoerd volgens de door TenneT gestelde eisen en de huidige geldende normen. Er zijn toetsingen gedaan voor de ondersteuningsconstructies van een steunisolator en een pantograafscheider. Deze constructies zijn uit de case van het project Borssele 380 kV gehaald, zie bijlage D.2 voor de tekeningen. Voor dit project is het engineeringwerk al uitgevoerd. De resultaten van deze berekeningen staan voor de steunisolator in bijlage E en voor de pantograafscheider in bijlage F.

6.1 Belastingen

Aan de hand van de eisen van TenneT in het document SPE.04.004 Specificatie constructieberekeningen zijn de volgende belastinggevallen bepaald: eigen gewicht, windbelasting, ijsbelasting en kortsluiting. Alle belastingen zijn met behulp van Excel berekend. In bijlage D.1 is een gedetailleerde rapportage opgenomen voor het bepalen van de belastingen. De Excel bestanden voor het berekenen van de belastingen zijn ook onderdeel van de tools. Hiermee kunnen de belastingen bepaald worden door een paar parameters in te vullen.

6.1.1 Eigen gewicht

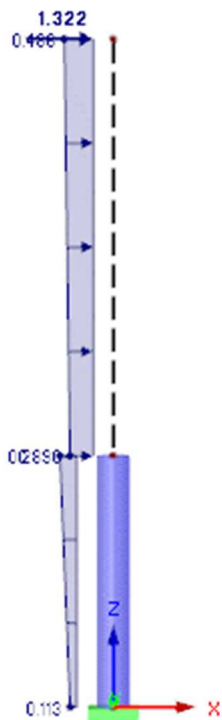
Het eigen gewicht van de constructies is bepaald aan de hand van de inhoud van de ondersteuningsconstructie. Dit is het gewicht van de buis plus het gewicht van de voet-, kop- en stelplaten, het gewicht van het component (dit is gegeven in het productieblad van de fabrikant) en het gewicht van de aluminium buis van de rail.



Afbeelding 6.1: Het belastinggeval eigen gewicht. Bron: RFEM-model

6.1.2 Wind- en ijsbelasting

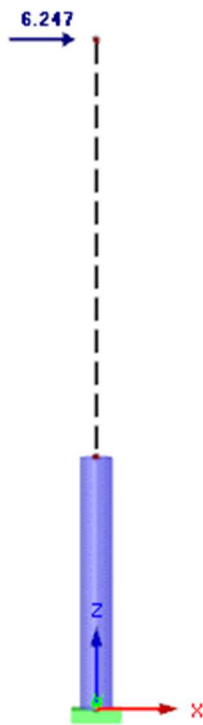
De windbelasting is berekend volgens de NEN-EN 1991-1-4 en de bijbehorende nationale bijlage. Het station bevindt zich in windgebied II aan de kust en er is uitgegaan van terreincategorie II. De extreme stuwdruk ($q_p(z)$) is bepaald aan de hand van tabel NB.5 uit de nationale bijlage. Deze is in een Excel spreadsheet overgenomen en voor een nauwkeurigere bepaling van de $q_p(z)$ zijn er interpolaties opgenomen in de tabel. Met behulp van de functies verticaal zoeken en horizontaal zoeken wordt automatisch de $q_p(z)$ afhankelijk van de hoogte en het windgebied bepaald. De C_f waarde voor de rail is 0,88 en de C_f waarde voor de ondersteuning bedraagt 0,9. De C_f waarde voor de steunisolator kon niet aan de hand van de formules uit de NEN-EN 1991-1-4 berekend worden, dus is er een veilige waarde van 1,5 gekozen (het is een zeer oneffen oppervlak).



Afbeelding 6.2: Het belastinggeval wind. Bron: RFEM-model

6.1.3 Kortsluiting

De kortsluitbelasting is bepaald volgens de NEN-EN-IEC 60865-1_2012 en. Zoals eerder is genoemd is de constructie gemodelleerd als een simple support, dus wordt de belasting gelijk afgedragen op de componenten. Er is voor gekozen om extra tijd te besteden aan de mogelijkheden voor de tool. Om deze reden is er pragmatisch met kortsluitstroombelastingen omgegaan.



Afbeelding 6.3: Het belastinggeval kortsluiting. Bron: RFEM-model

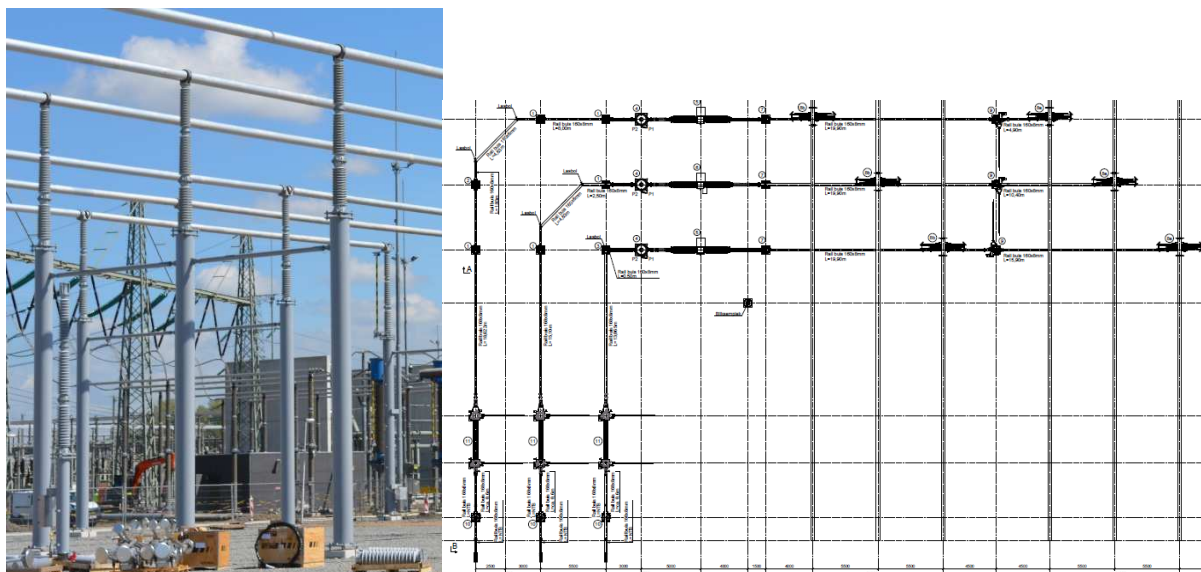
6.2 Ondersteuningsconstructie voor een steunisolator

6.2.1 Uitgangspunten

De toetsing van de ondersteuningsconstructie is volgens de NEN-EN 1993-1-1 uitgevoerd. Er is getoetst op de bezwijkmechanismen druk (normaalkracht), afschuiven (dwarskracht), buiging (moment) en knik. Verder is de maximale uitbuiging in de BGT getoetst, de maximaal toegestane uitbuiging is 1/150 keer de hoogte.

Er is uitgegaan van een steunisolator in het koppelgedeelte van veld 104 of veld 105, omdat hier de pantograafscheiders staan.

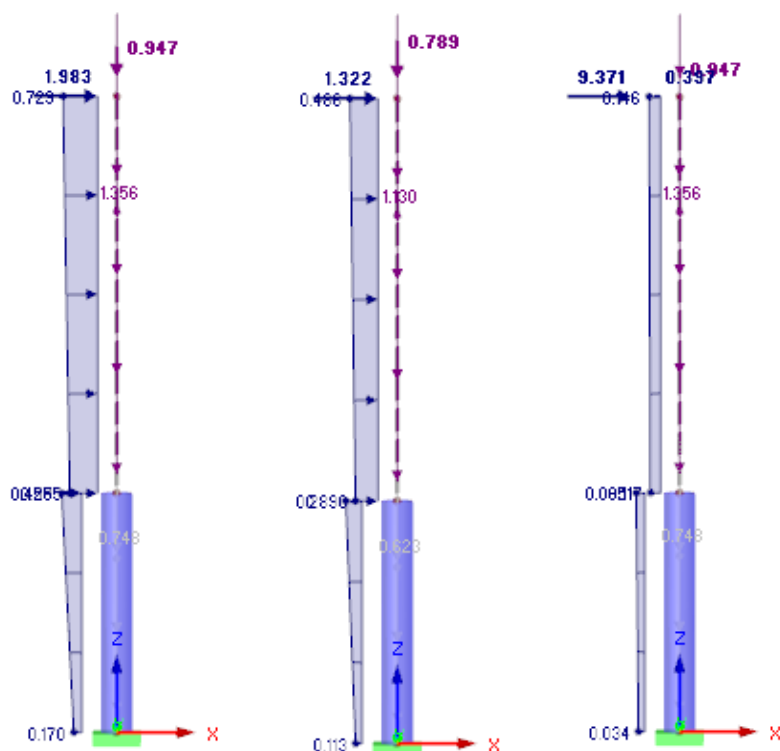
De hoogte van de constructie is 6,65 meter waarbij de hoogte van de ondersteuning 2,5 meter bedraagt, de hoogte van de steunisolator 4,0 meter is en de hoogte van de bovenkant van de steunisolator tot het hart van de rail 0,15 meter bedraagt. In het mechanisch model is de constructie in twee delen opgedeeld: de ondersteuning en de steunisolator. De klemhoogte is hierin meegenomen. Er is gerekend met een buisprofiel 323,9x8 mm. Dit is het buisprofiel dat is gebruikt in de case. Er is een volledige inklemming toegepast (in de echte situatie zal dit een verende inklemming zijn), omdat de grond buiten beschouwing is gelaten. Hierdoor zal er een verschil ontstaan tussen de resultaten van de berekeningen en de realiteit. De steunisolator is als een star onderdeel gemodelleerd en heeft een dwarskrachtcapaciteit van 14 kN (opgave van de fabrikant). In de handberekeningen zijn tweede orde effecten buiten beschouwing gelaten. Verder is er nog een toetsing in RFEM uitgevoerd om de resultaten van de handberekening te controleren. In de berekeningen is elastisch gerekend. Dit is volgens de door TenneT gestelde eis dat er elastisch getoetst dient te worden.



Afbeelding 6.4 en 6.5: Steunisulators van de hoofdrail en bovenaanzicht van veld 104. Bron: Foto en tekening van Petersburg Consultants B.V.

6.2.2 Belastingcombinaties

Voor de toetsing is met de volgende belastingcombinaties gerekend: Max. wind (UGT), max wind (BGT) en de buitengewone combinatie kortsluiting (UGT). Er is gerekend in CC2.



Afbeelding 6.6: Van links naar rechts: De belastingcombinaties max. wind (UGT), max. wind (BGT) en kortsluiting. Bron: RFEM-model

6.2.3 Resultaten van de handberekening

Max. wind (UGT): de hoogste unity check bij de belastingcombinatie max. wind (UGT) bedraagt 0,19 bij het bezwijkmechanisme buiging. De constructie voldoet hiermee ruim aan de gestelde eisen. De waarden van de andere unity checks zijn lager dan 0,1.

Max wind (BGT): bij de BGT is de maximale verplaatsing getoetst. De maximale verplaatsing bedraagt $\frac{1}{150}$ maal 6,65 meter, hieruit volgt een maximaal toegestane verplaatsing van 44,3 mm.

Voor het berekenen van de verplaatsing van de bovenkant van de ondersteuning zijn alle belastingen die hoger dan de bovenkant van de ondersteuning aangrijpen, verplaatst naar de bovenkant van de ondersteuning en hier is een moment aan toegevoegd als gevolg van de verplaatsing. De hoekverdraaiing bedraagt 0,065 graden en de verplaatsing is 1,43 mm ter plaatse van de bovenkant van de ondersteuning. De verplaatsing aan de bovenkant is maximaal 6,13 mm.



Afbeelding 6.7: De verplaatsing van de constructie. Bron: Eigen tekening.

Kortsluiting: de hoogste unity check bij de belastingcombinatie kortsluiting bedraagt 0,47 bij het bezwijkmechanisme buiging. De constructie voldoet hiermee ruim aan de gestelde eisen. De waarden van de andere unity checks zijn lager dan 0,1.

6.2.4 Conclusie

De constructie voldoet in de handberekening ruim aan de gestelde eisen met een maximale unity check van 0,47 bij het bezwijkmechanisme buiging en een maximale verplaatsing van 6,13 mm. Volgens de berekeningen is buiging verreweg het maatgevende bezwijkmechanisme. Wel kunnen er nog optimalisaties uitgevoerd worden qua materiaalgebruik. Zie bijlage E.1 en bijlage E.2 voor het toetsingsrapport en de spreadsheet.

6.3 Ondersteuningsconstructie voor een pantograafscheider

6.3.1 Uitgangspunten

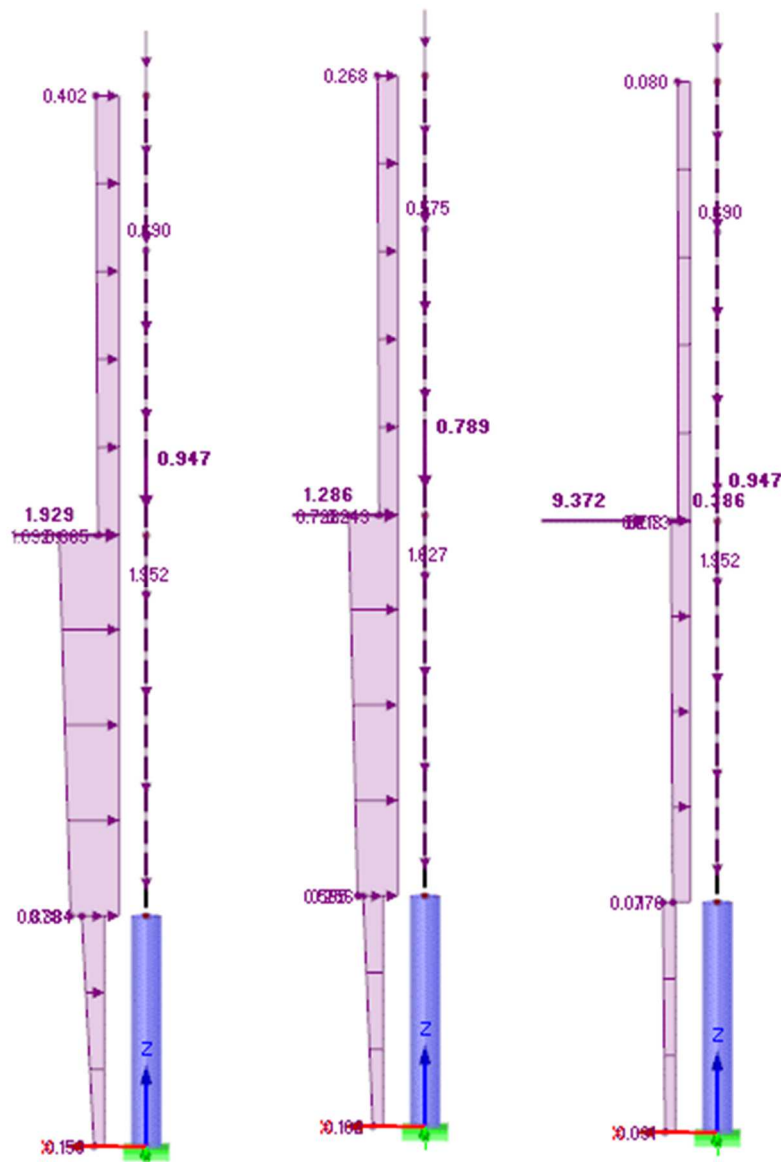
Ook voor de ondersteuningsconstructie van de pantograafscheider geldt dat het bouwwerk getoetst moet worden volgens de NEN-EN 1993-1-1. Verder geldt volgens de TenneT standaarden dat de verplaatsing van de bovenkant van de pantograafscheider maximaal een driehonderdste van de totale lengte van de constructie is. Bij de pantograafscheider resulteert dit in een verplaatsing van 38 millimeter. De specificaties van de constructie komt net als bij de steunisolator uit veld 104 & 105. Dit betekent dat er een staalkwaliteit van S235 geldt en een buisprofiel 323,9x8 mm.



Afbeelding 6.8: Een pantograafscheider in geopende toestand. Bron: Foto van Petersburg Consultants B.V.

6.3.2 Belastingcombinaties

Bij de pantograafscheider gelden dezelfde belastingcombinaties als bij de steunisulator. Wederom worden de BGT, UGT en extreme combinatie behandeld. Ook voor deze combinaties gelden de factoren gegeven in paragraaf 6.2.1. Wat opvallend is, is dat vooral de belastingcombinatie van kortsluiting het hoogst is. Deze combinatie geeft een moment van 72,21 kNm. De reden voor dit hoge buigend moment is de hoge kortsluitbelasting. Deze belasting is een puntlast van 9,37 kN met een arm van 6,65 m.



Afbeelding 6.9: Van links naar rechts: De belastingcombinaties max. wind (UGT), max. wind (BGT) en kortsluiting. Bron: RFEM-model

6.3.3 Resultaten van de handberekening

Voor de pantograafscheider gelden nagenoeg dezelfde belastingen als voor de steunisulator, behalve dat er nog belastingen voor het openen en sluiten van de scheider bij komen. Deze belastingen zijn echter niet meegenomen in de berekening. Verder dient het eigen gewicht van de scheider toegevoegd te worden en is het eigen gewicht van de isolatoren hoger, omdat er twee isolatoren zijn. Doordat de hoogte van de scheider variabel is, komt er ook een andere windbelasting op de constructie. Er is uitgegaan van de meest ongunstige belasting. Hiermee wordt bedoeld dat de uitgeklapte lengte als maatgevend beschouwd.

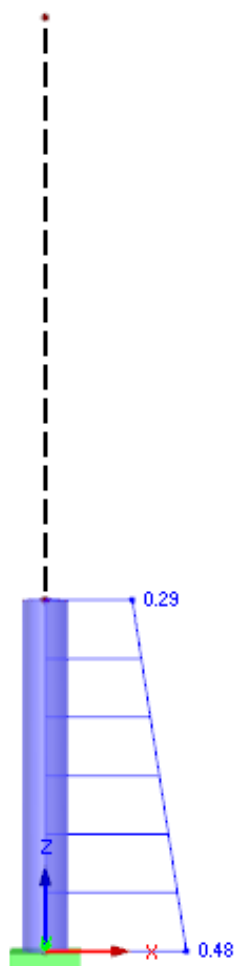
Uit de toetsing op buiging kwam een unity check van 0,51. Het bezwijkmechanisme buiging is hiermee maatgevend. De waarde van de andere unity checks liggen lager dan 0,02. De berekening is terug te vinden in de spreadsheet van bijlage F.3.

6.4 RFEM-rekenmodel

Naast handberekeningen zijn er ook modellen in RFEM gemaakt om de berekeningen te controleren. De verplaatsing zal enigszins afwijken, omdat er in de handberekeningen geen tweede orde effecten zijn meegenomen.

6.4.1 Ondersteuningsconstructie steunisolator

Op het model dat in RFEM is gemaakt zijn dezelfde belastinggevallen en belastingcombinaties geplaatst om te controleren of de in de handberekening bepaalde reactiekrachten kloppen. Na controle bleek dat de reactiekrachten van het RFEM-model overeenkomen met de reactiekrachten in de handberekening. Daarna is met de ontwerpmodule RF-steel EC3 de buis getoetst. Ook hier was het belastinggeval kortsluiting maatgevend en was buiging het maatgevende bezwijkmechanisme. De unity check van RFEM op buiging is 0,48. Zie bijlage E.4 voor het RFEM-model en het toetsingsrapport.



Afbeelding 6.10: De unity check van de ondersteuningsconstructie van de steunisolator. Bron: RFEM-model

6.4.2 Ondersteuningsconstructie pantograafscheider

Uit het RFEM-model van de pantograafscheider kwamen dezelfde waarden als de handberekening. Er is getoetst op druk, knik, buiging en dwarskracht. Een eis van TenneT is dat de ondersteuningen elastisch moeten worden getoetst. De unity check voor de toetsing op buiging is 0,51. Het toetsingsrapport van de ondersteuning is te zien in bijlage G.1.



Afbeelding 6.11: De unity check van de ondersteuningsconstructie van de pantograafscheider. Bron: RFEM-model

6.5 Validatie van de berekeningen

Volgens het plan van aanpak moeten de handberekeningen gevalideerd worden met behulp van RFEM. In onderstaande tabel zijn de maatgevende reactiekrachten en de unity check van het maatgevende bezwijkmechanisme, in dit geval buiging, van de handberekeningen en de RFEM-modellen onder elkaar gezet om de resultaten te vergelijken.

Resultaten berekeningen steunisolator & pantograafscheider BGT				
steunisolator handberekening				
Normaalkracht	Dwarskracht	Moment	Toetsing op buiging	Verplaatsing
9,04 kN	10,46 kN	67,72 kNm	0,47	6,13 mm
Pantograafscheider handberekening				
Normaalkracht	Dwarskracht	Moment	Toetsing op buiging	Verplaatsing
11,85kN	5,68 kN	32,96 kNm	0,51	24,78 mm
Steunisolator RFEM-model				
Normaalkracht	Dwarskracht	Moment	Toetsing op buiging	Verplaatsing
8,44	10,46	67,70 kNm	0,48	9,1 mm
Pantograafscheider RFEM-model				
Normaalkracht	Dwarskracht	Moment	Toetsing op buiging	Verplaatsing
11,85kN	5,68 kN	32,95 kNm	0,51	32,2 mm

Tabel 6.12: Vergelijking van de resultaten tussen de handberekeningen en RFEM. Bron: Eigen werk

Zoals te zien is in de tabel, komen de resultaten tussen de handberekening nagenoeg overeen met die van het RFEM-model. Er zit een klein verschil tussen de normaalkrachten, maar dat komt doordat het gewicht van de platen meegenomen is in de handberekening. Ook zit er verschil in de verplaatsing. Dit komt overeen met de voorspelling die aan het begin van dit hoofdstuk is gedaan.

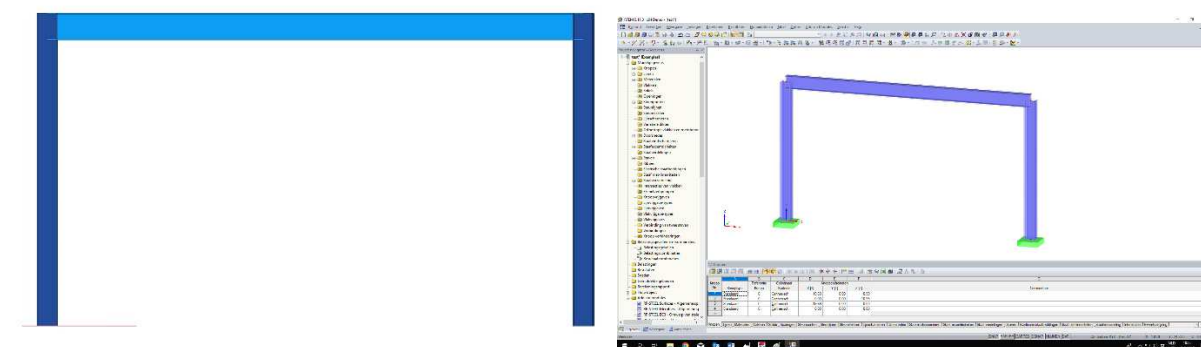
7. Koppelingen

Naast het maken van de verschillende reken- en tekentools is er ook onderzocht hoe de koppelingen tussen de verschillende reken- en 3D modelleerprogramma's werken. Deze koppelingen kunnen goed van pas komen om werk te besparen, omdat een model in principe snel van het ene naar het andere programma wordt gekopieerd. Met behulp van deze koppelingen kan een model van bijvoorbeeld Tekla Structures naar RFEM gekopieerd worden. In de handleiding parametrisch ontwerpen (zie bijlage G) is uitgelegd hoe deze koppelingen opgezet en gebruikt dienen te worden.

7.1 Tekla Structures – RFEM

De koppeling tussen Tekla en RFEM was al eerder onderzocht, maar deze werkte toen niet ideaal. Het kostte veel werk om deze koppeling te maken, want er moest een conversietabel gemaakt worden waarin elk profiel en materiaal uit de databases van Tekla en RFEM naast elkaar moesten staan. Er is besloten om de koppeling opnieuw te onderzoeken, omdat schijnt dat de koppeling verbeterd is sinds dat onderzoek.

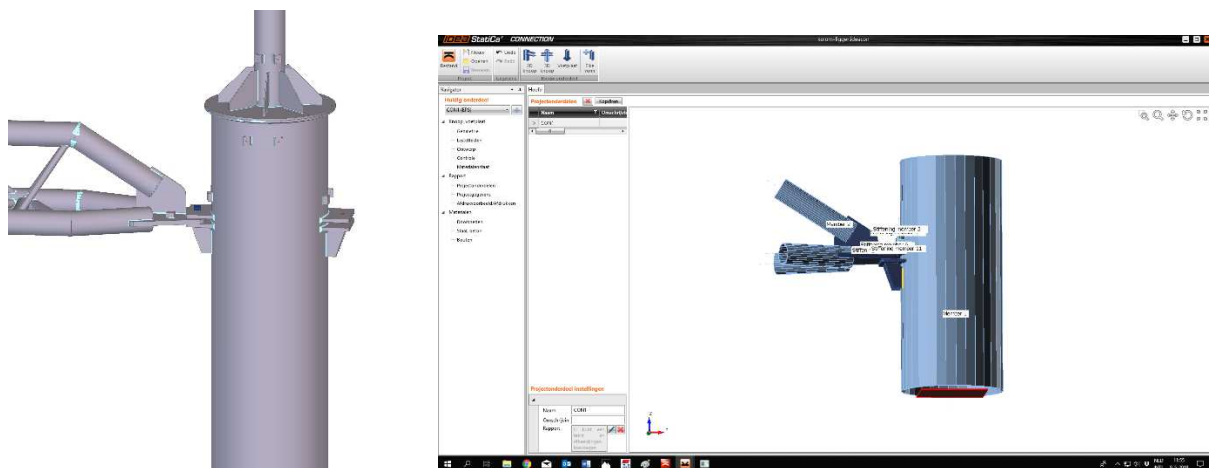
Na verder onderzoek en uitproberen bleek inderdaad dat de koppeling veel beter werkt en ook gebruiksvriendelijker is geworden. Nu hoeft er alleen nog een rekenmodel opgezet te worden in Tekla Structures, kan RFEM opgestart worden en kan het model direct vanuit Tekla geïmporteerd worden. De meeste profielen zal RFEM gelijk herkennen, maar als blijkt dat dit niet het geval is dan kunnen er profielen toegevoegd worden in een conversietabel.



Afbeelding 7.1 en 7.2: Links het model in Tekla Structures, rechts het model geïmporteerd in RFEM Bron: Eigen werk

7.2 Tekla Structures – IDEA Statica/RFEM – IDEA Statica

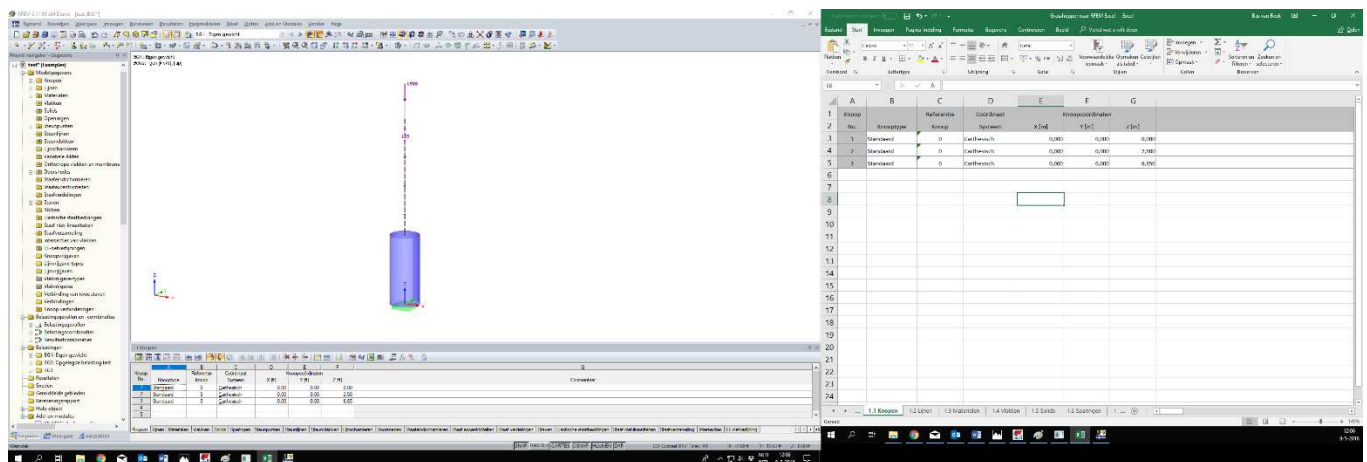
Voor het toetsen van verbindingen is IDEA Statica een ideaal programma. IDEA Statica biedt ook de mogelijkheid om koppelingen op te zetten met verschillende programma's, waaronder RFEM en Tekla Structures. Er is onderzocht hoe deze koppeling werkt en hieruit is gebleken dat de koppeling gebruiksvriendelijk is. De koppeling moet eerst bij de tab BIM van de launcher van IDEA Statica geïnstalleerd worden, daarna moeten er in Tekla Structures een paar knoppen aan het lint toegevoegd worden en in RFEM wordt de koppeling automatisch toegevoegd. Bij het gebruik is het een kwestie van de instructies volgen en de verbinding of knoop is uitgewisseld. Er zijn echter enkele beperkingen in de koppeling. Het is namelijk nog niet mogelijk om de in IDEA Statica getoetste verbinding weer te exporteren naar Tekla, hier wordt echter aan gewerkt en deze functionaliteit zal waarschijnlijk binnen enkele maanden beschikbaar zijn.



Afbeelding 7.3 en 7.4: Links de knoop in Tekla Structures, rechts de knoop geïmporteerd in IDEA Statica. Bron: Eigen werk

7.3 Excel – RFEM

RFEM biedt de mogelijkheid om gegevens naar Excel te exporteren en om gegevens vanuit Excel te importeren. Hiermee kan in principe een heel model in Excel opgezet worden, dit kan dan geïmporteerd worden in RFEM en dan staat het hele model inclusief belastinggevallen en belastingcombinaties in RFEM. Dit kan goed van pas komen bij het maken van modellen met een groot aantal knopen en staven. Het Excel bestand moet echter wel de correcte lay-out hebben en de benaming van de tabbladen moet exact kloppen. Om dit te doen hoeft alleen het model geëxporteerd te worden naar Excel. Deze toepassing is ook gebruikt in het onderzoek.



Afbeelding 7.5 en 7.6: Links het RFEM-model, rechts het Excel bestand. Bron: Eigen werk

8. Evaluatie

Nadat de ontwikkeling van de tools was afgerond, is er besloten om een evaluatie van de tool met het personeel te houden. De evaluatie is gedaan bij het personeel dat aan het begin van de afstudeerperiode is geïnterviewd voor het vooronderzoek ontwerpproces.

De evaluatie houdt in dat het personeel de tools heeft uitgetest en daarna een vragenlijst heeft ingevuld om te bepalen hoeveel tijdswinst de tools potentieel op kunnen leveren, wat de gebruiksvriendelijkheid van de tools is, of de geschreven handleidingen duidelijk zijn en of er nog verbeterpunten zijn. Zie bijlage H voor het verslag, de evaluatieformulieren en de ingevulde evaluatieformulieren.

8.1 Opzet van de evaluatiesessies

Tijdens de evaluatiesessies is er met een groep van twee tot vier personen per sessie gewerkt. De tools waren op een laptop geïnstalleerd en op een groot scherm weergegeven, zodat duidelijk te zien was wat er gebeurde. Er zijn tools voor de tekenaars en constructeurs ontwikkeld. Als eerste zijn de tekentools gedemonstreerd.

hiermee kan in Tekla Structures een parametrisch model opgezet worden. Een onderdeel van de tekentools is een parametrisch component dat is gemaakt in Tekla Structures. Het voordeel van deze tool is dat het model aangepast kan worden door het veranderen van enkele parameters. Dit biedt een oplossing voor het probleem dat het veel tijd vergt om een aanpassing aan te brengen als het model is gemodelleerd zonder gebruik te maken van de tool. Ook is er een onderdeel waarmee de modelgegevens inclusief belastingen naar Excel kunnen worden geëxporteerd, zodat het daarna in RFEM geïmporteerd kan worden. Het voordeel hiervan is dat er nog maar één model gemaakt hoeft te worden dat zowel in Tekla als in RFEM gebruikt kan worden.

Hierna zijn de rekentools gedemonstreerd. Hiermee kan automatisch een buisprofiel bepaald worden, wat een eerste indicatie geeft welk profiel het beste toegepast kan worden. Ook zijn er Excel sheets waarmee snel belastingen bepaald kunnen worden. Na de sessie zijn een aantal evaluatieformulieren aan het personeel uitgedeeld. Omdat er twee doelgroepen zijn, namelijk tekenaars en constructeurs, zijn er twee verschillende evaluatieformulieren gemaakt.

8.2 Evaluatie van de tekentools

De tekenaars reageerden enthousiast op de gedemonstreerde tools en zien veel mogelijkheden om ze in de toekomst toe te passen op projecten. Er moet nog wel veel ontwikkeld worden om de tools daadwerkelijk op een project te kunnen gebruiken, want momenteel kan er een enkel component tegelijk gemodelleerd worden met behulp van deze tool. De tekenaars denken dat als de tools ver genoeg ontwikkeld zijn, dat er flink wat tijd en werk mee bespaard kan worden. Afhankelijk van de complexiteit en grootte van het project, schatten de tekenaars in dat met deze tools de helft van de benodigde tijd voor het tekenen bespaard kan worden. Let hierbij wel op dat dit per project kan verschillen.

Als er wordt uitgegaan van de hierboven genoemde tijdsbesparing, dan zou een tekenaar met deze tools twee keer zoveel werk kunnen verrichten. Dit geeft het bedrijf een sterkere concurrentiepositie, omdat dit een toename van de winst betekent wat weer de mogelijkheid biedt om voor een project een lagere prijs aan te bieden zonder dat er kwaliteitsverlies optreedt. Er is in dit geval geen calculatie gedaan wat dit qua winst op zou kunnen leveren, omdat de desbetreffende tool een prototype is waarmee een enkel component gemodelleerd kan worden. Hier kan pas een goede inschatting van gemaakt worden als er op projectniveau mee gemodelleerd wordt.

Verder is er in de evaluatie nog ingegaan op de gebruiksvriendelijkheid van de tools, de handleidingen en of er nog verbeterpunten zijn. De tekenaars vinden de tools in het eerste opzicht goed te gebruiken, maar Grasshopper lijkt een warrig programma en het kan tijd vergen om te leren met het programma te werken. Het is daarom ook belangrijk dat de tools duidelijk en gestructureerd worden opgebouwd om de modellen

overzichtelijk te houden. Dit is in deze tools wel het geval, dus dat is hier geen probleem. Het is aan te raden om één of twee ontwikkelaars of specialisten aan te stellen voor de doorontwikkeling van de tools. De handleidingen zijn niet uitgebreid doorgenomen, maar de tekenaars vinden de handleidingen in het eerste opzicht duidelijk en overzichtelijk.

8.3 Evaluatie van de rekentools

Net als de tekenaars was de reactie van de constructeurs op de gedemonstreerde tools positief. Ze zien veel potentie in de tools en denken dat ze goed van pas kunnen komen op projecten, mits ze verder doorontwikkeld worden. Ook denken ze dat er met behulp van de tools veel tijd bespaard kan worden in het ontwerpproces. Eén van de constructeurs denkt dat er zelfs drie uur werk bespaard kan worden op iets wat normaal een halve dag kost. Als er een voorzichtige schatting gemaakt wordt dan kan er een halvering van de benodigde tijd gerealiseerd worden bij een project.

Als er wordt uitgegaan van de hierboven genoemde schatting, dan zou een constructeur met deze tools twee keer zoveel werk kunnen verrichten. Zoals in de vorige paragraaf is genoemd, biedt dit het bedrijf een sterkere concurrentiepositie.

Een gevaar van dergelijke tools is wel dat de gebruikers de resultaten die uit de tool naar voren komen niet controleren, waardoor er ontwerpfouten kunnen ontstaan. Echter kunnen de tools veilig gebruikt worden, mits ze gevalideerd zijn en er duidelijke handleidingen voor beschikbaar zijn. Verder is er in de evaluatie nog ingegaan op de gebruiksvriendelijkheid van de tools en de handleidingen en of er nog verbeterpunten zijn.

De constructeurs vinden de gebruiksvriendelijkheid van de tools verder goed en ze zijn per onderdeel gegroepeerd, waardoor het geheel overzichtelijk blijft. Verder vinden de constructeurs de spreadsheets die zijn gemaakt ook een goede aanvulling. Ze maken het bepalen van de belastingen (voornamelijk windbelastingen) een stuk makkelijker. Wel moeten de parameters per spreadsheet apart ingevoerd worden, wat ze foutgevoeliger maakt. Als dit op een centrale plek gebeurt, dan zou dit beter zijn.

Wat betreft de handleidingen vinden de constructeurs ze overzichtelijk, omdat de uitleg wordt ondersteund met afbeeldingen. De handleidingen zijn ook belangrijk als iemand anders met de tools gaat werken of ze verder gaat ontwikkelen.

Over het algemeen is het een goed begin, maar er moet nog het een en ander toegevoegd worden om ze goed te kunnen gebruiken. Zo moet er nog een toets op verplaatsing toegevoegd worden en moeten er nog rotatiestijfheden toegevoegd worden. Nu wordt er nog uitgegaan van een volledige inklemming.

9. Conclusie

Tijdens het afstudeeronderzoek is gekeken of er antwoord gegeven kan worden op de volgende onderzoeksvraag: "Op welke manier kan het ontwerpproces van een hoogspanningsstation geautomatiseerd en geoptimaliseerd worden?"

Het antwoord op deze onderzoeksvraag is dat dit het beste kan door middel van op maat gemaakte software tools met daarbij duidelijke handleidingen voor het gebruik van deze tools.

Door Grasshopper toe te passen zijn er veel mogelijkheden om te automatiseren. Door gegevens te putten uit een centrale bron, zoals gebeurd met het Grasshopper hoofdmodel (zie hoofdstuk 5), kunnen alle modellen gegenereerd worden door middel van dezelfde input. Zo krijgt het tekenmodel in Tekla gemeenschappelijke eigenschappen met het rekenmodel in RFEM. Ook is gebleken dat het niet nodig is om voor elk project een specifiek model te maken. Als de modellen op de juiste manier zijn opgezet, hoeft er maar één model gemaakt te worden die zowel in Tekla Structures als RFEM geïmplementeerd kunnen worden. Tijdens de evaluatie heeft het personeel van Petersburg Consultants B.V. aangegeven dat de te besteden tijd per project maar liefst gehalveerd kan worden.

Waar het eerst vereist was voor de tekenaars om met Tekla handmatig onderdelen van bouwwerken op elkaar te slepen en opnieuw te plaatsen bij elke kleine verandering, is het nu mogelijk om veranderingen aan te geven in Grasshopper waarna het tekenmodel automatisch wordt aangepast en de Tekla componenten automatisch worden ingeladen.

De constructeur kan nu gemakkelijk de belastingen uit zijn specifieke Excel bestanden lezen en kan aan de hand van de opgegeven geometrie automatisch het RFEM-model maken. Het is dus niet meer nodig om een apart rekenmodel te maken. Met behulp van Excel spreadsheets kunnen met het invullen van een paar parameters belastingen berekend worden.

Een ander onderdeel van de onderzoeksvraag heeft betrekking op optimalisatie van een ontwerp. Hiervoor is hoofdzakelijk de tool uit paragraaf 5.4 ontwikkeld. Met relatief eenvoudige berekeningen is laten zien hoe een "solver" ingezet kan worden om door middel van iteratiestappen een antwoord te optimaliseren. Door middel van een "fitness functie" minimaliseert de berekening het gewicht van het te kiezen buisprofiel.

10. Aanbevelingen

Een belangrijke aanbeveling aan Petersburg Consultants B.V. is om goed na te denken welke ontwerpen goed te automatiseren zijn en of dit veel tijd bespaart. Tijdens de evaluatie van de tool ontstond veel speculatie over het toepassen van een Grasshopper model voor een hoogspanningsstation in zijn geheel. Het is interessant om te kijken of er geïnvesteerd kan worden in het opzetten van een parametrisch model voor een hoogspanningsstation. Aangezien de vooruitzichten zijn dat de energiebehoefte toeneemt, is het mogelijk om hierop in te spelen door alvast een parametrisch ontwerp op te zetten. Dit kan goed van pas komen bij toekomstige projecten. Het is belangrijk om een goede praktische toepassing te vinden voor een automatisch parametrisch ontwerp. Aan het begin van het proces kan het handig zijn om een inschatting te maken in hoeverre het efficiënt is om een model te parametriseren. Het kan op een gegeven moment efficiëntie verliezen om alles aan één ontwerp te parametriseren.

Momenteel is Petersburg Consultants B.V. flink aan het groeien. De communicatie onderling verloopt nog goed, omdat projectteams bij elkaar op dezelfde afdeling zitten en omdat het pand niet al te groot is. Later zou het kunnen gebeuren dat een groter kantoor in gebruik wordt genomen of dat er op meerdere locaties gewerkt zal worden. Een parametrisch hoofdmodel dat gebruik maakt van een centrale databank kan dan communicatiefouten voorkomen. In plaats van dat een constructeur mondeling een tekenaar inlicht over het feit dat er een buisprofiel wordt veranderd, hoeft hij alleen maar een parameter in de centrale databank te veranderen. Het is natuurlijk wel belangrijk dat er goede afspraken worden gemaakt over hoe een verandering doorgevoerd moet worden.

Ook is het van belang dat, voordat er ingewikkelde stations modellen worden gebouwd, er eerst een duidelijk plan komt over hoe deze modellen worden opgebouwd. Er kan voor worden gekozen voor een groot model waar alles in zit of voor meerdere kleine modellen die samen een geheel vormen. Aangezien de drempel voor het leren van Grasshopper vrij laag ligt, is het interessant om een ingenieur die langer in het bedrijf zit kundig te maken met het programma. Met deze kennis kan een ervaren ingenieur het beste inschatten waar de grootste kansen liggen met betrekking tot het gebruik van de nieuwe middelen. In het voortraject is het ook van belang om de data van de constructeur gestructureerd op te slaan.

Tijdens het vooronderzoek en de evaluatie is gebleken dat er nog niet veel bouwbedrijven in de markt bezig zijn met het gebruik van parametrische modellen. Ook bleek in de gesprekken met school dat er nog weinig wordt gewerkt met programma's die dit soort functionaliteiten bieden. Het is belangrijk dat Petersburg Consultants B.V. zich bewust is van het feit dat deze software en tools een mogelijke voorsprong kunnen geven op de competitie in de markt. Het is aan Petersburg Consultants B.V. of zij bereid zijn om in deze mogelijkheden te investeren. Als dit het geval is dan kan dat veel winst opleveren.

Als Petersburg Consultants B.V. parametrische modellen wilt gaan maken met Grasshopper en gebruiken zijn er twee zaken van belang. Allereerst is het verstandig als het management team een richting opgeeft. Het M.T. kan het beste een verwachting geven over wat voor een soort opdrachten er binnen gaan komen. Hoe vaker men een parametrisch model gebruikt hoe meer het oplevert. Verder is het van belang dat er een expert wordt aangenomen op het gebied van deze parametrische modellen. Het kan veel tijd, geld en irritaties besparen als er geen beginnersfouten worden gemaakt in de modellen. Daarbij zal een goede wisselwerking tussen Grasshopper modelleur, constructeur en tekenaar erg van belang zijn.

Bibliografie

- Adviesbureau van Meijl-Verhaegh. (sd). *Msc engineering support*. Opgeroepen op maart 1, 2018, van Msc engineering: <https://support.msc-engineering.nl/support/solutions/articles/8000023992-modellen-van-tekla-importeren-in-rfem>
- Construsoft B.V. (sd). *Basisopleiding Tekla Structures Steel Detailing, Gebruikers componenten*. Uitgegeven in eigen beheer. Opgeroepen op maart 1, 2018
- De BIM specialist. (2014, Maart 11). *Wat is BIM*. Opgeroepen op Maart 06, 2018, van de BIM specialist: http://www.debimspecialist.nl/wat_is_bim/
- Eastman, C. M. (1975, Januari 09). The use of computers instead of drawings in building design. *AIA journal*, 5. Opgeroepen op Maart 6, 2018
- Het nationaal BIM platform. (sd). *Geschiedenis van BIM*. Opgeroepen op Maart 6, 2018, van Het nationaal BIM platform: <https://hetnationaalbimplatform.nl/geschiedenis-van-bim.php>
- Het nationaal BIM platform. (sd). *Wat is BIM*. Opgeroepen op Maart 6, 2018, van Het nationaal BIM platform: <https://hetnationaalbimplatform.nl/wat-is-bim.php>
- Hoogspanningsnet. (2018, 02 15). *Hoogspanningsnet*. Opgehaald van hoogspanningsnet.com: <https://www.hoogspanningsnet.com/>
- Hulst, B. B. (2017). *Basisboek Interviewen*. Groningen: Noordhoff Uitgevers bv.
- IDEA. (2017). *IDEA Statica BIM Tekla link*. Opgeroepen op maart 14, 2018, van IDEA Statica: https://www.ideastatica.com/resource/#04_BIM/Tekla/Tekla_link-teaser.htm%3FTocPath%3DBIM%7CCAD%2520oprograms%7CTekla%2520Structures%7C_____1
- IDEA. (2018, 3 1). *Concrete*. Opgehaald van ideastatica: <https://www.ideastatica.com/concrete/>
- jamiecbowden. (2018, 3 1). *Workshop #4 Grasshopper*. Opgehaald van www.jamiecbowden.wordpress.com: <https://jamiecbowden.wordpress.com/workshop-4/>
- MSC engineering. (2018, Januari 22). *MSC engineering support*. Opgeroepen op Maart 10, 2018, van MSC engineering: <https://support.msc-engineering.nl/support/solutions/articles/8000044783-stappenplan-voor-correcte-export-vanuit-tekla-structures-naar-idea-connection->
- Nationaal BIM handboek. (2012, Februari 2). *BIM*. Opgeroepen op Maart 6, 2018, van Nationaal BIM handboek: <http://nationaalbimhandboek.nl/woordenboek/bim/>
- NEN. (2001). *NEN-EN 50341-3. Bovengrondse elektrische lijnen boven 45 kV wisselspanning - Deel 3: Verzameling van nationale normatieve aspecten*. Delft, Zuid-Holland, Nederland: NEN. Opgeroepen op April 10, 2018
- NEN. (2006). *NEN-EN 1993-1-1. Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (inclusief C1:2006)*. Delft, Zuid-Holland, Nederland: NEN. Opgeroepen op April 10, 2018

-
- NEN. (2011). *NEN-EN 1991-1-4+A1+C2. Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting*. Delft, Zuid-Holland, Nederland: NEN. Opgeroepen op April 10, 2018
- NEN. (2011). *NEN-EN 1991-1-4+A1+C2/NB. Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-4+A1+C2: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting*. Delft, Zuid-Holland, Nederland: NEN. Opgeroepen op April 10, 2018
- NEN. (2011). *NEN-EN-IEC 60865-1. Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods (IEC 60865-1:2011, IDT)*. Delft, Zuid-Holland, Nederland: NEN. Opgeroepen op April 10, 2018
- NEN. (2013). *NEN-EN 50341-1. Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV - Part 1: General requirements - Common specifications*. Delft, Zuid-Holland, Nederland: NEN. Opgeroepen op April 10, 2018
- Nijmegen, H. A. (2018, 2 12). *cmd method pack*. Opgehaald van cmdmethods: <http://cmdmethods.nl/>
- Oirsouw, I. P. (2012). *Netten voor distributie van elektriciteit*. Arnhem, Nederland: Phase to Phase B.V. (uitgegeven in eigen beheer). Opgeroepen op 2018
- Robert McNeel & Associates. (2018, 3 1). *Features*. Opgehaald van Rhino3d: <https://www.rhino3d.com/6/features>
- Strobbe, T. (2011). *Onderzoek naar de inzetbaarheid van parametrische ontwerpstrategieën*. Universiteit van Gent, Ingenieurswetenschappen en Architectuur, Gent. Opgeroepen op Maart 8, 2018
- TenneT TSO B.V. (2011). *Primaire installaties, Standaard programma van eisen (PVE.01.000)*. Ede: TenneT TSO B.V. (eigen beheer). Opgeroepen op Februari 2018
- TenneT TSO B.V. (2011). *Richtlijnen constructieberekeningen (ENG.04.001)*. Ede: TenneT TSO B.V. (eigen beheer). Opgeroepen op Februari 2018
- TenneT TSO B.V. (2014). *SPE.04.004 Specificatie Constructieberekeningen*. Ede: TenneT TSO B.V. (eigen beheer). Opgeroepen op maart 5, 2018
- Trimble. (2018, 2 14). *What is BIM?* Opgehaald van www.tekla.com: <https://www.tekla.com/about/what-is-bim>

11. Bijlagen

Bijlage A Vooronderzoeken

Bijlage A-1 Civiele en elektrotechnische achtergronden

Bijlage A-2 Ontwerpproces

Bijlage A-3 Softwarepakketten

Bijlage A-4 BIM & Parametrisch ontwerpen

Bijlage B Ontwerpproces in grote lijnen

Bijlage C Handleiding Schematisch Modelleren

Bijlage D Belastingen bepalen

Bijlage D-1 Rapportage

Bijlage D-2 Spreadsheets

Bijlage E Controleberekening steunisolator

Bijlage E-1 Verslag

Bijlage E-2 Spreadsheet

Bijlage E-3 Tekeningen

Bijlage E-4 RFEM toetsing

Bijlage F Controleberekening pantograafscheider

Bijlage F-1 RFEM toetsing

Bijlage F-2 Verslag

Bijlage F-3 Spreadsheet

Bijlage G Handleiding parametrisch ontwerpen

Bijlage H Evaluatie

Bijlage H-1 Verslag

Bijlage H-2 Evaluatieformulieren

Bijlage H-3 Inge vulde evaluatieformulieren

Bijlage I Procesverslag