

2019 • 2020

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterthesis

Ontwerp van een energieopwekking- en energieopslagsysteem voor
een pluimveebedrijf in Senegal

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Wim DEFERME

PROMOTOR :

Dhr. Manfred AENDENBOOM

BEGELEIDER :

ing. Inge VERBOVEN

Thomas Snijders, Kristof Van Wassenhove

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie,
afstudeerrichting elektrotechniek

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2019 • 2020

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterthesis

Ontwerp van een energieopwekking- en energieopslagsysteem voor
een pluimveebedrijf in Senegal

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Wim DEFERME

PROMOTOR :

Dhr. Manfred AENDENBOOM

BEGELEIDER :

ing. Inge VERBOVEN

Thomas Snijders, Kristof Van Wassenhove

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie,
afstudeerrichting elektrotechniek



KU LEUVEN

*Deze masterproef werd geschreven tijdens de COVID-19 crisis in 2020.
Deze wereldwijde gezondheids crisis heeft mogelijk een impact gehad op
de opdracht, de onderzoekshandelingen en de onderzoeksresultaten.*

Woord vooraf

Voor onze masterproef hebben wij gekozen om een ontwikkelingsproject uit te voeren in Afrika. Na enkele vergaderingen met Students for Energy in Africa, viel de beslissing op een project in Senegal. Daar hebben we een energie-installatie opgebouwd om de energieproblemen van “Le Coquetier Social” op te lossen. Bij dit project hebben we niet enkel de kans gekregen om een installatie theoretisch uit te werken, maar ook om dit in de praktijk op te bouwen. Dit gaf ons meer inzicht in het correct ontwerpen van een volledige installatie. Naast technische inzichten hebben we ook een beter beeld gekregen op de situatie in Senegal, zoals de eeuwige gastvrijheid van de lokale bevolking, maar ook de armoede en de problemen die hieruit voortkomen.

Wij willen alle leden van Students for Energy in Africa bedanken voor deze bijzondere kans om dit project te mogen uitvoeren. We willen vooral prof. dr. ir. Wim Deferme en ing. Inge Verboven bedanken om ons vanaf de eerste dag bij te staan met al onze vragen, en ons te ondersteunen. Dit is voor ons beide een onvergetelijke ervaring geweest, die ons zonder twijfel een andere blik op de wereld heeft gegeven. Daarnaast willen wij ook Laurien Stuyvers bedanken, voor de vlotte repatriëring bij de COVID-19-Uitbraak.

Eveneens willen wij Afractie bedanken om ons de mogelijkheid te bieden dit project uit te voeren, en ons bij te staan met advies. We willen in het bijzonder de ondervoorzitster van Afractie, Nina Van Hulle, bedanken om ons te ondersteunen tijdens ons verblijf en ons te begeleiden tijdens ons Senegalese avontuur.

Daarnaast gaat onze dank uit naar de plaatselijke bevolking die ons geholpen heeft bij het verwezenlijken van het project. Bedankt Top, Aliou, Ama, Iba en Momo voor jullie harde werk tijdens elke fase van het project. Ook willen wij de lokale handelaars bedanken die altijd hun best deden om ons zo goed mogelijk te helpen.

Ook willen wij iedereen bedanken die ons heeft geholpen met onze technische vragen. Bedankt ir. Geert Vandensande voor de hulp bij de elektrische installatie, bedankt prof. dr. ing. Bram Vandoren en prof. dr. ir. Kris Henriouille voor jullie klare kijk op de sterkteberekeningen. Zeker ook bedankt Frederik, om ons te helpen bij het dimensioneren van de funderingen, de hulp bij Diamonds en om mee geld in te zamelen.

Daarnaast wil ik, Kristof, mijn ouders en zus bedanken voor alle steun en hulp, die ze gegeven hebben bij de geldinzamelingen en het schrijven van de thesis. Ook wil ik mijn vrienden, en vooral Maarten Verstraelen, Selena Spanoghe en Pritilata Willems, bedanken voor de steun in de moeilijke momenten wanneer het allemaal te veel werd.

Als laatste wil ik, Thomas, mijn ouders bedanken voor alle steun en advies die ik van jullie gekregen heb. Zowel tijdens de voorbereidingen als bij de geldinzamelingen, en natuurlijk de pastadag. Ook Serge en Miet verdienen een bedankje, voor alle hulp die ik van hun gekregen heb. En last but not least, wil ik mijn vriendin, Lotte, bedanken. Ik kon altijd op jou rekenen, wanneer het even te druk werd. Jij slaagde er telkens weer in om mij terug te motiveren. Bedankt voor alles!

Inhoud

Woord vooraf	3
Lijst van tabellen	7
Lijst van figuren	9
Verklarende woordenlijst	11
Abstract	13
Abstract in English	15
1 Inleiding	17
1.1 Situering.....	17
1.2 Probleemstelling.....	18
1.3 Doelstellingen.....	18
1.3.1 Doelstelling.....	18
1.3.2 Projectparameters.....	18
1.3.3 Omgeving en locatie van het pluimveebedrijf.....	19
1.4 Methodiek.....	19
2 Literatuurstudie	21
2.1 Inleiding.....	21
2.2 Energiebronnen.....	21
2.2.1 Zonne-energie.....	21
2.2.2 Windenergie.....	26
2.2.3 Energie uit biomassa en biobrandstoffen.....	34
2.3 Energieopslagmethoden.....	40
2.3.1 Batterijen.....	40
2.3.2 Waterstofgas.....	44
2.4 Conclusie.....	46
3 Ontwerpkeuzes	47
3.1 Keuze van de energiebron.....	47
3.1.1 Dimensionering van een PV-installatie.....	47
3.1.2 Dimensionering van een windturbine.....	48
3.1.3 Dimensionering van een biomassainstallatie.....	49
3.1.4 Vergelijking tussen de energiebronnen.....	49
3.2 Keuze van het torenontwerp.....	50
3.2.1 Vakwerktoren.....	51
3.2.2 Tilt-up toren.....	54
3.2.3 Vergelijking van de torenontwerpen.....	54
3.3 Keuze van de energieopslagmethode.....	55
4 Mechanisch ontwerp van de windmolen	57
4.1 Inwerkende krachten.....	58

4.1.1 Windkracht op de toren	58
4.1.2 Windkracht op de rotor.....	62
4.1.3 Gewicht van de windmolen	63
4.2 Sterkteberekening	65
4.3 Fundering	68
4.4 Toren	74
4.5 Schuine balken	75
4.6 Kabels.....	77
4.7 Kantelmechanisme	79
4.8 Wieken.....	81
4.8.1 Theoretisch model	81
4.8.2 Simulatiemodel	88
4.8.3 Praktisch model	91
4.9 Windvaan.....	97
4.10 Conclusie mechanisch ontwerp.....	98
5 Elektrisch ontwerp van de windmolen.....	101
5.1 Overzicht van de elektrische installatie	101
5.2 Generator.....	103
5.3 Controller.....	105
5.4 Batterijen.....	106
5.5 Invertor	108
5.5.1 Instellingen invertor	109
5.6 Kabelberekeningen	111
5.6.1 Kabelberekening driefasige kabel tussen windmolen en controller	111
5.6.2 Kabelberekening eenfasige kabel tussen netaansluiting en invertor	116
5.6.3 Kabelberekening eenfasige kabel tussen invertor en gebruikers	116
5.6.4 Kabelberekening gelijkstroomkabel tussen controller en invertor	117
5.6.5 Kabelberekening gelijkstroomkabel tussen batterijen	117
5.7 Conclusie elektrisch ontwerp	118
6 Kostenanalyse	119
6.1 Kosten	119
6.2 Terugverdientijd	120
6.3 Conclusie kostenanalyse	124
7 Conclusie	125
Bibliografie.....	127
Bijlagen	137

Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht van de aanwezige verbruikers	19
Tabel 2: Aanwezige essentiële verbruikers	19
Tabel 3: Gemiddelde stralingsintensiteit per maand in Ndiéguène.....	23
Tabel 4: Invloed van de omgeving op exponent a	26
Tabel 5: Gemiddelde meetwaardes wind in Senegal op 50m	27
Tabel 6: Vergelijking van een rotor met twee of drie wieken	32
Tabel 7: Samenstelling biogas	37
Tabel 8: Voor- en nadelen van de mogelijke energiebronnen	50
Tabel 9: Vergelijking van een vakwerktoren en een tilt-up toren.....	55
Tabel 10: Vergelijking energieopslag in batterijen en waterstofgas.....	56
Tabel 11: De lengte van de koorde, axiale- en tangentiële inductiefactor op de 11 beschouwde punten op de wiek.....	87
Tabel 12: Belangrijkste mechanische parameters windmolen.....	98
Tabel 13: Eigenschappen van de WindPMG 1000 generator van 48V	104
Tabel 14: Overzicht van de beschikbare batterijen.....	107
Tabel 15: Vergelijking tussen de opstelling met batterijen van type 1 en type 2	107
Tabel 16: Eigenschappen van de Bo Yang 6-GFM-200	108
Tabel 17: Werkingsmodes van de WHC-Solar 3048.....	109
Tabel 18: Mogelijke instellingen voor de laadstroom van de WHC-Solar 3048	110
Tabel 19: Mogelijke instellingen type batterij WHC-Solar 3048	111
Tabel 20: Vermogens van de WindPMG1000 generator	111
Tabel 21: Correctiefactoren driefasige kabel tussen windmolen en controller.....	112
Tabel 22: Overzicht van de gemaakte kosten	119
Tabel 23: De beschouwde curves bij iedere windsnelheid.....	122
Tabel 24: De vermogendatasets uit QBlade, de gecombineerde dataset, de discrete waarden van de Weibull-verdeling en het gemiddeld opgewekte vermogen per windsnelheid	233

Lijst van figuren

Figuur 1: Eén van de kippenstallen in Le Coquetier Social.....	17
Figuur 2: Elektron-gat paar generatie	23
Figuur 3: Stroom- spanningskarakteristiek van een zonnecel	24
Figuur 4: Ratio van diffuse en directe instraling normaal aan een zonnepaneel onder vaste hellingshoek of volgens een volgmechanisme ten opzichte van horizontale plaatsing	25
Figuur 5: Weibull-verdeling in Kayar.....	28
Figuur 6: Vergelijking horizontale en verticale as windturbine	28
Figuur 7: Opbouw van een horizontale as windmolen.....	29
Figuur 8: Vier mogelijke manieren om de toren op te bouwen.....	30
Figuur 9: Verband tussen C_p en tip-speed-ratio	31
Figuur 10: Krachten op de wieken van een door lift aangedreven windturbine	32
Figuur 11: Vergelijking tussen biomassa en fossiele brandstoffen.....	34
Figuur 12: Overzicht van processen van biomassa naar brandstoffen, energie en warmte..	35
Figuur 13: Schematische weergave van een installatie voor vergassing van biomassa type downdraft gasifier	36
Figuur 14: Overzicht van mogelijke toepassingen van biogas	38
Figuur 15: Voorbeeld van een biomassacentrale voor de productie van elektriciteit	39
Figuur 16: Overzicht van verschillende opslagtechnieken met hun capaciteit in functie van de ontlaadtijd	40
Figuur 17: Opbouw van een cel	41
Figuur 18: Energiedichtheidsdiagram van enkele veelvoorkomende batterijtypes	42
Figuur 19: Opbouw van een cel van een lood-zwavelzuurbatterij	42
Figuur 20: Cycle life van een loodzuurbatterij in functie van de ontladingsdiepte, bij verschillende werkingstemperaturen	44
Figuur 21: Een schematische tekening van een proton-exchange membrane brandstofcel	45
Figuur 22: 3D-concepttekening van een vakwerkmodule	51
Figuur 23: Concepttekening zijaanzicht onderste vakwerkmodule	51
Figuur 24: Inwerkende krachten op de windmolen	52
Figuur 25: Concept van de windmolen	57
Figuur 26: Het Strouhalgetal in functie van het Reynoldsgetal.....	59
Figuur 27: De weerstandscoëfficiënt van een cilindervormige buis in functie van het Reynoldsgetal.....	61
Figuur 28: De geometrie van de windmolen in Diamonds	66
Figuur 29: Stabiliteitscontrole van de windmolen bij maximale gebruikswindsnelheid (25 m/s) volgens de richting van een kabel	67
Figuur 30: Sterktecontrole van de windmolen bij maximale gebruikswindsnelheid (25 m/s) volgens de richting van een kabel	67
Figuur 31: Drukverdeling onder de fundering	70
Figuur 32: De put voor de fundering.....	72
Figuur 33: Het vooraanzicht van de wapening in de fundering.....	73
Figuur 34: (a) Het buitenaanzicht en (b) binnenaanzicht van de fundering met de wapening	73
Figuur 35: De wapening van de fundering.....	74
Figuur 36: De afgewerkte fundering.....	74
Figuur 37: De onderste buis van de toren, met de verbindingbuis die er ingeschoven is...	74
Figuur 38: De buizen voor de toren.....	74
Figuur 39: De vier schuine balken	75
Figuur 40: Concepttekening van de schuine balken met de onderkant van de windmolen .	76
Figuur 41: Concepttekening van (A) vooraanzicht en (b) bovenaanzicht van de bus waarmee de schuine balken aan de toren bevestigd worden. In (b) is de toren in het midden zichtbaar.	76

Figuur 42: De put voor de kabelfundering met het wapeningsijzer	78
Figuur 43: De kabelfundering nadat het beton gegoten is	78
Figuur 44: De wapening van de kabelfundering waar de katrol aan bevestigd wordt.....	79
Figuur 45: (a) Bovenaanzicht, (b) achteraanzicht en (c) zijaanzicht van het kantelmechanisme	80
Figuur 46: De balken die gebruikt worden om de toren te kantelen.....	80
Figuur 47: De actuator disc die beschouwd wordt in de momentum theorie.....	82
Figuur 48: Karakteristieke hoeken, windsnelheden en krachten op een windmolenwiek volgens de blade element theorie.....	82
Figuur 49: Een doorsnede van het SD7032-vleugelprofiel op de gemiddelde koorde	85
Figuur 50: De (verhoudingen) tussen de liftcoëfficiënt C_l en weerstandscoëfficiënt C_d in functie van de invalshoek α	86
Figuur 51: Drukverdeling rond een wiek in QBlade	88
Figuur 52: Het model van de wieken in QBlade	89
Figuur 53: Het mechanisch vermogen van de windmolen in functie van de windsnelheid bij 50 RPM (rood), 100 RPM (groen) en 150 RPM (blauw)	89
Figuur 54: Het interval van de vermogenscoëfficiënt in functie van de windsnelheid.	90
Figuur 55: Het verloop van het vermogen bij een windsnelheid van (A) 3.56 m/s, (B) 8 m/s. (c) Het effect van vortices is zichtbaar achter de rotor	91
Figuur 56: De drie regio's van een wiek	91
Figuur 57: De afmetingen (in mm) van de balken voor de constructie van een wiek	92
Figuur 58: De inwerkende krachten op een windmolenwiek.....	93
Figuur 59: De drie wieken, voor het schaven	96
Figuur 60: Ontwerp van de windvaan	97
Figuur 61: Belangrijkste parameters van de windmolen in (a) zijaanzicht en (b) vooraanzicht	99
Figuur 62: Elektrisch schema.....	102
Figuur 63: De WindPMG 1000 generator.....	104
Figuur 64: WindPMG 3 kW MPPT wind solar controller	105
Figuur 65: Aansluitmogelijkheden op de WindPMG 3 kW MPPT wind solar controller	106
Figuur 66: Batterij Bo Yang 6-GFM-200.....	107
Figuur 67: Inverter WHC solar 3048	108
Figuur 68: Bedieningspaneel WHC-solar 3048	109
Figuur 69: Het opgewekte vermogen van de windmolen in functie van de windsnelheid bij 50 RPM (rood), 100 RPM (groen), 150 RPM (blauw) en 200 RPM (zwart)	121
Figuur 70: Vermogenscurve van de windmolen	122
Figuur 71: Weibullverdeling van de windsnelheid op een hoogte van 13m in Kayar. Met $A = 4.00$ m/s en $k = 2.77$	123
Figuur 72: Vrijlichaamsschema windmolen zonder schuine balken.....	139
Figuur 73: De snedekrachten van de toren van de inklemming ($x=0$ m) tot de top ($x=13$ m)	140
Figuur 74: Inwerkende krachten op pen.....	193
Figuur 75: Vrijlichaamschema van de as voor het scharnier	199
Figuur 76: M-/ V-lijn van de scharnieras	200
Figuur 77: Vrijlichaamsschema rechte windmolen	205
Figuur 78: Vrijlichaamsschema balk recht	206
Figuur 79: Spanningen op de windmolen bij het rechte	209

Verklarende woordenlijst

Gebruikte afkortingen

Afkorting	Betekenis
AGM	Absorptive glass mat
BEM	Blade element momentum
CFA	Communauté Financière Africaine
CSV	Comma-separated value
DOD	Depth of discharge
ESOI	Energy stored on invested
HAWT	Horizontale as windturbine
LES	Large eddy simulations
MPP	Maximum power point
MPPT	Maximum power point tracker
PBM	Pulsbreedtemodulatie
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell
PN	Positief-negatief
PV	Photovoltaïsch
RPM	Rotaties per minuut
TN	Terre-Neutre
TT	Terre-Terre
VAWT	Verticale as windturbine
VRLA	Valve Regulated Lead Acid

Abstract

De vzw Afractie tracht Senegalese straatkinderen (talibés) een toekomstperspectief te bieden door ze op te leiden tot kippenboer, in hun project “Le Coquetier Social”. Veel inkomsten gaan echter verloren ten gevolge van stroompannes. Hierdoor vallen de diepvries en ijskast uit, waardoor er vlees en eieren bederven. Deze masterproef heeft als doelstelling een back-upsysteem te ontwerpen en realiseren dat energie opwekt en opslaat op een duurzame manier. Dit systeem moet een vermogen van 260 W kunnen leveren gedurende een stroompanne van 48 uur. Hierbij dienen zo veel mogelijk lokale materialen te worden gebruikt.

Uit een literatuurstudie blijkt een windmolen in combinatie met gelbatterijen de beste oplossing. Na een conceptuele uitwerking van twee types windmolens komt een *tilt-up*-windmolen naar voren als beste keuze. Met softwarepakketten en manuele berekeningen wordt het optimale ontwerp gemaakt voor elke component. Voor het elektrisch deel biedt een MPP-controller de meeste voordelen. Deze zorgt immers voor het hoogste rendement van de windmolen, en hier kunnen achteraf eenvoudig zonnepanelen op aangesloten worden.

Omwille van de COVID-19 crisis van 2020 is het niet mogelijk om de opbouw van de windmolen te finaliseren. Wel is het energieopslagsysteem geïnstalleerd waardoor stroompannes overbrugd kunnen worden. Momenteel is de opslagcapaciteit onvoldoende om de doelstelling te behalen, maar deze kan uitgebreid worden in de toekomst. De windmolen wordt in de toekomst afgewerkt om de volledige installatie te benutten.

Abstract in English

In Senegal, underage boys (talibés) are sent out on the streets to beg. Non-profit organisation Afractie tries to help by giving them an education to become chicken farmer, in their project Le Coquetier Social. A lot of income is lost because of power failures. This causes the freezer and refrigerator to fall out, spoiling meat and eggs. This master's thesis aims to design and implement a backup system that generates and stores energy in a sustainable way. The system needs to be capable of providing 260 W of power during a 48 hour power failure. As many local materials as possible should be used.

The literature study shows that a wind turbine in combination with gel batteries is the best solution. After a conceptual elaboration of two types of wind turbines, a tilt-up wind turbine emerges as the best choice. Then, through software packages and manual calculations, the optimal design is made for every component. For the electrical part an MPP- controller offers the most advantages. It will provide the highest efficiency of the wind turbine and it is possible to connect solar panels to the controller afterwards.

Because of the COVID-19 crisis of 2020, it is not possible to finish the wind turbine. However, the energy storage system is installed. This makes it possible to bridge power failures. At this moment, the energy storage capacity is too low to meet the target, but it can be expended in the future. In the future, the wind turbine will be completed, in order to use the entire installation.

1 Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef werd uitgevoerd in samenwerking met vzw Students for Energy in Africa en vzw Afracitie met prof. dr. ir. Wim Deferme als promotor en ing. Inge Verboven als co-promotor. Students for Energy in Africa is een vzw die studenten de kans geeft om voor hun masterthesis een project uit te voeren rond duurzame energie, in een Afrikaans land [1].

Vzw Afracitie is een organisatie die werkt aan de realisatie van duurzame ontwikkelingsdoelen ten voordele van kinderen en jongeren in armoede in Senegal. Ze werken aan verschillende projecten om straatkinderen, en kinderen in kansarmoede, te helpen. Ze hebben bijvoorbeeld een opvangtehuis ATAX voor de opvang en het onderwijs van kansarme kinderen in Yoff (voorstad van Dakar). Een ander project is 'Le Coquetier Social', een klein bedrijfje waar vlees- en legkippen worden gekweekt door oudere *talibés* (bedelkinderen) onder begeleiding van een lokale verantwoordelijke [2], [3]. Met dit project probeert Afracitie de jongeren een beroep aan te leren, zodat ze niet meer hoeven te bedelen. Verder hoopt Afracitie met dit project tegemoet te komen aan het tekort aan vlees en eieren in de streek rond Dakar [2]. Het project is gelegen net buiten het dorp Ndiéguène, in de ruime omgeving van Lac Rose. In de toekomst gaan er in totaal zes stallen zijn: drie voor vleeskippen en drie voor legkippen. Momenteel zijn er nog geen stallen voor de legkippen, en worden enkel vleeskippen gekweekt, in drie stallen, waarvan er één te zien is in Figuur 1. Naast de stallen is er een woonhuis met een slaapkamer met badkamer voor de verantwoordelijke, een slaapkamer voor de talibés en een keuken. Daarnaast is er een badkamer voor de talibés, een opslagruimte, een voorraadruimte en een keuken. Op het terrein staan verschillende soorten bomen en is er tussen de stallen een waterput. Ze hebben er helaas vaak te kampen met stroomonderbrekingen die de normale werking van het bedrijfje in gevaar brengen.



FIGUUR 1: EÉN VAN DE KIPPENSTALLEN IN LE COQUETIER SOCIAL

1.2 Probleemstelling

Het elektriciteitsnet in Senegal is niet betrouwbaar, vaak zijn er stroomonderbrekingen die meerdere dagen kunnen duren. Deze stroomonderbrekingen zijn rampzalig voor het pluimveebedrijf: vlees en eieren bederven doordat de koelkasten en diepvriezers niet werken, kuikens sterven omdat er onvoldoende warmte en licht is (gedurende de eerste 14 dagen van het leven van de kippen).

Voor de goede werking van het pluimveebedrijf wordt er gebruik gemaakt van verschillende soorten elektrische toestellen. Er worden ledlampen gebruikt voor het verlichten van de stallen. Voor het bewaren van eieren en vlees worden een koelkast en een diepvriezer gebruikt. Daarnaast zijn er ook elektrische toestellen in de woonvertrekken: een microgolfoven, een tv, twee ventilatoren, verlichting en persoonlijke elektronica (zoals een gsm) van de talibés en begeleider(s) die er op dat moment verblijven. Voor een goede werking van het project moet er gemiddeld 252.5 W aan elektrisch vermogen ter beschikking zijn.

1.3 Doelstellingen

1.3.1 Doelstelling

Het doel van deze masterproef is zorgen dat Le Coquetier Social zo goed mogelijk kan werken op ieder moment, en hierdoor de verliezen zo veel mogelijk te beperken. Dit houdt in dat er op elk moment toegang moet zijn tot elektriciteit. Afracie wilt zoveel mogelijk gebruik maken van hernieuwbare energie. Er wordt een opdeling gemaakt tussen essentiële en niet-essentiële elektrische gebruikers. De essentiële gebruikers zijn gebruikers die altijd van energie moeten voorzien worden, zoals de diepvriezer.

Er moet energie opgewekt worden op een duurzame manier, zoals windenergie, zonne-energie of biomassa. Daarnaast moet er een opslag van energie mogelijk zijn, zodat er ook elektriciteit beschikbaar is op de momenten dat er geen wind, zon of biomassa beschikbaar is. Deze energieopslag moet 48 uur lang 252.5 W kunnen leveren, om de essentiële verbruikers voor twee dagen van energie te voorzien. Er moet dus een opslag van 12.48 kWh aan energie mogelijk zijn.

Het is belangrijk dat de installatie in de toekomst onderhouden, en eventueel gerepareerd, kan worden door de lokale bevolking. Om dit te verwezenlijken moeten zo veel mogelijk onderdelen in Senegal aangekocht worden en moet de lokale bevolking betrokken worden bij de bouw van de installatie.

1.3.2 Projectparameters

Om het energiesysteem zo optimaal mogelijk te kunnen ontwerpen is het belangrijk om alle elektrische verbruikers te kennen. In Tabel 1 staan alle verbruiker weergegeven die aanwezig zijn in het pluimveebedrijf.

TABEL 1: OVERZICHT VAN DE AANWEZIGE VERBRUIKERS

Verbruiker	Nominaal Vermogen [W]	Aantal	Totaal vermogen [W]
Diepvriezer ¹	240	1	87.5
Koelkast	75	1	75
TV	48	1	48
Ventilatoren woonvertrekken	55 + 50	2	105
Ledlampen stallen	60	12	720
Verwarming stallen	2000	1	2000
Pomp	1100	1	1100
Oven	1000	1	1000
Totaal			5 135.5

Een overzicht van de essentiële verbruikers wordt weergegeven in Tabel 2. Om de opslagcapaciteit van de batterijen op een correcte manier te kunnen bepalen, wordt er ook rekening gehouden met de gelijktijdigheid van de toestellen. Zo moeten de lampen enkel 's nachts werken. Het aantal lampen bij de essentiële verbruikers is lager dan het aantal lampen in totaal, vermits er niet in alle stallen op hetzelfde moment kuikens zitten.

TABEL 2: AANWEZIGE ESSENTIËLE VERBRUIKERS

Verbruiker	Nominaal vermogen [W]	Aantal	Totaal vermogen [W]	Gelijktijdigheid	Totaal vermogen [W]
Diepvriezers	240	1	87.5	1	87.5
Koelkasten	75	1	75	1	75
Lampen	60	3	180	0.5	90
Totaal			342.5	Totaal	252.5

1.3.3 Omgeving en locatie van het pluimveebedrijf

Omdat een installatie, die elektrische energie opwekt op een duurzame manier, vaak afhankelijk is van de omgevingsomstandigheden, zoals begroeiing, temperatuur en locatie, moeten deze factoren goed gekend zijn.

Het landschap is licht glooiend, met weinig heuvels in de nabije omgeving. Verder zijn lage en vrijstaande bomen aanwezig. Het terrein ligt op enkele kilometers van de kustlijn.

De bodem op het terrein en in de omgeving bestaat voornamelijk uit zand. De locatie van het dorp is 14°51'2" N 17°04'31" W. De gemiddelde temperatuur is ongeveer 25°C [4].

1.4 Methodiek

Er wordt gestart in hoofdstuk 1 met een situering, probleemstelling en met het opstellen van een eisenpakket. Dit zorgt ervoor dat alle doelstellingen duidelijk zijn tussen de betrokken partijen, en dat de nodige informatie gecentreerd wordt.

Hierna wordt er een literatuurstudie uitgevoerd. Het doel hiervan is om inzicht te verwerven in de technologische mogelijkheden voor dit project. Zo wordt er onderzocht wat de bestaande technieken zijn voor de opwekking en opslag van energie. De resultaten van de literatuurstudie worden getoond in hoofdstuk 2.

¹ Het totaal vermogen van de diepvriezer is het gemiddeld nominaal vermogen opgegeven door de fabrikant.

Uit de literatuurstudie komt naar voren welke vormen voor het opwekken en opslaan van energie er kunnen gebruikt worden. Om een optimale keuze te kunnen maken tussen de verschillende technieken, worden deze in hoofdstuk 3 gedimensioneerd om aan de noden van Le Coquetier Social te voldoen. Na deze berekeningen wordt er beslist welke energieopwek- en energieopslagmethode er gebruikt wordt.

Wanneer de keuze van het energiesysteem gemaakt is, wordt er een concept uitgewerkt in hoofdstuk 4. Hierna wordt het volledige mechanische ontwerp besproken en wordt elk onderdeel gedimensioneerd. De elektrische installatie op zijn beurt wordt besproken in hoofdstuk 5. Er wordt dieper ingegaan op de opwekking en opslag van de energie, en op de concrete werking en beveiliging van het systeem.

Als het volledige ontwerp van de installatie gemaakt is, worden alle kosten voor het project opgelijst. Hiermee kan berekend worden wat de terugverdientijd van de installatie is. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen verschillende methodes om de terugverdientijd te berekenen. Ook wordt er een vergelijking gemaakt met commercieel beschikbare installaties. Deze kostenanalyse wordt uitgevoerd in hoofdstuk 6.

Op het einde van de masterthesis, in hoofdstuk 7, wordt er een conclusie getrokken over het volledige project. Hier wordt ook aangehaald wat de mogelijkheden voor de toekomst zijn, zowel op technisch als op wetenschappelijk vlak.

2 Literatuurstudie

2.1 Inleiding

Zoals hierboven vermeld, moet er een installatie worden ontworpen voor het opwekken en opslaan van elektrische energie. Om de juiste keuzes te kunnen maken, moet eerst onderzocht worden welke vormen van opwekken en opslaan er al bestaan. Dit gebeurt aan de hand van een literatuurstudie in dit hoofdstuk.

In '2.2 *Energiebronnen*' wordt er gekeken welke vormen er bestaan voor het opwekken van energie. Er wordt ook gekeken naar welke externe factoren (klimaat, omgeving, seizoen,...) meespelen in de opbrengst en werking van de verschillende energiebronnen. In '2.3 *Energieopslagmethoden*' wordt onderzocht welke manieren er bestaan om energie op te slaan.

Vermits de haalbaarheid van een energiebron of energieopslagmethode beter te bepalen is indien er een dimensionering en vergelijking wordt gemaakt tussen de verschillende methodes, wordt er in '3 *Ontwerpkeuzes*' een vergelijking en een keuze gemaakt voor beide technologieën.

2.2 Energiebronnen

Afractie heeft specifiek gevraagd om enkel gebruik te maken van duurzame energievormen. De vormen die besproken worden zijn:

- zonne-energie,
- windenergie,
- biomassa en biobrandstoffen.

Naast deze technieken, zijn er nog veel andere, zoals waterkracht, geothermie Omdat deze specifieke omgevingskenmerken, zoals waterstroming, vereisen, en deze kenmerken niet aanwezig zijn, worden deze niet besproken.

2.2.1. Zonne-energie

De meest gebruikte manier om zonne-energie om te zetten in elektrische energie is via fotovoltaïsche (Photovoltaics or PV) panelen. Een andere, recentere, manier is het gebruiken van zonne-energie om waterstofgas uit de lucht te halen, en deze waterstofgas om te zetten in elektrische energie [5]. Deze techniek staat nog in zijn kinderschoenen, en wordt hierdoor niet besproken.

2.2.1.1 Zonlicht

Om een goede inschatting te kunnen maken van de opbrengst van een PV-installatie is het cruciaal om te weten wat zonlicht is, hoe het zich gedraagt en hoe bepaald kan worden hoeveel zonlicht de PV-installatie bereikt.

Zonlicht bestaat uit elektromagnetische golven met verschillende golflengtes (λ). De energie van de golf is evenredig met de frequentie (f) en dus omgekeerd evenredig met de golflengte. De energie van een golf kan berekend worden met [6]:

$$E_f = h * f = \frac{h * c}{\lambda} [J] \quad (1)$$

met:

- E [J]: de energie van het foton,
- $h = 6,63 * 10^{-34}$ [J*s]: de constante van Planck,
- $c = 2,9979 * 10^9$ [m/s]: de snelheid van licht in vacuüm.

De stralingsintensiteit geeft weer hoeveel vermogen er geleverd wordt door de elektromagnetische golven, per eenheid van oppervlakte. De stralingsintensiteit gemeten aan de buitenkant van de dampkring van de aarde, ook wel zonneconstante of stralingsaanbod G_{sc} genoemd, is niet constant. Door de elliptische baan van de aarde om de zon varieert deze waarde volgens [6]:

$$G_{sc} = 1367 * (1 + 0,03 * \cos(\frac{360}{365} * n)) [W/m^2] \quad (2)$$

Waarbij 'n' een willekeurige dag van het jaar voorstelt. De gemiddelde waarde is $G_{sc} = 1367 W/m^2$ [6].

Van het zonlicht dat de buitenkant van de dampkring van de aarde bereikt gaat er maar een deel tot aan het aardoppervlak. Een deel wordt geabsorbeerd, verstrooid en weerkaatst in de dampkring. De straling die het aardoppervlak bereikt kan opgedeeld worden in directe en diffuse straling. Directe straling (G_{dir}) is straling die van buiten de dampkring rechtstreeks het aardoppervlak bereikt. Diffuse straling (G_{dif}) is straling die via weerkaatsing of diffractie in de atmosfeer het aardoppervlak bereikt. De totale straling (G_T) is de som van de directe en de diffuse straling [6]:

$$G_T = G_{dir} + G_{dif} [W/m^2] \quad (3)$$

De grootte van de directe straling is (bij een wolkenloze hemel) evenredig met het stralingsaanbod en wordt verminderd door de afgelegde weg en de troebelheid van de atmosfeer [6]:

$$G_n = G_{sc} * e^{(-\delta_{Rcda} * T_L * AM)} * \sinh_{\omega} [W/m^2] \quad (4)$$

Met:

- $G_n [W/m^2]$: de zonnestraling op het aardoppervlak, loodrecht op de straling,
- δ_{Rcda} : de invloed van de waterdamp en aërosolen (Rayleigh factor clear dry air),
- T_L : de Linke troebelheidsfactor, een maat voor het waterdampgehalte in de atmosfeer,
- AM : de *Air Mass*-factor als maat voor de weglengte van het zonlicht door de atmosfeer;
- $h_w [^\circ]$: De werkelijke zonshoogte ten opzichte van de horizon.

Het wiskundig berekenen van de diffuse straling is complexer. Een eenvoudige doch nauwkeurige manier om gemiddelde waarden voor de zonnestraling op een plaats op de aarde te bekomen, is het gebruiken van meetwaarden. De gemiddelde jaarlijkse totale zonne-insolatie in Ndiéguène ligt tussen 2081 en 2118 kWh/m² volgens Solargis [7] en is 2110 kWh/m² volgens de Global solar atlas [8].

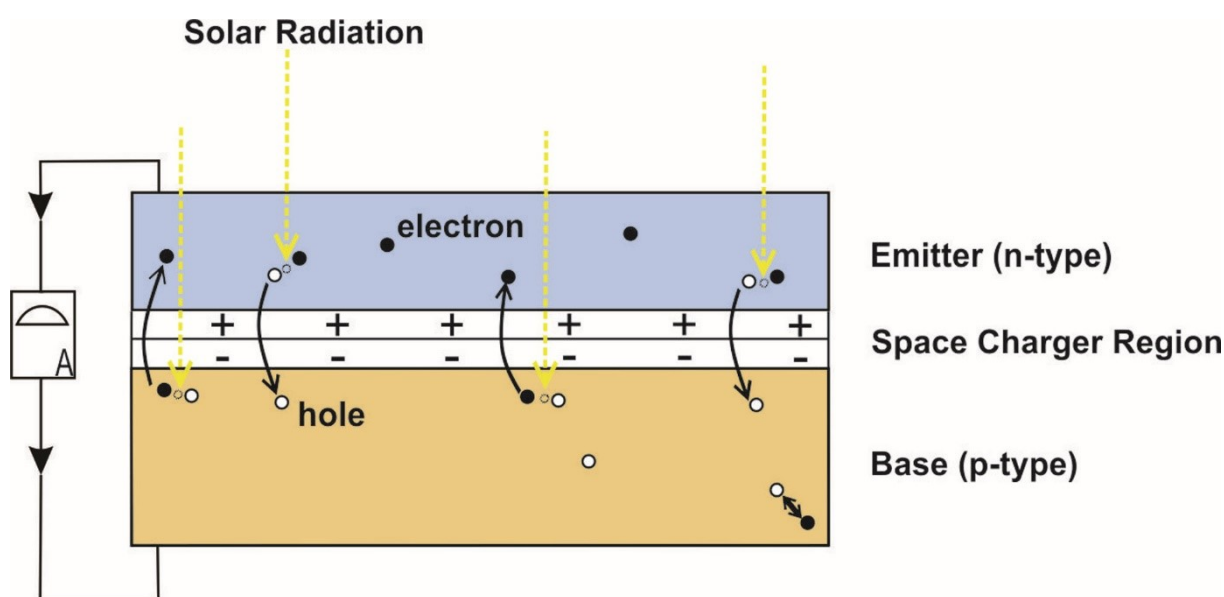
Jaarlijkse waarden van insolatie kunnen gebruikt worden om een jaaropbrengst van een PV-installatie te bepalen. Vermits het belangrijk is om te weten hoeveel energie er op elk moment van het jaar kan opgewekt worden, zijn de gemiddelde maandelijkse waarden van stralingsintensiteit belangrijker. In Tabel 3 wordt de gemiddelde stralingsintensiteit per maand in Ndiéguène weergegeven.

TABEL 3: GEMIDDELDE STRALINGSINTENSITEIT PER MAAND IN NDIÉGUÈNE [9]

Maand	Gemiddelde straling
Januari	196 W/m ²
Februari	226 W/m ²
Maart	252 W/m ²
April	258 W/m ²
Mei	270 W/m ²
Juni	264 W/m ²
Juli	238 W/m ²
Augustus	210 W/m ²
September	202 W/m ²
Oktober	212 W/m ²
November	200 W/m ²
December	190 W/m ²
Jaargemiddelde	227 W/m ²

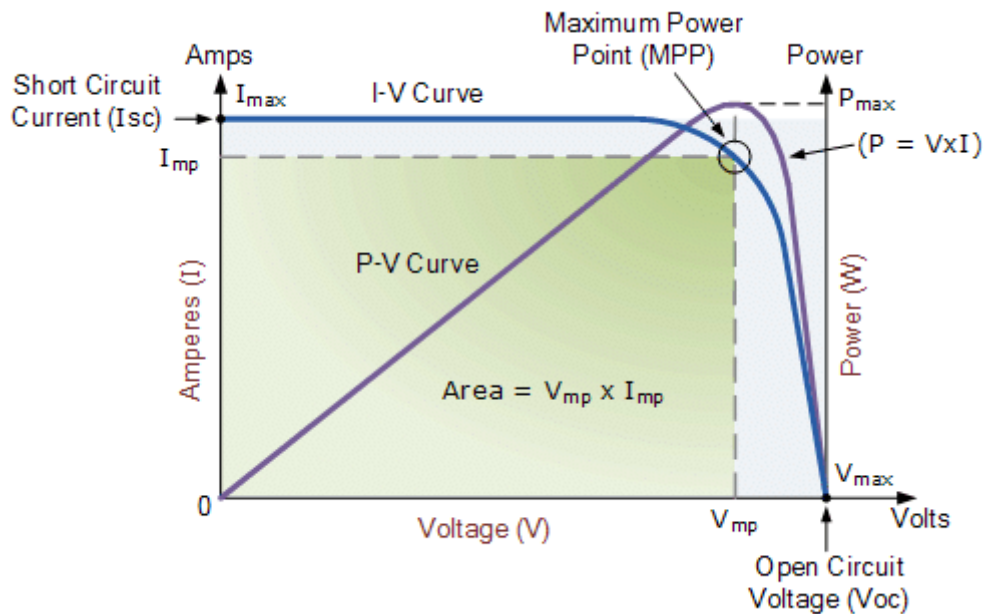
2.2.1.2 Fysische achtergrond van zonnecellen

Om het zonlicht om te zetten in elektrische energie wordt gebruik gemaakt van zonnecellen. Een zonnecel bestaat uit een pn-junctie. Invallende fotonen kunnen een elektron-gat-paar creëren, zoals weergegeven in Figuur 2, hierdoor gaat er een stroom lopen. Meerdere zonnecellen worden samen verbonden tot een zonnepaneel. Zonnecellen worden in serie verbonden om een grotere spanning te verkrijgen. Deze seriële takken worden parallel geschakeld om een grotere stroom te bekomen.



FIGUUR 2: ELEKTRON-GAT PAAR GENERATIE [10]

De stroom van een zonnecel is bijna constant over een groot spanningsbereik, zoals te zien in Figuur 3. Hierdoor wordt de zonnecel gezien als een stroombron. De spanning hangt af van de externe belasting van de zonnecel [11]. Het geleverd vermogen van de zonnecel is het grootste als het product van spanning en stroom maximaal is. Dit punt wordt het 'Maximum Power Point' (MPP) genoemd. Het MPP is het werkpunt waarnaar gestreefd wordt, hiervoor plaats men bij het zonnepaneel een 'Maximum power point tracker' (MPPT).



FIGUUR 3: STROOM- SPANNINGSKARAKTERISTIEK VAN EEN ZONNECEL [12]

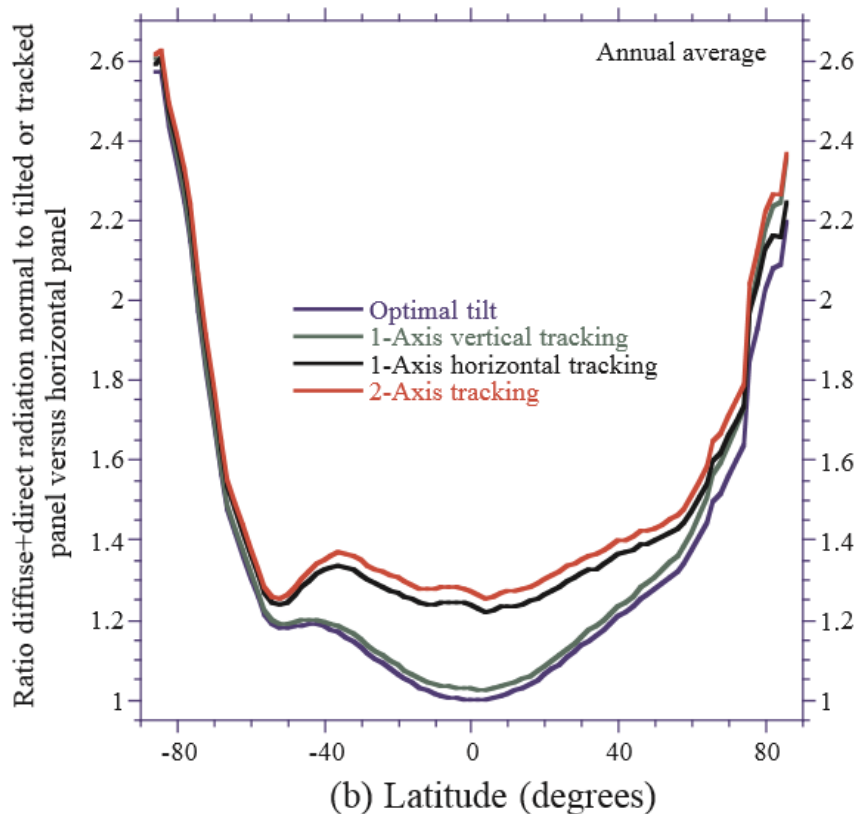
2.2.1.3 PV-installaties

De opbrengst van een PV-installatie hangt niet enkel af van de stralingsintensiteit op de locatie van de installatie maar ook van het rendement van het zonnepaneel, het rendement van de omvormer, inwendige verliezen (in de kabels, aansluitingen,...) en positie van de zon ten opzichte van het zonnepaneel.

Meetwaarden van de gemiddelde stralingsintensiteit en jaarlijkse insolutie zijn gemeten op een horizontaal vlak [7]. De opbrengst van een zonnepaneel is echter het hoogste als de normaal van het zonnepaneel evenwijdig is met de zonnestraling. Er zijn meerdere mogelijkheden om deze situatie te benaderen. Het zonnepaneel kan geplaatst worden volgens vier mogelijke opstellingen: onder een optimale hellingshoek (afhankelijk van de positie op aarde), volgens een vaste *azimut* (180° in het noordelijk halfrond, 0° in het zuidelijk halfrond) met een verticaal volgmechanisme, onder de optimale hellingshoek met een horizontaal volgmechanisme of met een volgmechanisme op beide assen.

Het verschil in opbrengst tussen deze vier methoden hangt eveneens af van de locatie op de aarde, de gemiddelde bewolking en het aantal aerosolen in de lucht. Op een locatie waar de hemel een hogere hoeveelheid bewolking en aerosolen heeft is een horizontalere hellingshoek gewenst. Door de bewolking wordt er een groter deel van de straling verstrooid, hierdoor is de diffuse straling hoger en de ideale hellinghoek van het zonnepaneel lager [13]. In Senegal is de optimale hellingshoek van een zonnepaneel 14° , naar het zuiden gericht [14].

In Figuur 4 wordt weergegeven hoeveel de opbrengst van een zonnepaneel verbetert met een optimale hellingshoek, verticaal volgmechanisme, horizontaal volgmechanisme en een volgmechanisme volgens beide assen, ten opzichte van een zonnepaneel dat horizontaal opgesteld is.



FIGUUR 4: RATIO VAN DIFFUSE EN DIRECTE INSTRALING NORMAAL AAN EEN ZONNEPANEEL ONDER VASTE HELLINGSHOEK OF VOLGENS EEN VOLGMECHANISME TEN OPZICHTE VAN HORIZONTALE PLAATSING [14, P. 63].

Le Coquetier Social ligt op een latitude van ongeveer 15 graden [15]. Er kan van Figuur 4 afgelezen worden dat de opbrengst stijgt met respectievelijk 3%, 6%, 24% en 28%.

Bij het dimensioneren van een PV-installatie is het belangrijk om te weten hoeveel van de energie die het zonnepaneel bereikt, omgezet kan worden in bruikbare energie. Hiervoor moet er gekeken worden naar het rendement van de installatie en de optredende verliezen. Mogelijke verliezen zijn jouleverliezen in de kabels, thermische verliezen, schaduwverliezen, conversieverliezen, degradatie van de zonnecellen en rendementsdaling door vervuiling van de zonnepanelen [16].

Het rendement van een volledige installatie, dit is het quotiënt van het beschikbare elektrische vermogen en het invallende vermogen, ligt rond de 10% [16], [17].

2.2.2 Windenergie

Een belangrijke duurzame energiebron is windenergie. Deze stromingsenergie kan worden omgevormd naar elektrische energie m.b.v. een windturbine en generator. Deze samenstelling vindt men terug in een windmolen. De wieken (rotor) van de windmolen vormen de energie van de wind om in mechanische energie in de vorm van een roterende beweging. Deze mechanische energie wordt gebruikt om een generator aan te drijven. De generator vormt de mechanische energie om in elektrische energie [5].

Om deze energiebron beter te begrijpen moet er eerst onderzocht worden hoe wind ontstaat en hoe deze beïnvloed wordt. Daarna wordt de opbouw van de windmolen besproken.

2.2.2.1 Wind

De wind vindt zijn oorzaak bij de zon. De energie van de zon verwarmt de aarde, waardoor de aarde de lucht verwarmt. Warme lucht heeft een lagere massadichtheid dan koude lucht en zal stijgen, wat een lage drukpunt tot gevolg heeft. Wanneer de lucht stijgt zal deze steeds minder verwarmd worden door de aarde en uiteindelijk terug afkoelen. Op dit moment zal de massadichtheid terug toenemen en zal de lucht terug dalen, wat een hoge drukpunt tot gevolg heeft. De lucht stroomt van een hoge drukpunt naar een lage drukpunt, hierdoor ontstaat er wind [18], [19]. Het vermogen van de wind P_{wind} kan beschreven worden met volgende vergelijking:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho v^3 A [W] \quad (5)$$

met:

- ρ [kg/m³]: de massadichtheid van lucht,
- v [m/s]: de windsnelheid,
- A [m²]: het beschouwde doorstroomoppervlak.

De windsnelheid is sterk afhankelijk van de omgevingsparameters en de hoogte. Bij de omgevingsparameters horen de obstakels. Deze beïnvloeden de wind zeer sterk: ze zorgen voor een afremming en een afbuiging van de stroming. Het aardoppervlak is ook een belangrijke afremmende factor, dichtbij het aardoppervlak is er een sterke afname in de windsnelheid. De snelheid bij het aardoppervlak is afhankelijk van de ruwheid van het aardoppervlak. Wanneer de windsnelheid v_1 op een bepaalde hoogte z_1 gekend is, kan de windsnelheid v_2 op een hoogte z_2 bepaald worden [6].

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^a [m/s] \quad (6)$$

Hierbij is a een factor die afhankelijk van de omgevingsparameters, zoals ruwheid van het aardoppervlak en de obstakels. In de onderstaande Tabel 4 vindt men een overzicht terug van de mogelijke waarden van a .

TABEL 4: INVLOED VAN DE OMGEVING OP EXPONENT a [6, P. 153]

Terreingesteldheid	a
Vlak kustgebied met overwegend aanlandige wind	0.12
Vlak of licht glooiend land met enkele lanen en vrijstaande bomen	0.15
Heuvelachtig gebied met lanen, bosjes en verspreide bebouwing	0.19
Landschap met dichtere bebouwing of kleinere bossen	0.26
Zware bossen, sterk heuvelachtig terrein of centrum van grote stad met hoogbouw	0.35

Zoals beschreven in de doelstellingen, bevinden er zich in de omgeving van Le Coquetier Social lage en alleenstaande bomen, en is het landschap licht glooiend. Deze zorgen voor een beïnvloeding van de wind. Uit de bovenstaande tabel blijkt echter dat deze invloed eerder beperkt is.

Meetwaarden uit Senegal

Voor het ontwerp van een windmolen is het belangrijk om de meetwaardes te kennen in Senegal en meer specifiek de regio van het terrein waarop de windmolen gebouwd wordt. Voor de regio van het terrein worden de gemiddelde meetwaarden op een hoogte van 50 meter weergegeven in Tabel 5.

TABEL 5: GEMIDDELDE MEETWAARDES WIND IN SENEGAL OP 50M [20]

Omschrijving	Meetwaarden
Wind power density	78-98 W/m ²
Windsnelheden	4.36-4.73 m/s

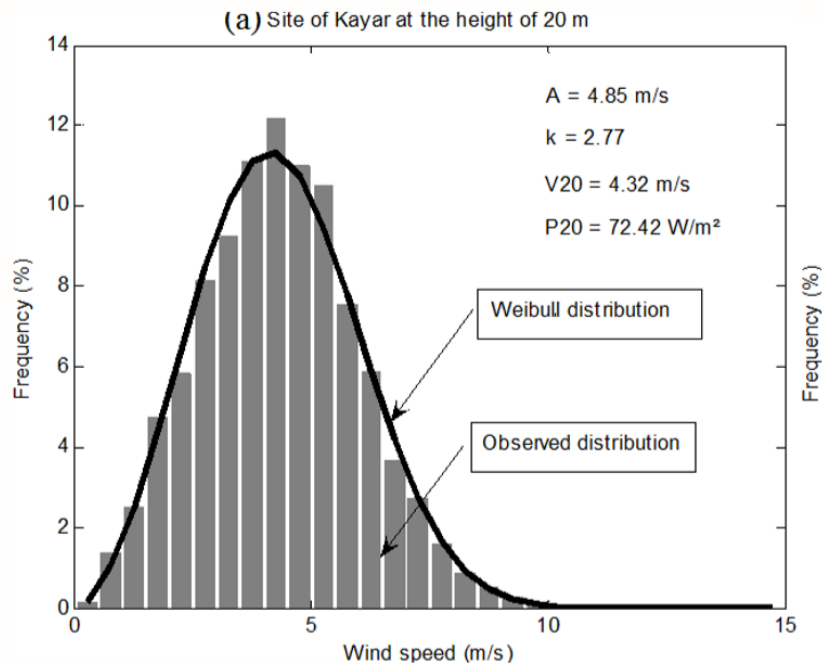
Omdat het vermogen van een windmolen niet-lineair is in functie van de windsnelheid, is het belangrijk om te weten hoe groot de kans is dat een bepaalde windsnelheid voorkomt op de locatie van de windmolen. Deze waarschijnlijkheid kan door een statistische verdeling weergegeven worden. Er bestaan verschillende soorten statistische verdelingen die gebruikt worden om de waarschijnlijkheid van de wind uit te drukken. Deze verdelingen kunnen een verschillend aantal parameters hebben, zodat niet elke verdeling even nauwkeurig is. Bekende verdelingen zijn de Weibull-, Rayleigh-, gamma-, lognormale- en inverse Gaussiaanse verdeling [21]. De meestgebruikte verdeling bij berekeningen in de windindustrie is de Weibullverdeling. Deze verdeling is minder nauwkeurig bij hoogfrequente totale afnames van de windsnelheid, hoge windsnelheden of korte tijdsintervallen. Maar deze geeft over het algemeen goede resultaten, met eenvoudig te bepalen parameters [22]. De Weibullverdeling wordt gegeven door [21]:

$$f(v, c, k) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

met:

- k (>0) : de vormparameter,
- c of A (>0) : de schaalparameter,
- v [m/s]: de windsnelheid.

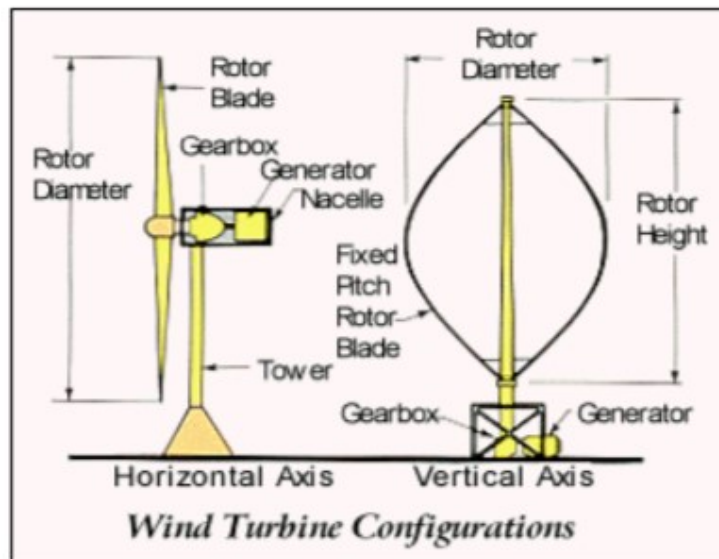
In Figuur 5 wordt een Weibull-gegeven van de wind op 20m hoogte in Kayar, een gemeente op 10km afstand van Le Coquetier Social.



FIGUUR 5: WEIBULL-VERDELING IN KAYAR [23, P. 1126].

2.2.2.2 Windmolens

De energie van de wind wordt omgevormd in elektrische energie met behulp van een windmolen. Windmolens kunnen ingedeeld worden in horizontale as windmolens (HAWT) en verticale as windmolens (VAWT). Ongeveer 99% van de windmolens is van het type horizontale as windmolen [24]. In Figuur 6 wordt een voorbeeld van een horizontale en een verticale as windturbine gegeven.



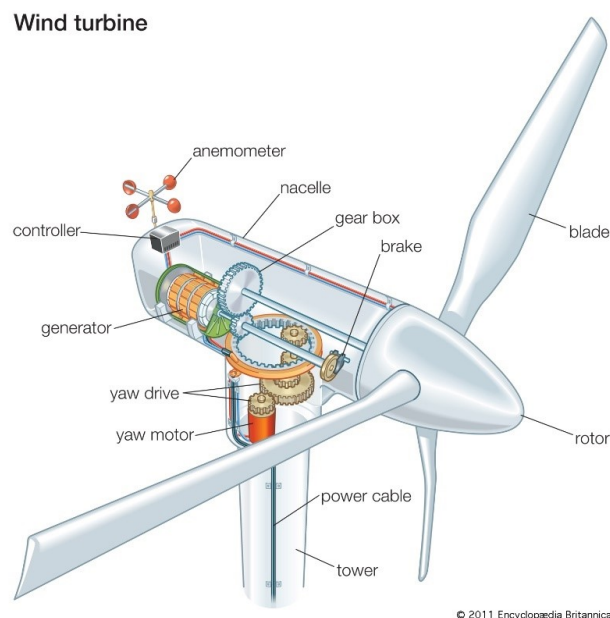
FIGUUR 6: VERGELIJKING HORIZONTALE EN VERTICALE AS WINDTURBINE [25, P. 19]

Bij een horizontale as windmolen wordt de as, turbine, eventuele tandwielkast en generator bovenaan geplaatst, zodat de as horizontaal kan geplaatst worden. Een groot nadeel van dit type windmolen is dat men de turbine altijd naar de wind moet richten voor optimale opbrengst. Een ander nadeel hiervan is dat men zware machines (generator, tandwielkast) op grote hoogte moet brengen. Er is dus opgeleid personeel nodig voor de constructie en het onderhoud van de windmolen [19].

Een horizontale as windturbine kan zowel een vaste als een variabele rotatiesnelheid hebben. Bij een vaste snelheid windturbine kan de aansnijhoek van de wieken aangepast worden zodat de draaisnelheid constant gehouden kan worden. Dit heeft als voordelen dat er minder elektronica nodig is voor het aanpassen van de frequentie uit de generator. Een nadeel hiervan is dat er vermogen verloren gaat [19].

Bij een verticale as windmolen wordt de as verticaal geplaatst en dus ook de windturbine. Dit geeft het grote voordeel dat men de windmolen niet moet richten. Het grootste nadeel van deze opstelling is dat het aandrijvend koppel meer varieert en dat sommige types niet zelfstartend zijn. Hierdoor moet er dus een koppel aangelegd worden om de windturbine aan het draaien te krijgen [19].

Een windmolen is opgebouwd uit een toren, rotor, generator, richtingsmechanisme, fundering en een overbrenging [26]. Naast deze basiselementen is er meestal ook een stormbeveiliging voorzien. In Figuur 7 wordt de opbouw van een horizontale as windmolen getoond. Hieronder worden kort de belangrijkste onderdelen van de windmolen besproken.



FIGUUR 7: OPBOUW VAN EEN HORIZONTALE AS WINDMOLEN [26]

Fundering

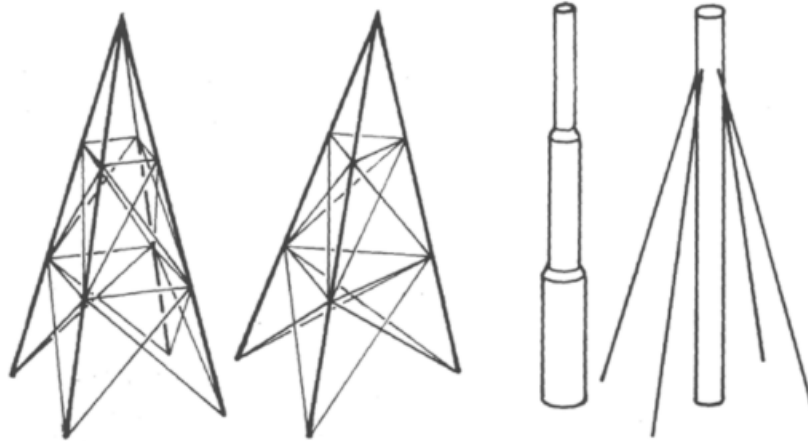
De windmolen wordt op een fundering gebouwd. Deze bestaat meestal uit een plaat of blok gemaakt uit gewapend beton. De fundering vervult een zeer belangrijke functie, deze zorgt ervoor dat de windmolen niet de grond in zakt onder zijn eigen gewicht. Daarnaast zorgt de fundering ook voor de stabiliteit van de windmolen, zodat deze niet omkantelt of verplaatst bij de inwerkende windkrachten.

Toren

De generator en rotor worden meestal op een toren geplaatst om deze voldoende hoog te plaatsen. Dit heeft enkele voordelen:

- minder invloed van obstakels in de omgeving,
- de wieken van de windmolen kunnen geen objecten of personen raken.

De toren kan op verschillende manier worden opgebouwd, vier mogelijke manier om de toren op te bouwen zijn afgebeeld in Figuur 8. Er zijn twee hoofdvormen: vakwerk en buizen. Zoals bij de laatste vorm op Figuur 8 kunnen er kabels gebruikt worden om de stabiliteit van de toren te verhogen.



FIGUUR 8: VIER MOGELIJKE MANIEREN OM DE TOREN OP TE BOUWEN [18, P. 9]

Doorheen de toren loopt de vermogenskabel, langs deze kabel wordt de elektrische energie getransporteerd van de generator naar de verbruikers en het energieopslagsysteem.

Rotor

Deze zet de bewegingsenergie van de wind om in mechanische energie, zodat deze op zijn beurt kan omgezet worden in elektrische energie. De rotor is samengesteld uit de wieken en een bevestiging om de wieken vast te maken aan de naaf of *hub* [24]. De vorm van de rotor speelt hier een belangrijke rol, deze beïnvloedt hoeveel van de windenergie kan omgevormd worden in mechanische energie. Dit wordt verder besproken in ‘2.2.2.3 Rotoren voor windmolens’.

Generator

De generator vormt de mechanische energie om in elektrische energie. Er bestaan verschillende types van generatoren: zoals de DC-generator, een asynchroongenerator en een synchroongenerator. De verschillende types generatoren worden besproken in ‘2.2.2.4 Generatoren’.

Overbrenging

Deze brengt de mechanische energie over van de rotor naar de generator. De overbrenging bevat minstens een as. Afhankelijk van het type generator en rotor bevat de overbrenging ook nog een tandwielkast.

Stormbeveiliging

De stormbeveiliging beschermt de windmolen tegen beschadigingen bij hoge windsnelheden. Wanneer dit niet gedaan wordt moet men de wieken van de rotor sterker uitvoeren, wat leidt tot hoge kosten en materiaalverbruik. Voor bescherming van de windmolen draait men deze meestal uit de wind. Een andere optie voor de stormbeveiliging is de windmolen afremmen met een rem.

2.2.2.3 Rotoren voor windmolens

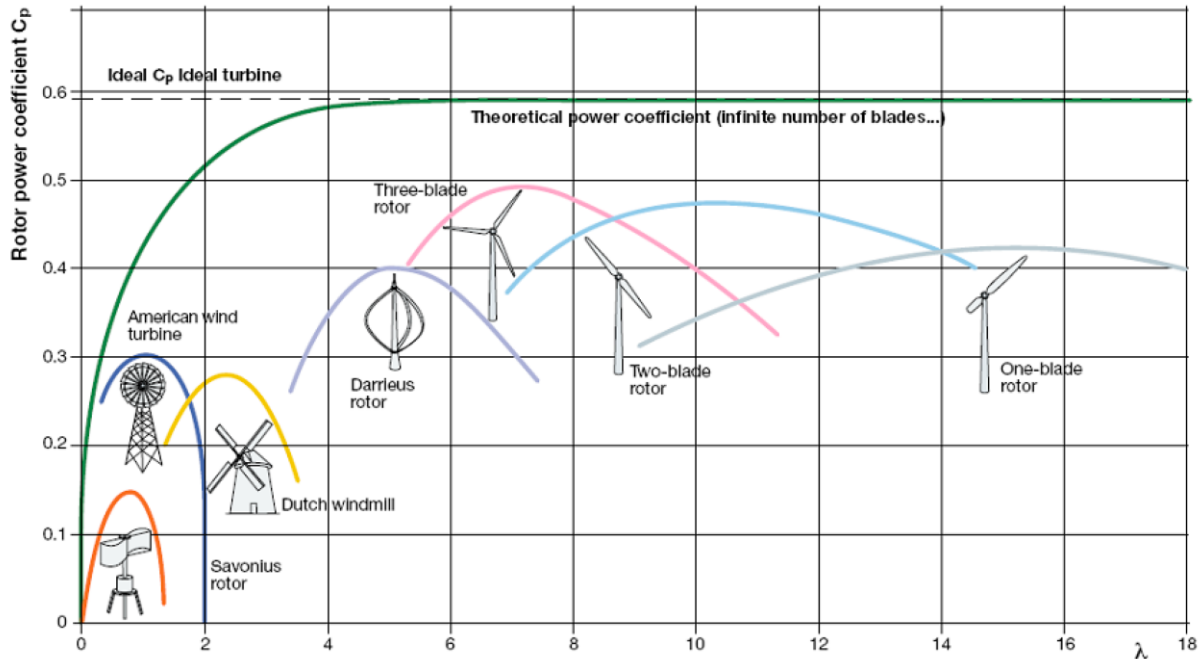
Er bestaan veel verschillende soorten rotoren voor windmolens. In dit hoofdstuk wordt er onderzocht wat het verschil in type rotor tot gevolg kan hebben op de werking en opbrengst van de windmolen. Daarnaast worden de krachten op de rotor besproken.

Om te begrijpen wat het gevolg is van het type rotor, is het belangrijk te begrijpen dat het volledige vermogen van de wind, zoals beschreven in vergelijking 5, nooit volledig benut kan worden voor het opwekken van elektrische energie. Theoretisch kan een windmolen maximum $16/27$ van het windvermogen onttrekken, dit is de constante van Betz [19]. In werkelijkheid

ligt dit nog lager. Het percentage van het werkelijke vermogen dat benut wordt, en het beschikbare windvermogen, wordt beschreven door de vermogenscoëfficiënt C_p [6]:

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{wind}} = \frac{P_{turbine}}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \quad (8)$$

In Figuur 9 is het duidelijk dat deze vermogenscoëfficiënt afhankelijk is van de gekozen type turbine, het aantal wieken en de tip-speed-ratio λ . In deze grafiek is de constante van Betz aangeduid met de stippellijn (ideale C_p).



FIGUUR 9: VERBAND TUSSEN C_p EN TIP-SPEED-RATIO [27, P. 2]

De tip-speed ratio λ of de snelheid is de verhouding tussen de snelheid van de tip van de wiek en de invallende windsnelheid [24]:

$$\lambda = \frac{v_{tip}}{v_{wind}} \quad (9)$$

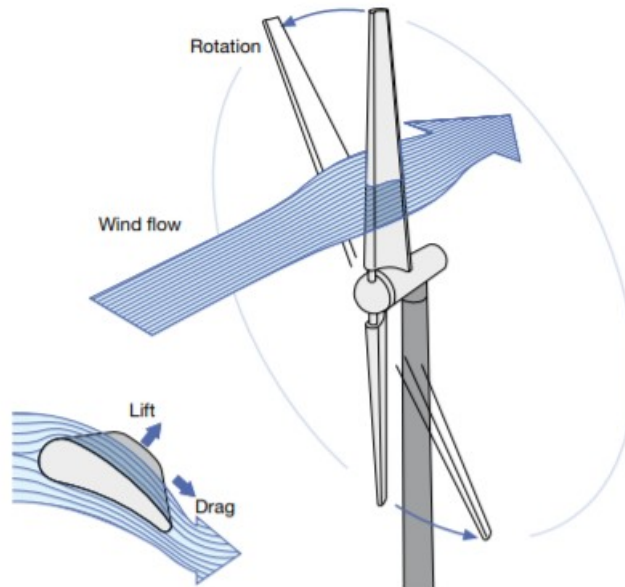
Uit Figuur 9 blijkt dat bij horizontale as windturbines, de tip-speed ratio lager is bij maximale C_p , hoe meer wieken de windmolen heeft. Bij eenzelfde ontwerp-windsnelheid geldt er dat hoe meer wieken een windmolen heeft, hoe lager de omwentelingssnelheid is. Voor hetzelfde mechanisch vermogen heeft een lagere omwentelingssnelheid een hoger benodigd koppel tot gevolg [18].

Voor het opwekken van elektrische energie is het belangrijk om een voldoende hoge omwentelingssnelheid te hebben. Daarom wordt er voor het opwekken van elektrische energie meestal gebruik gemaakt van rotors met twee of drie wieken, maar minder (één) of meer (vier of meer) wieken zijn ook mogelijk. Een vergelijking van rotoren met twee en drie wieken wordt gegeven in Tabel 6.

TABEL 6: VERGELIJKING VAN EEN ROTOR MET TWEE OF DRIE WIEKEN [24, P. 14]

Twee wieken	Drie wieken
Lage kostprijs voor de rotor door zijn laag gewicht	Betere balans van aerodynamische krachten
Meer lawaai	Betere mechanische stabiliteit
Eenvoudiger te installeren	Meer uniform koppelverloop
Een complexer design	Lager visuele impact

Een belangrijk aspect dat nog niet besproken is bij de windturbine zijn de krachten op de rotor. Op de wieken van de windturbine worden er twee hoofdkrachten uitgeoefend: de wrijvingskracht (*dragforce*) en de liftkracht. Deze krachten op de wieken worden getoond in Figuur 10.

**FIGUUR 10: KRACHTEN OP DE WIEKEN VAN EEN DOOR LIFT AANGEDREVEN WINDTURBINE [24, P. 12]**

In Figuur 10 wordt de luchtstroom getoond bij een liftturbine, bij dit type van turbine is de aandrijvende kracht van turbine de liftkracht. Hierbij stroomt de luchtstroom over beide oppervlakken van de wiek. Deze oppervlakken hebben elk een ander profiel waardoor er een lage en hoge drukzone ontstaat, hierdoor ontstaat er een liftkracht. Aangezien de wind over de oppervlakken stroomt ontstaat er ook een wrijvingskracht. Er bestaan ook wrijvingskrachtturbines, waarbij de wrijvingskracht de aandrijvende kracht is [24].

2.2.2.4 Generatoren

Voor de generator van een windmolen zijn er meerdere mogelijkheden: een DC-machine, een (dubbelgevoede) asynchroon machine of een synchroon machine [28].

DC-machine

Bij een DC-machine is de opgewekte spanning gelijkspanning. Hierdoor is er altijd een inverter nodig om de gelijkspanning om te zetten naar wisselspanning. Het voordeel van deze machine is dat er eenvoudig op elke mechanische hoeksnelheid kan gewerkt worden. Een nadeel van DC-machines is dat er borstels gebruikt moeten worden voor de commutatie van de polen. Deze borstels zorgen voor vonken en moeten na een tijd vervangen worden door slijtage [29].

Asynchroon machine:

Bij een asynchrone machine draait de rotor met een andere hoeksnelheid dan het magnetisch veld. Hierdoor snijdt de rotor de magnetische veldlijnen waardoor er volgens de wet van Faraday-Lenz een spanning wordt opgewekt. Deze opgewekte spanning zorgt voor een stroom. Door deze stroom wordt er een kracht uitgeoefend op de geleider, de Lorentzkracht.

Het grootste nadeel van deze generator is dat deze een reactief vermogen nodig heeft om te werken. Het reactief vermogen is nodig om het magnetisch draaiveld te kunnen opbouwen. Dit draaiveld kan op twee manieren opgebouwd worden: d.m.v. een condensator parallel over de windingen of d.m.v. het elektriciteitsnet. Wanneer men kiest voor de laatste optie moet de generator altijd netgekoppeld werken.

Een asynchrone machine kan dubbelgevoed of enkelgevoed zijn. Bij een dubbelgevoede asynchrone machine kan er via de slepringen ook een spanning op de rotor van de generator gebracht worden. Hierdoor kan de spanning van de rotor een andere frequentie hebben dan de spanning van het net. Dit heeft als voordeel dat de mechanische snelheid van de rotor kan variëren [24].

Synchrone machine:

Synchrone machines zijn machines waarbij de rotor synchroon draait met het draaiveld van de stator. Het magnetisch veld kan opgewekt worden door stroomvoerende geleiders of door permanente magneten. Deze machines kunnen onderverdeeld worden in radiale flux-, en axiale flux machines. Het meest gebruikte type is de radiale flux generator. De axiale flux generator wordt echter meer en meer gebruikt voor kleine windturbines vermits de constructie van dit type generatoren het toelaat om een groot aantal poolparen te installeren, waardoor er bij een lage mechanische snelheid al een nuttig vermogen kan opgewekt worden [30].

2.2.2.5 Controllers en laadregelaars

Indien er gekozen wordt voor een windturbine met variabele snelheid varieert de frequentie en de spanning van het uitgangssignaal van de generator met de windsnelheid. Vermits er niet rechtstreeks gewerkt kan worden met dit variabel signaal moet dit eerst omgezet worden naar gelijkspanning. Zowel om de batterijen te kunnen opladen als om het signaal naar een constante frequentie en spanning te kunnen omzetten.

Er zijn twee gangbare oplossingen hiervoor, een controller of een gelijkrichterbrug met laadregelaar. Bij een gelijkrichterbrug met laadregelaar wordt de driefasige wisselspanning d.m.v. een gelijkrichterbrug gelijkgericht. De spanning na de gelijkrichterbrug varieert, deze wordt d.m.v. een DC-DC converter omgezet naar een constante, meestal instelbare, spanning.

Bij een controller is er een ingebouwde maximum power point tracker (MPPT). Dit zorgt ervoor dat de generator tijdens zijn normale werking op elk moment op zijn optimale werkingpunt opereert. Hierdoor kan er een hogere opbrengst verwezenlijkt worden t.o.v. een gelijkrichterbrug met laadregelaar. Deze verhoging in opbrengst varieert afhankelijk van de windsnelheid en belasting. Uit een onderzoek van Syahputra en Soesanti met een generator van 3 kW blijkt dat de gemiddelde verhoging van het rendement 50.77% bedraagt [31].

2.2.3 Energie uit biomassa en biobrandstoffen

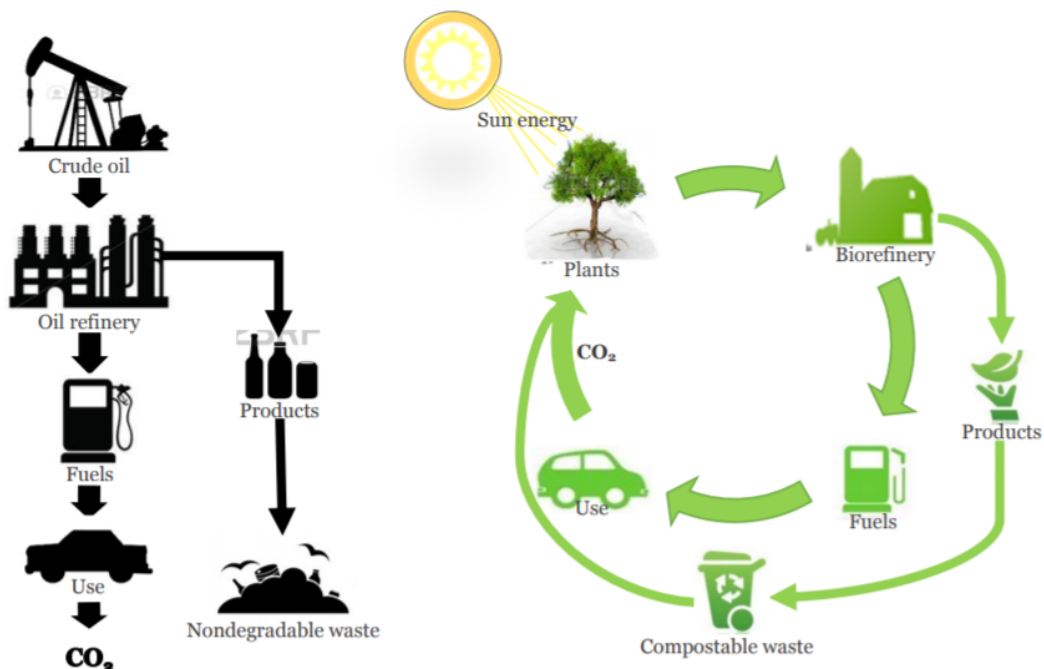
In dit subhoofdstuk wordt omschreven hoe energie kan gehaald worden uit biomassa, en dus ook biobrandstoffen. Hiervoor is het belangrijk om eerst te begrijpen wat biomassa en biobrandstoffen juist zijn. Daarna zal besproken worden welke omvormprocessen er bestaan om biomassa om te vormen in energie en andere producten.

2.2.3.1 Biomassa en biobrandstoffen

Biomassa is organisch materiaal van recente oorsprong dat direct of indirect is geproduceerd via levende organismen [32]. De biomassa van plantaardig materiaal is geproduceerd met behulp van fotosynthese. Hiermee wordt CO_2 en water van de omgeving, en energie van het zonlicht, omgezet in koolhydraten waaruit de plant is opgebouwd. Dieren zijn ook een vorm van biomassa, zo is ook de mest dat ze produceren. Dieren zijn natuurlijk een stap verder verwijderd van direct gebruik van zonlicht [33]. Hierdoor wordt er minder efficiënt gebruik gemaakt van de meest hernieuwbare bron van de aarde, de zon. Dit maakt dieren minder hernieuwbaar.

Biobrandstoffen zijn vaste, vloeibare of gasvormige brandstoffen afkomstig van verschillende soorten biomassa [32]. Bio-energie is de algemene term voor de energie opgeslagen in biobrandstoffen. De jaarlijks energie van de zon, opgeslagen in biomassa, is ongeveer 7 keer groter dan de jaarlijkse, door de mens geproduceerde energie [33].

Omdat biomassa, en bijgevolg ook biobrandstof, zijn oorsprong vindt in fotosynthese, waarbij CO_2 uit de atmosfeer wordt gehaald, wordt biomassa beschouwd als een CO_2 -neutrale brandstof [33]. In theorie klopt dit omdat er evenveel CO_2 uit de atmosfeer wordt onttrokken als er terug in terecht komt. Bij fossiele brandstoffen komt er enkel CO_2 in de atmosfeer terecht. Deze redenering wordt weergegeven in Figuur 11.



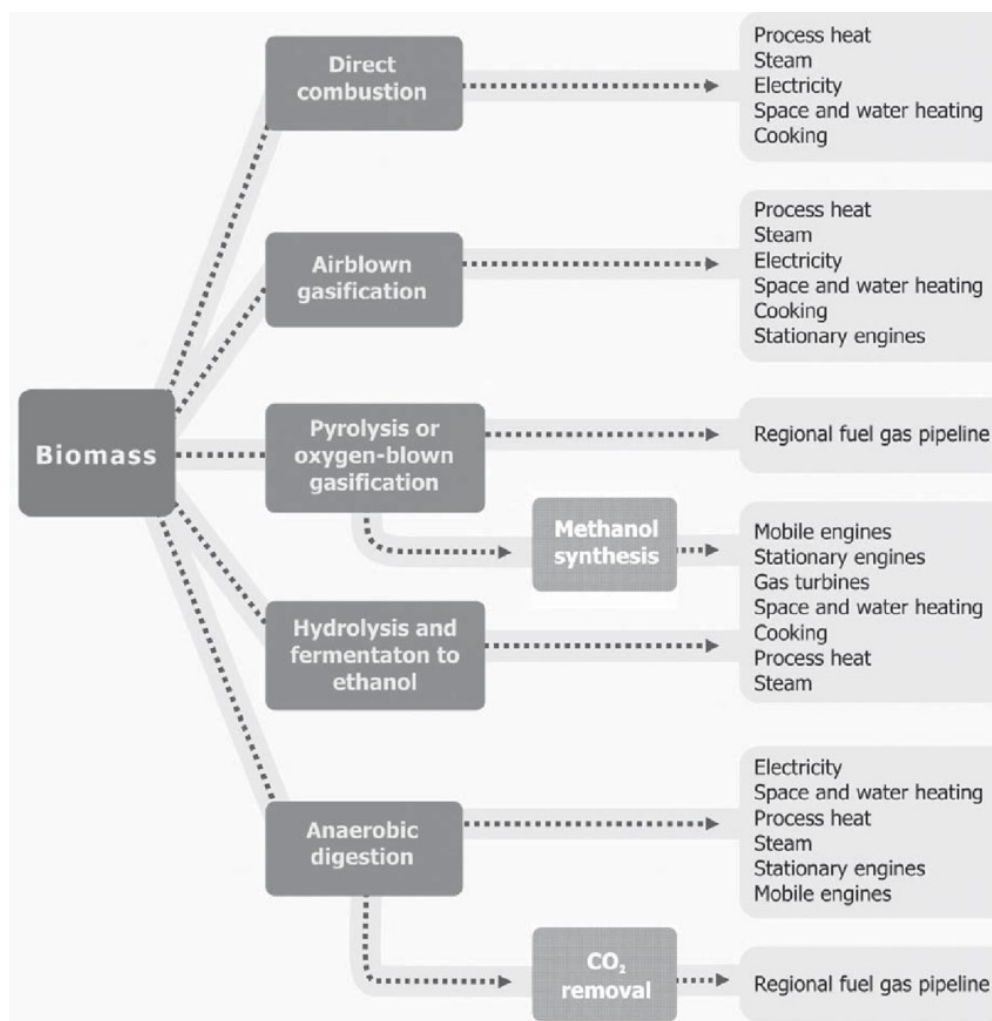
FIGUUR 11: VERGELIJKING TUSSEN BIOMASSA EN FOSSIELE BRANDSTOFFEN [34, P. 2]

In werkelijkheid is biomassa niet volledig CO_2 -neutraal omdat er tijdens de productie, distributie en transport wel CO_2 van fossiele oorsprong wordt uitgestoten [33].

2.2.3.2 Omvormen van biomassa

Biomassa kan zowel via thermochemische (verbranding, vergassing en pyrolyse) als biochemische processen (anaerobe vergisting) omgezet worden [35]. Bij thermochemische processen wordt er gebruik gemaakt van warmte en chemische katalyse, voor het creëren van bruikbare energie en andere producten van de biomassa [33]. Bij biochemische processen wordt er gebruik gemaakt van bio-organismen en biologische katalyse voor de omvorming. Biochemische en thermochemische processen zijn complementaire processen, ze geven samen een breed aanbod aan producten, zoals biobrandstoffen, warmte en energie.

In Figuur 12 wordt er een overzicht gegeven van de producten (energie, brandstof of warmte) die uit elk omvormproces kunnen gehaald worden.



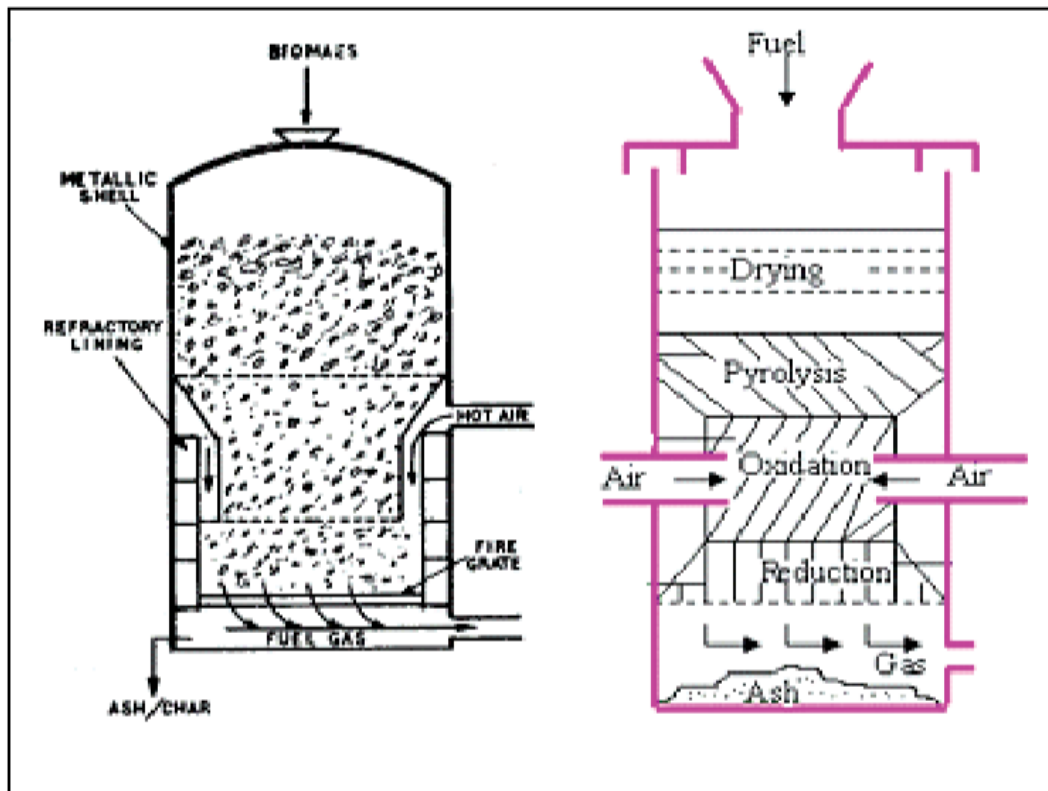
FIGUUR 12: OVERZICHT VAN PROCESSEN VAN BIOMASSA NAAR BRANDSTOFFEN, ENERGIE EN WARMTE [32, P. 7]

Thermochemische processen

Het eenvoudigste thermochemisch proces is de directe verbranding van biomassa voor de productie van energie en warmte [33]. Directe verbranding kan heel eenvoudig gebruikt worden om gebruik van fossiele brandstoffen te verminderen, aangezien deze methode kan uitgevoerd worden in een bestaande installatie. In de meer geavanceerde thermochemische installaties wordt gebruik gemaakt van vergassing, waarbij de biomassa wordt verwarmd in het bijzijn van lucht, zuurstof en/of stoom [33]. Hieruit ontstaat een gasmengsel dat kan gebruikt wordt als brandstof, maar ook voor de productie van andere brandstoffen en/of producten. De brandbare componenten van dit gas zijn koolstofmonoxide (CO), diwaterstof (H₂) en methaan (CH₄) [36]. Dit mengsel heeft een lagere calorische waarde dan andere brandstoffen. De

calorische waarde ligt tussen 5 en 6 MJ/kg terwijl dit bijvoorbeeld bij aardgas tussen de 35 en 50 MJ/kg ligt. Deze lage calorische waarde komt doordat het mengsel voor meer dan de helft uit stikstofgas bestaat [36].

Er bestaan verschillende types vergassers om biomassa om te zetten. Bekende voorbeelden zijn *updraft*, *downdraft* en *cross-draft* vergassers [37]. Voor elektriciteitsproductie op kleine schaal wordt voornamelijk gebruik gemaakt van een vergasser zoals afgebeeld in Figuur 13 [36]. De vergasser in Figuur 13 is van het type *downdraft fixed bed*. Hierbij verplaatst lucht/gas zich naar beneden door een bed van houtschilfers. Het voordeel van deze technologie is dat het een hoog rendement heeft, vermits het een vrij zuiver gas levert.



FIGUUR 13: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN INSTALLATIE VOOR VERGASSING VAN BIOMASSA TYPE DOWNDRAFT GASIFIER [37, P. 172]

De typische eigenschap van een *downdraft* of neerwaartse vergasser is de neerwaartse stromingsrichting van de biomassa. Om te zorgen voor een continue vergassing wordt er op regelmatige intervallen biomassa toegevoegd, van boven in de vergasser. De doorsnede van de vergasser kan variëren met de hoogte. Het eerste, en dus bovenste, proces dat de biomassa ondergaat in de vergasser is een droogproces. Dit gebeurt bij een temperatuur van 120 °C [37]. Deze temperatuur wordt verkregen door warmteoverdracht uit de lagere zones die een hogere temperatuur hebben. Deze warmte gaat voornamelijk d.m.v. geleiding door het bed naar de hogere zones [38].

Wanneer de biomassa doorzakt naar de tweede zone, start het tweede proces: pyrolyse [37]. In deze zone varieert de temperatuur van boven naar beneden tussen 200 en 600 °C. Doorheen de zone verliest de biomassa zijn vluchtige stoffen. Wanneer de temperatuur 400 °C bereikt begint er een exotherme reactie. Door deze reactie wordt de biomassa opgedeeld in waterdamp, methanol, azijnzuur en grote hoeveelheden koolwaterstof teer. De overgebleven vaste stoffen noemt men char. Dit is een product bestaande uit koolstof [37].

Na de pyrolyse komen de char en pyrolysegassen terecht in de oxidatie- of verbrandingszone [37]. In deze zone wordt er lucht ingevoerd en wordt er een temperatuur bereikt tussen de 900 en 1200 °C. Hierbij wordt een deel van de pyrolysegassen en de char verbrand en wordt er CO₂ en H₂O (waterdamp) bekomen [37], [38].

In de vierde zone (reductiezone) ligt de temperatuur tussen de 900 en 600 °C, met de hoogste temperatuur tegen de verbrandingszone [37]. De reacties in deze zone zijn endotherm en zorgen dat de temperatuur van de zone afneemt. Gassen (voornamelijk CO₂ en H₂O) die via de oxidatiezone naar de reductiezone lekken worden gereduceerd (tot respectievelijk CO en H₂) [38]. Er is steeds een deel char dat niet opgebruikt is. Bij optimale omstandigheden kan er echter een conversie van 95 % (droge massa) gehaald worden [38].

Wanneer het gas uit deze vergasser komt kunnen verschillende technieken, zoals een boiler met stoomturbine, stirlingmotor, brandstofcel,... gebruikt worden om elektrische energie te genereren [36]. Op deze schaal wordt de vergasser bijna exclusief gebruikt met een verbrandingsmotor. Zowel een Otto- als een dieselyclus kan gebruikt worden. Bij de Otto-cyclus kan men enkel het gas van de vergasser gebruiken, bij de dieselyclus moet men gebruik maken van *co-fuelling* met conventionele diesel.

Voor de verbrandingsmotor moet het gas zuiver zijn, anders krijgt men een laag ingangs- en een laag uitgangsvermogen [36]. Men moet dus een reinigingsinstallatie gebruiken bij de vergasser. Reinigingstoestellen die gebruik maken van water voor het wegspoelen van ongewenste materialen in de vergasser zijn zeer efficiënt. Het grootste nadeel hiervan is dat deze grote hoeveelheden giftige, kankerverwekkende, vloeibaar afval opleveren. Daarom wordt er de voorkeur gegeven aan een droge reinigingsinstallatie [36].

Vergassers zijn geschikt voor kleinere installaties met een vermogen kleiner dan 10 tot meer dan 100 kW. Een geschikte vergasser heeft tussen de 1.1 en 1.5 kg houtschilfers of tussen 1.8 tot 3.6 kg rijstkaf nodig voor de productie van 1 kWh aan elektrische energie [36].

Biochemische processen

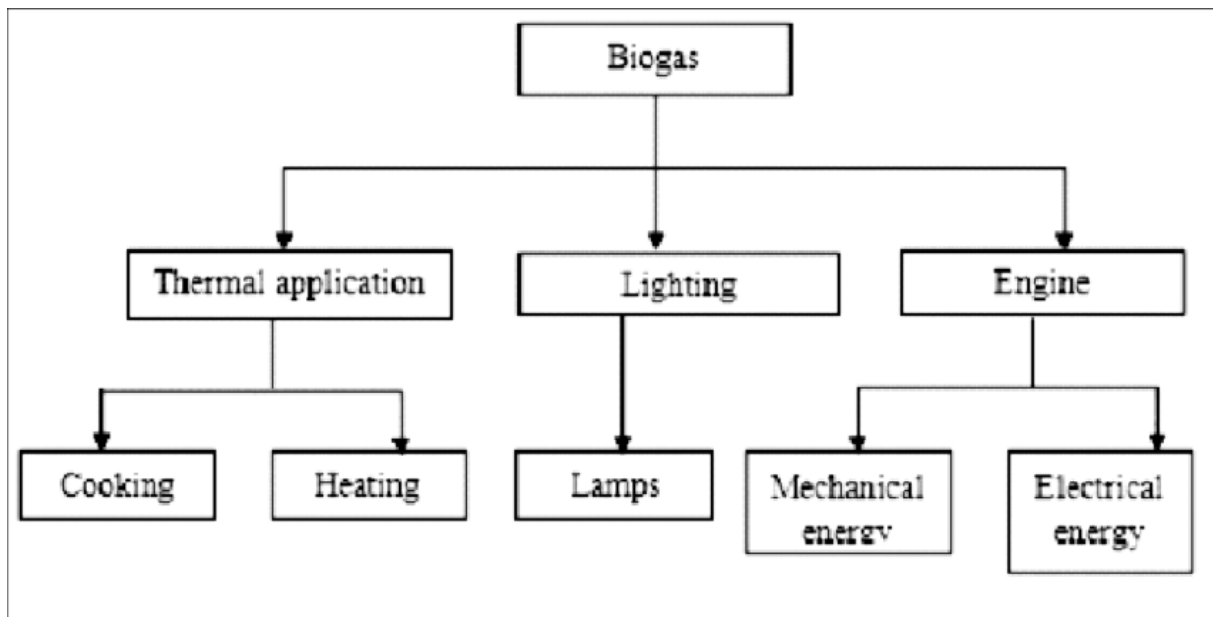
Biochemische conversie van biomassa bevat alle processen waarbij er gebruik gemaakt wordt van bacteriën, enzymen en micro-organismen om de biomassa op te breken in gasvormige of vloeibare biobrandstoffen, zoals biogas en bio-ethanol [39]. De populairste vormen van biochemische conversie zijn anaerobe vergisting en ethanolfermentatie.

Anaerobe vergisting is een veelgebruikte manier voor het recycleren van natte organische materialen [39]. Anaerobe vergisting vindt plaats wanneer bacteriën organische materialen afbreken in de afwezigheid van zuurstof, waarbij biogas ontstaat. De samenstelling van biogas wordt weergegeven in Tabel 7.

TABEL 7: SAMENSTELLING BIOGAS [40, P. 3]

Product	Percentage
CH₄	50-75%
CO₂	25-45%
H₂O (gas)	2-8%
O₂, N₂, NH₃, H₂, H₂S	Sporen

Biogas kan gebruikt worden voor schillende toepassingen, een overzicht van de verschillende toepassingen wordt weergegeven in Figuur 14.



FIGUUR 14: OVERZICHT VAN MOGELIJKE TOEPASSINGEN VAN BIOGAS [37, P. 178]

Het biogas kan gebruikt worden, zoals aardgas, als brandstof van een motor [40]. De energie-inhoud van biogas is voornamelijk afhankelijk van het percentage methaan (CH_4), een hoge methaaninhoud is dus gewenst. Een aandeel aan waterdamp en CO_2 is onvermijdelijk, maar het aandeel aan zwavel moet zoveel mogelijk beperkt worden, zeker bij gebruik van een motor. De gemiddelde calorische waarde van biogas ligt tussen de 21 en 23.5 MJ/m³. Een kubieke meter (m³) biogas komt overeen met 0.5 - 0.6 l diesel oftewel 6 kWh [40].

Voor de productie van elektriciteit uit biogas kan er gebruik gemaakt worden van een brandstofcel [40]. Het grootste probleem hiervan is dat er een zeer zuiver gas en een dure brandstofcel voor nodig is. In praktijk is dit dan ook niet haalbaar. Biogas wordt vooral gebruikt als brandstof voor een verbrandingsmotor in combinatie met een generator, voor de productie van elektriciteit. Daarnaast wordt biogas ook gebruikt om, op kleine schaal, rechtstreeks op te koken [41]. In theorie kunnen bijna alle verbrandingsmotoren, zoals gasturbines, stirlingmotoren, gasmotoren (Otto-cyclus) en dieselmotoren, gebruikt worden. In de praktijk geeft men de voorkeur aan de inwendige verbrandingsmotoren (diesel en gas) [40].

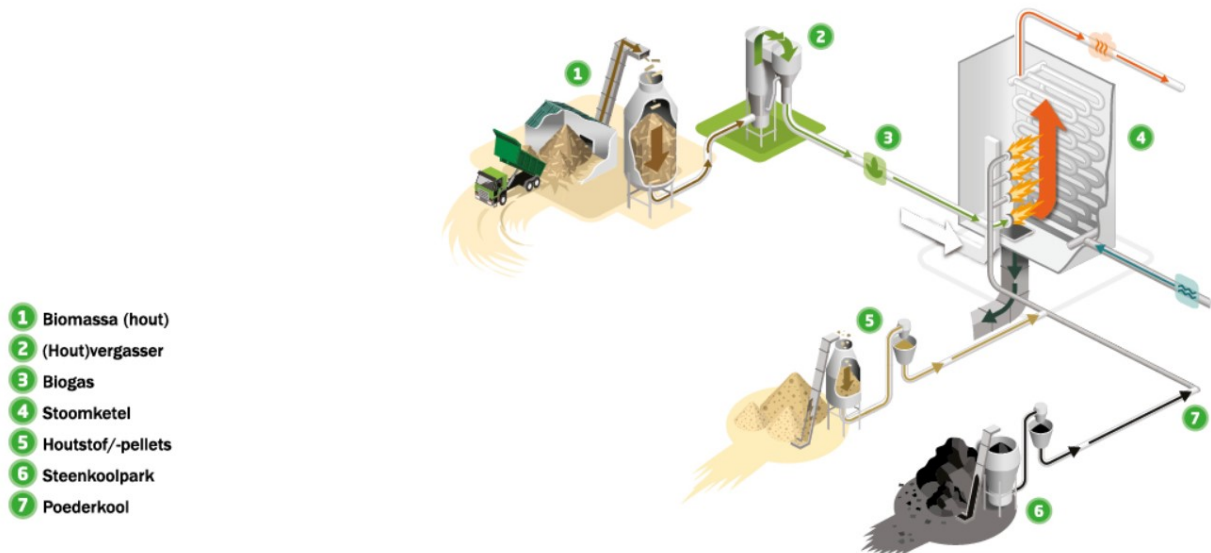
Ethanol kan geproduceerd worden door de afbraak van biomassa met een suikergehalte, zoals bieten en aardappelen, in suikermoleculen zoals glucose ($C_6H_{12}O_6$) en sacharose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) [39]. Bij ethanolfermentatie wordt ethanol gevormd door de biologische conversie van suiker in ethanol en CO_2 [39]:



Ethanol is één van de grootste alcoholische brandstoffen en wordt vermengd met andere brandstoffen [39].

Voorbeeld van biomassa centrale

Een schematische voorstelling van een biomassa elektriciteitscentrale wordt getoond in Figuur 15. Op deze figuur staan drie methodes voor de productie van elektriciteit: directe verbranding, vergassing en biomassa, vermalen met steenkool, verbranden. Directe verbranding gebeurt op het traject 5 naar 4: hier wordt biomassa onder de vorm van houtpellets of -stof verbrand om stoom te genereren en zo elektriciteit te produceren. Via het traject 1 naar 4 via 2 en 3 worden de houtpellets omgevormd naar biogas via een vergassing en bij traject 6 naar 4 via 7 wordt er biomassa, vermalen met steenkool, verbrand. Vermits er een fossiele brandstof (steenkool) bij wordt gebruikt is deze laatste methode natuurlijk niet meer CO₂-neutraal.

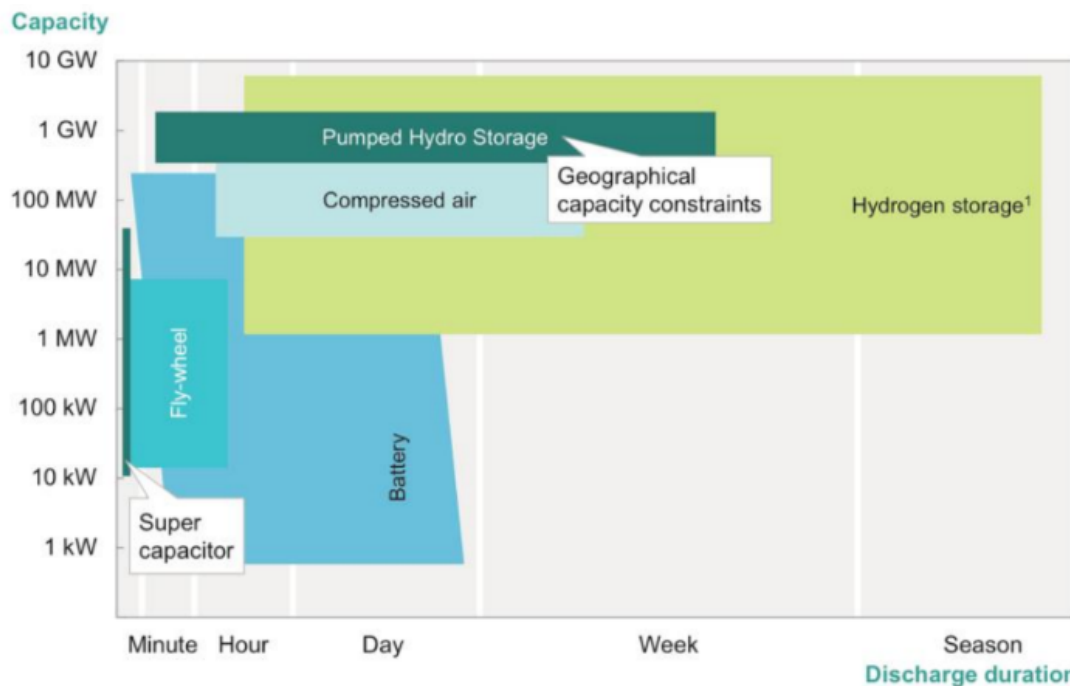


FIGUUR 15: VOORBEELD VAN EEN BIOMASSACENTRALE VOOR DE PRODUCTIE VAN ELEKTRICITEIT [42]

2.3 Energieopslagmethoden

Zoals vermeld in '1.3 Doelstellingen' moet de installatie minstens 48 uur lang, een vermogen van 252.5 W kunnen leveren. Dit moet ook mogelijk zijn wanneer de hernieuwbare energiebron niet aanwezig is, of er onderhoud aan de installatie nodig is. Hierdoor moet de installatie in staat zijn de energie te kunnen opslaan en leveren gedurende twee dagen.

In Figuur 16 wordt er een vergelijking geven van verschillende energieopslagtechnieken. Ze worden vergeleken aan de hand van hun capaciteit en hoelang ze elektriciteit kunnen leveren (ontlaadtijd).



FIGUUR 16: OVERZICHT VAN VERSCHILLENDE OPSLAGTECHNIEKEN MET HUN CAPACITEIT IN FUNCTIE VAN DE ONTLAADTIJD [43, P. 20]

Uit Figuur 16 kan er afgelezen worden dat er vier technieken mogelijk zijn voor dit project: pompaccumulatie (*Pumped hydro Storage*), perslucht energieopslag (*compressed air storage*), waterstofopslag en batterijen. Pompaccumulatie en perslucht energieopslag vragen speciale geografische eigenschappen die niet aanwezig zijn bij Le Coquetier Social en worden daarom dus ook niet onderzocht voor dit project. Andere technieken, zoals supercondensatoren of vliegwielen, zijn niet geschikt vermits de ontladingsduur te kort is. De onderzochte technieken voor dit project zijn:

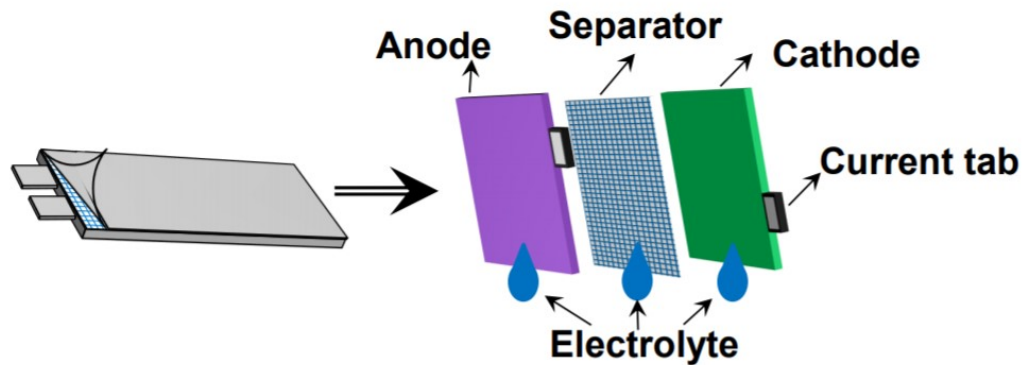
- Batterijen,
- Waterstofgas.

2.3.1 Batterijen

Bij batterijen wordt er elektrische energie opgeslagen op een elektrochemische manier. Hierbij wordt de elektrische energie eerst omgevormd in chemische energie. De energie wordt opgeslagen in een chemische oplossing in de batterij. De kleinste eenheid van een batterij is de elektrochemische cel.

Een elektrochemische cel heeft een typische spanning (elektrodepotentiaal), afhankelijk van de gebruikte materialen voor de elektroden. Om een hogere spanning en stroom te bekomen worden cellen in serie en in parallel verbonden. Deze combinatie van elektrochemische cellen

wordt een batterij genoemd [44]. Zoals weergegeven in Figuur 17 wordt een cel opgebouwd uit twee elektroden (de anode en de kathode). Deze worden gescheiden d.m.v. de separator en een elektrolyt.



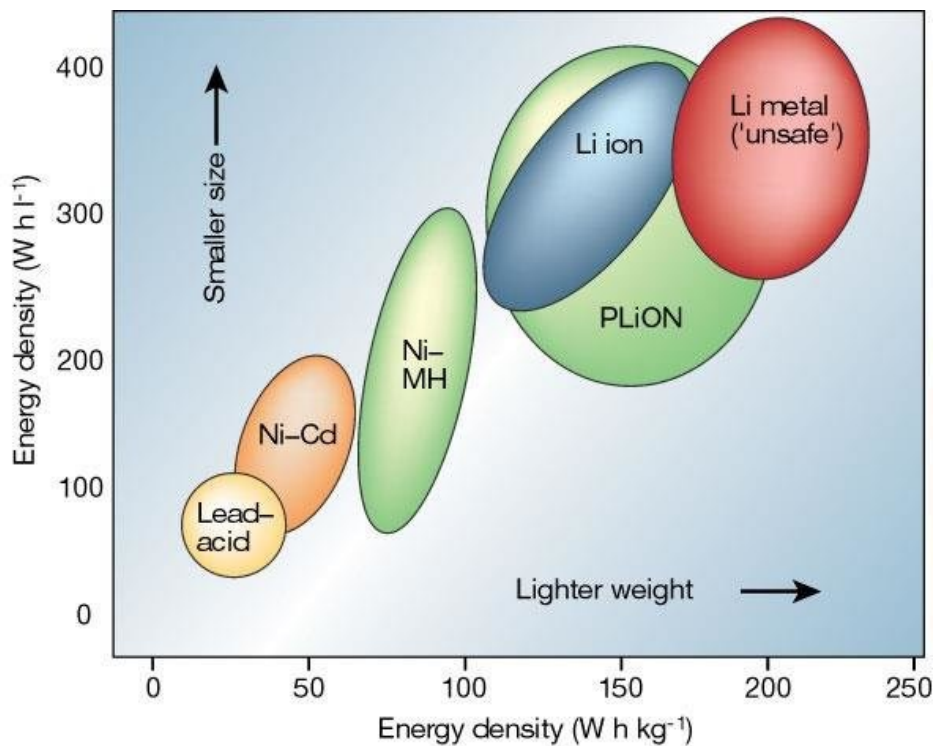
FIGUUR 17: OPBOUW VAN EEN CEL [45, P. 13]

Wanneer de cel zich in een gesloten kring bevindt, gebeuren er chemische reacties aan de elektroden, welke op hun beurt zorgen voor een stroom. Bij ontlading komen er elektronen vrij vanuit het elektrolyt naar de anode en ontstaan er bijgevolg ook ionen in het elektrolyt. Het omgekeerde proces gebeurt aan de kathode. Bij oplaadbare batterijen kan het proces omgekeerd worden, een wegwerpbatterij kan men enkel ontladen [46]. Binnen dit project is het natuurlijk enkel interessant om gebruik te maken van herlaadbare batterijen. Herlaadbare batterijen worden ook wel secundaire batterijen genoemd.

De twee belangrijkste eigenschappen van een batterij zijn de nominale spanning en de capaciteit. De spanning is bij een batterij steeds een DC-spanning, er moet dus een invertor geplaatst worden om de energie uit de batterijen te kunnen gebruiken. De capaciteit van een batterij geeft aan hoeveel energie er kan worden opgeslagen op de batterijen. Voor batterijen wordt de capaciteit gebruikelijk uitgedrukt in Ampère-uur (Ah).

Voor de productie van batterijen kan gebruik gemaakt worden van verschillende combinaties van materialen. Elk van deze combinaties heeft verschillende eigenschappen. Veelgebruikte types van secundaire batterijen zijn: Loodzuurbatterijen, alkalinebatterijen, zilverbatterijen en lithiumbatterijen [47].

De verschillende types van batterijen kunnen weergegeven worden in een energiedichtheidsdiagram zoals Figuur 18. Hieronder volgt een opsomming van de meest gebruikte types batterijen

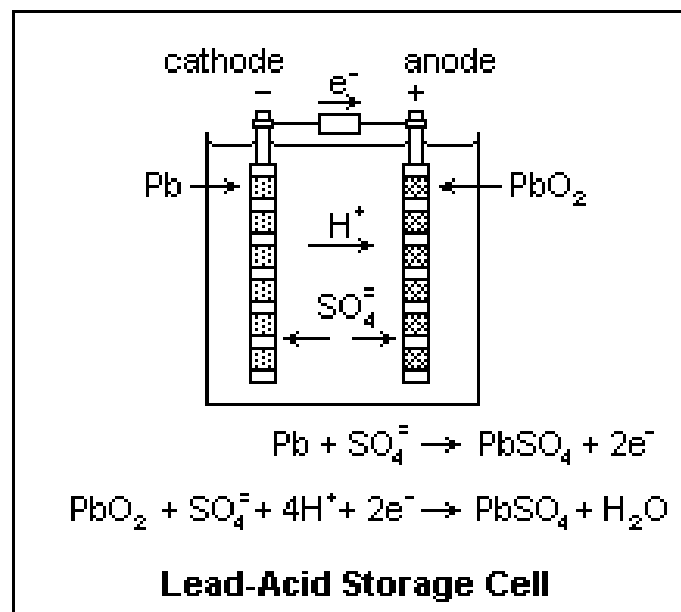


FIGUUR 18: ENERGIEDICHTHEIDSDIAGRAM VAN ENKELE VEELVOORKOMENDE BATTERIJTYPES [48].

Loodzuurbatterijen

Een veelgebruikte vorm van batterijen zijn loodzuurbatterijen. Dit type kent vele toepassingen binnen de communicatie- en automobiellndustrie. Loodzuurbatterijen hebben een lage energiedichtheid en vermogensdichtheid maar ook een lage prijs. Aan het einde van hun levensduur kunnen loodzuurbatterijen gemakkelijk gerecycleerd worden [47].

In Figuur 19 wordt de opbouw van een cel van een lood-zwavelzuurbatterij getoond. Deze is opgebouwd uit twee loden platen in een zuur-oplossing.



FIGUUR 19: OPBOUW VAN EEN CEL VAN EEN LOOD-ZWAVELZUURBATTERIJ [49]

Loodzuurbatterijen kunnen onderverdeeld worden in batterijen met een natte elektrolyt en ventielgeregelde batterijen. Twee types ventielgeregelde loodzuurbatterijen zijn gelbatterijen en 'Absorptive glass mat' (AGM) batterijen [47]. Het voordeel van AGM batterijen is dat ze een hoge stroom kunnen leveren. Gelbatterijen daarentegen hebben een langere levensduur [50].

Lithiumbatterijen

De meeste lithium-batterijen zijn lithium-ion batterijen. Daarnaast zijn er ook lithium-polymeerbatterijen. Lithium-ion batterijen zijn batterijen waarbij een lithium-ion van de negatieve elektrode naar de positieve elektrode beweegt bij het ontladen, en omgekeerd bij het opladen [51].

Dit type batterij heeft hogere gravimetrische energiedichtheid maar ook een hogere aankoopprijs dan bijvoorbeeld loodzuurbatterijen. Het wordt gebruikt bij elektronica zoals laptops en gsm's alsook in elektrische voertuigen [47].

Nikkel-Cadmiumbatterijen

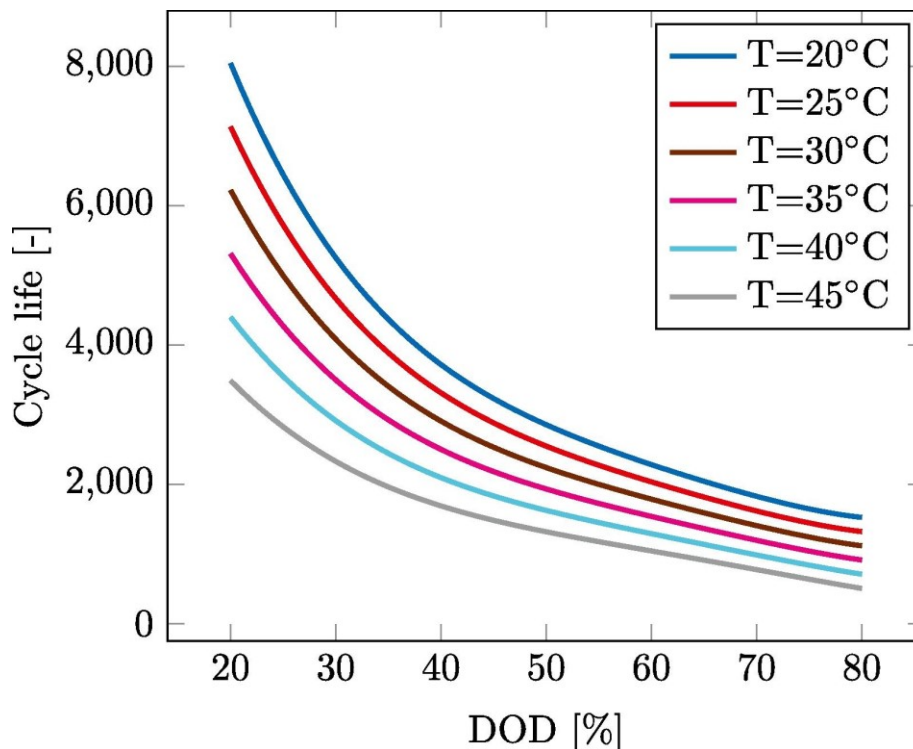
Er zijn verschillende types Nikkel-Cadmium-, of Ni-Cd, batterijen, elk met zijn eigen toepassingen en eigenschappen. Dit type wordt gebruikt voor zware toepassingen, zoals in de mijnbouw en bij spoorwegtoepassingen. Dit zijn robuuste batterijen die zowel op mechanisch als elektrisch vlak grote belastingen kunnen verdragen en bij extreme temperaturen kunnen werken. Over het algemeen is dit een goedkoop type batterij [47].

Nikkel-Metaalhydridebatterijen

Bij Nikkel-Metaalhydride-, of Ni-MH, batterijen bestaat de negatieve elektrode uit een metaalhydride. De energiedichtheid licht hoger dan bij Ni-Cd batterijen. Dit type batterij wordt gekenmerkt door zijn lange levensduur [52]. Ni-MH batterijen hebben een relatief laag rendement en vertonen een grote mate van zelfontlading [44].

Degradatie van batterijen

Een nadeel van batterijen is de degradatie die optreedt. Deze degradatie kan weergegeven worden m.b.v. de *cycle life*. De cycle life is gedefinieerd als het aantal cycli dat een batterij kan doorlopen voordat de capaciteit gedaald is tot 80% van de oorspronkelijke capaciteit. Deze hangt af van het type batterij, de werkingstemperatuur en de (DOD) *Depth of Discharge* of ontladingsdiepte van de batterij, zoals weergegeven in Figuur 20 voor een loodzuurbatterij [53].



FIGUUR 20: CYCLE LIFE VAN EEN LOODZUURBATTERIJ IN FUNCTIE VAN DE ONTLADINGSDIEPTE, BIJ VERSCHILLENDE WERKINGSTEMPERATUREN [53, P. 1633]

2.3.2 Waterstofgas

Naast batterijen bestaat er nog een andere, opkomende, vorm van opslag van elektrische energie, namelijk waterstofgas. Waterstof wordt beschouwd als een belangrijke energiedrager, en wordt vaak beschouwd als een milieuvriendelijke brandstof [54]. Wanneer deze reageert met zuurstof wordt er geen CO₂ uitgestoten, maar ontstaat er alleen water (H₂O).

Er bestaan verschillende vormen van waterstof: grijze, groene en blauwe waterstof [55]. Groene waterstof is waterstof dat geproduceerd is met behulp van enkel groene energiebronnen, zoals wind- en zonne-energie. Een voorbeeld van groene waterstof is het waterstofzonnepaneel van KULeuven, zoals eerder vermeld bij '2.2.1. Zonne-energie'. Maar deze vorm kan ook geproduceerd worden met een elektrolytische cel en elektrische energie uit een hernieuwbare energiebron. Het grootste probleem van groene waterstof is dat de prijzen tot 5 keer hoger kunnen zijn dan grijze waterstof [55].

Waterstof geproduceerd met als grondstof fossiele brandstoffen, waarbij er CO₂ vrijkomt, noemt men grijze waterstof. Blauwe waterstof vindt zijn oorsprong ook bij fossiele brandstoffen maar het vrijkomen van CO₂ wordt vermeden door deze op te vangen en deze op te slagen of te gebruiken voor andere toepassingen. Blauwe waterstof kan ook een restproduct zijn uit chemische productie. Bijvoorbeeld de restwaterstof die vrijkomt bij de productie van chloor [55].

De meeste waterstofgassystemen zijn opgebouwd uit een elektrolytische cel, een waterstoftank en een brandstofcel [56]. De elektrolytische cel splitst water onder invloed van een elektrisch veld in waterstofgas en zuurstof. Vermits de volumetrische energiedichtheid van waterstof laag is (tussen 2.8 en 3.3 Wh/l bij 1 atmosfeer en 25°C [57]) wordt waterstof meestal onder een hoge druk opgeslagen, om de massadichtheid te verhogen. De opslag van waterstof gebeurt in een waterstoftank onder hoge druk. Hoe hoger de druk, hoe meer er afgeweken wordt van de ideale gaswet. Meestal wordt als maximale druk 700 bar genomen, vermits de toename in energiedichtheid hierna sterk afwijkt van de lineaire stijging bij lagere drukken. In de meeste gevallen is hierna de kleine toename van energiedichtheid niet meer

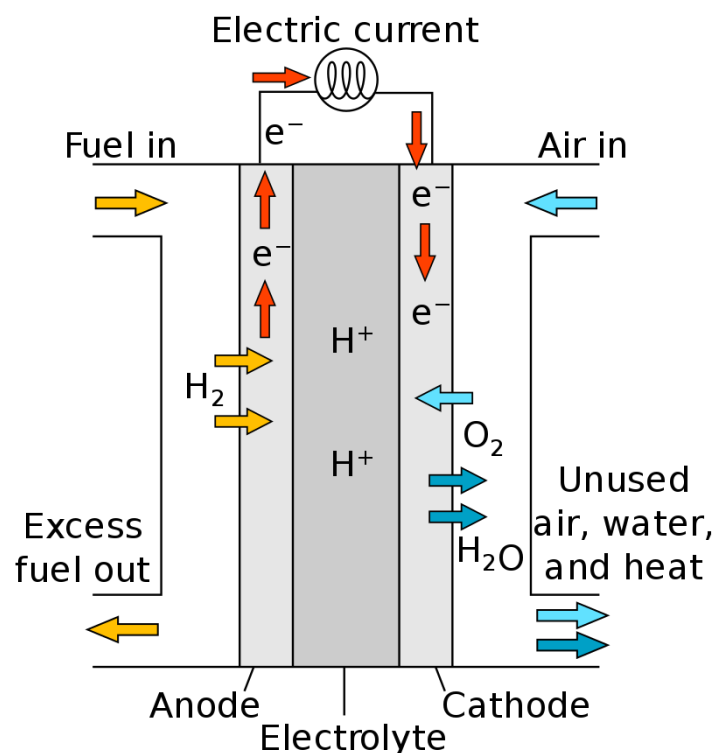
gerechtvaardigd tegenover de zwaardere belasting op de systeemelementen. Bij een druk van 700 bar is de massadichtheid van waterstofgas 37 kg/m^3 [58]. De grootste gebruikte drukken zijn drukken tot 900 bar, in bovengrondse systemen [56]. Het grote voordeel van waterstof is dat het niet degradeert, dat wil zeggen dat de energie kan opgeslagen worden zonder dat energie verloren gaat tijdens de opslag [55].

Een andere manier om waterstof op te slaan is in vloeibare vorm onder lage temperaturen [55], [56]. De waterstof wordt dan opgeslagen met behulp van absorptie in metaalhydride of chemisch gebonden in complexe hydriden. In de praktijk wordt er meestal gekozen voor opslag onder hoge druk.

Om de elektrochemische energie van de waterstof om te vormen naar elektrische energie wordt er gebruik gemaakt van een brandstofcel. Hierbij wordt de waterstofgas samen gebracht met zuurstof er ontstaat water en elektrische energie [56]. Zoals bij de elektrochemische cel van een batterij, bestaat de brandstofcel ook uit een anode, een kathode en een elektrolyt. Brandstofcellen kunnen opgedeeld worden volgens verschillende criteria, waaronder de aggregatietoestand van de waterstof, de gebruikte materialen of het type elektrolyt. De meest gebruikte onderverdeling is een onderverdeling op basis van de werkingstemperatuur [59]:

- lage temperatuur: $20^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$,
- middelhoge temperatuur: $200^\circ\text{C} - 300^\circ\text{C}$,
- hoge temperatuur: $600^\circ\text{C} - 1500^\circ\text{C}$.

Een voorbeeld van een brandstofcel is weergegeven in Figuur 21, dit is een 'Proton exchange membrane fuel cell' (PEMFC). De werkingstemperatuur van dit type ligt rond de 100°C [60], waardoor het geclassificeerd kan worden als een brandstofcel die werkt bij lage temperatuur.

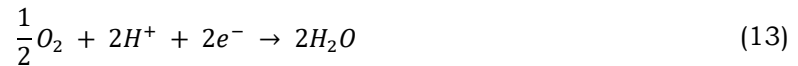


FIGUUR 21: EEN SCHEMATISCHE TEKENING VAN EEN PROTON-EXCHANGE MEMBRANE BRANDSTOFCEL [61]

Bij dit type brandstofcel wordt er een proton of eenwaardig positief waterstofion (H^+) uitgewisseld via een vast polymeer elektrolyt. De chemische reactie die plaats vindt aan de anode is [60]:



De chemische reactie die plaats vindt aan de kathode is [60]:



Deze kunnen gecombineerd worden tot de totale reactie die plaats vindt in de brandstofcel:



Hieruit is te zien dat bij de omzetting van de chemische energie naar elektrische energie, in een brandstofcel, het restproduct water is.

2.4 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn er verschillende methoden aangehaald voor het opwekken en opslaan van energie. Sommige methoden zoals, supercondensatoren en vliegwielen, zijn voor dit project niet geschikt vermits deze technisch gezien niet de juiste eigenschappen hebben (in dit geval een te korte ontlaadtijd). Daarnaast zijn er methoden die niet aan de doelstellingen voldoen omdat ze niet duurzaam zijn, zoals verbrandingsmotoren. Als laatste zijn er ook methoden, zoals waterkracht, geothermie, pompaccumulatie en perslucht energieopslag die niet mogelijk zijn omdat de omgeving rond Le Coquetier Social hier niet voor geschikt is.

De geschikte methoden, voor het opwekken en opslaan van energie, die wél mogelijk zijn voor dit project, zijn besproken in dit hoofdstuk. Vermits al deze technieken mogelijk zijn, is het niet eenvoudig om de juiste keuze te maken op basis van een literatuurstudie. In '3 *Ontwerpkeuzes*' worden de verschillende methoden met elkaar vergeleken. Deze vergelijking gebeurt op basis van de voor- en nadelen. Alsook op basis van een berekening, waarbij de techniek gedimensioneerd wordt om aan de doelstellingen te voldoen.

3 Ontwerpkeuzes

Zoals vermeld in '2.4 Conclusie' zijn er, zowel voor de energiebron als voor de energieopslagmethode, meerdere types mogelijk. In dit hoofdstuk worden eerst de verschillende energiebronnen gedimensioneerd op basis van de doelstellingen van Le Coquetier Social, waarna er een keuze wordt gemaakt. Daarna worden eventuele verdere ontwerpkeuzes toegelicht, zodat in Hoofdstuk 4 meteen kan gestart worden met de uitwerking van het concept van de energieopwekking.

Daarnaast wordt er voor de energieopslagmethodes eveneens een vergelijking gemaakt tussen de mogelijke methoden, die ook afgesloten worden met een definitieve keuze. Deze keuze wordt verder uitgewerkt in Hoofdstuk 5.

3.1 Keuze van de energiebron

Uit de literatuurstudie blijkt dat er drie types van energieopwekking mogelijk zijn: een PV-installatie, een windmolen en een biomassa-installatie. In '1.3 Doelstellingen' wordt vermeld dat er een gemiddeld vermogen van 252.5 W geleverd moet kunnen worden. Hieronder worden de drie types energiebronnen gedimensioneerd, om aan deze doelstelling te voldoen.

3.1.1 Dimensionering van een PV-installatie

Uit Tabel 3 blijkt dat de gemiddelde stralingsintensiteit van de zon in Ndiéguène 227 W/m² is. Vermits er iedere maand voldoende energie moet opgewekt worden om aan de doelstelling te voldoen, wordt er gerekend met het laagste maandgemiddelde. In december is de stralingsintensiteit 190 W/m².

Voor de totale efficiëntie van een PV-installatie wordt 10% genomen, zoals beschreven in '2.2.1.3 PV-installaties'.

$$\frac{P_{essentieel}}{\eta * P_{invalend}} = A_{zonnepanelen} \quad (15)$$

$$\frac{252.5 \text{ W}}{0.10 * 190 \text{ W/m}^2} = 13.3 \text{ m}^2 \quad (16)$$

Indien er op elk moment een gemiddeld vermogen van 252.5W beschikbaar moet zijn, moet er voor 13.3 m² aan zonnepanelen geïnstalleerd worden. Bij deze berekening is er gerekend met de zonne-instraling op het horizontale vlak. Zoals vermeld in '2.2.1.3 PV-installaties' kan de opbrengst van een PV-installatie stijgen indien er een andere hoek of een volgmechanisme wordt geïnstalleerd. Hoe groot de stijging in opbrengst is, hangt af van de latitude van de installatie. Uit Figuur 4 blijkt dat de opbrengst, bij een installatie onder de optimale hoek, met 3% stijgt. De benodigde oppervlakte is dan:

$$\frac{252.5 \text{ W}}{0.10 * 190 \text{ W/m}^2 * 1.03} = 12.9 \text{ m}^2 \quad (17)$$

Uit Figuur 4 blijkt dat de opbrengst met 28% stijgt indien er een volgmechanisme op de twee assen wordt geïnstalleerd. De benodigde oppervlakte is dan:

$$\frac{252.5 \text{ W}}{0.10 * 190 \text{ W/m}^2 * 1.28} = 10.4 \text{ m}^2 \quad (18)$$

In het geval van een verticaal of horizontaal volgmechanisme (met de andere as vastgezet op de optimale hoek) stijgt de opbrengst respectievelijk met 6% en 24%. Bij deze gevallen ligt de benodigde oppervlakte tussen de vorige berekende oppervlaktes.

3.1.2 Dimensionering van een windturbine

Het rendement van een windturbine is kleiner dan 1 vermits er bij elke conversiestap verliezen optreden. Volgens een onderzoek van de Vries is de mechanische efficiëntie van een windturbine tussen de 96 en 99 %. De elektrische efficiëntie van windturbines met een vermogen tussen 0.5 kW en 10 kW ligt tussen de 60 en 70 %. De vermogenscoëfficiënt van een kleine windturbine ligt tussen 0.30 en 0.42 [62]. Indien er gekozen wordt voor een generator met permanente magneten, een controller i.p.v. een gelijkrichterbrug en een relatief hoge spanning, kan er voor het elektrisch rendement met de hoogst mogelijke waarde gerekend worden [30], [31]. Voor de anderen coëfficiënten wordt er telkens met de gemiddelde coëfficiënt, respectievelijk 97.5 % voor het mechanische rendement en 0.36 voor de vermogenscoëfficiënt gerekend.

Het totale rendement (mechanische en elektrisch rendement samen) kan berekend worden volgens:

$$\eta_{tot} = \eta_{mech} * \eta_{elek} = 0.975 * 0.7 = 0.683 \quad (19)$$

Het gemiddeld windvermogen dat er beschikbaar moet zijn op het rotoroppervlak:

$$P_{wind} = \frac{P_{mech}}{C_p \eta_{tot}} = \frac{252.5 \text{ W}}{0.36 * 0.683} = 1100 \text{ W} \quad (20)$$

Om te berekenen hoe groot het rotoroppervlakte moet zijn, moet er geweten zijn wat de windsnelheid op de hoogte van de windmolen is. Een vuistregel is dat windturbine minstens 9m hoger moeten zijn dan de hoogste objecten in een straal van 150 m [63]. In de omgeving zijn er enkele vrijstaande bomen en lage bebouwingen, met een hoogte van ongeveer 4m. Daardoor wordt er gekozen voor een hoogte van 13 m voor de dimensionering van de windmolen.

Zoals uitgelegd in '2.2.2.1 Wind' kan een gekende windsnelheid omgerekend worden naar een andere hoogte. De gekende windsnelheid van de wind op een hoogte van 50 m moet worden omgerekend naar de hoogte van de windmolen:

$$v_{13} = v_{50} \left(\frac{z_{13}}{z_{50}} \right)^a = 4.36 * \left(\frac{13}{50} \right)^{0.15} = 3.56 \text{ m/s} \quad (21)$$

Het terrein van Le Coquetier Social is niet volledig recht, maar is licht glooiend, zoals besproken in '1.3.3 Omgeving en locatie van het pluimveebedrijf'. Er zijn verschillende parameters die belangrijk zijn in de keuze van de locatie voor de windmolen. Ten eerste moet de windmolen ver genoeg zijn van bebouwingen, zodat er geen gevaarlijke situatie kan optreden indien er een structureel defect optreedt. Ten tweede mag de windmolen niet te ver van de rest van de elektrische installatie staan, zodat de investeringskosten in elektrische kabels, en de spanningsval, beperkt blijven. Ten derde moet de ondergrond geschikt zijn voor de fundering. Ten vierde moet de windmolen op een goede locatie staan om, zo veel mogelijk niet-turbulente wind op te vangen.

De optimale plaats blijkt op de heuvelflank te zijn. Hierdoor stijgt de opbrengst van de windmolen met 20 % [64]. Dit is zo'n 40 m van de dichtstbijzijnde kippenstallen, en 45m van de dichtstbijzijnde woonbebouwing. Uit '4.3 Fundering' zal blijken dat de ondergrond hier geschikt is voor de windmolen, en uit '5.6.1 Kabelberekening driefasige kabel tussen windmolen en controller' zal blijken dat deze afstand elektrisch gezien te overbruggen valt.

Uit de bovenstaande berekeningen kan nu het benodigde doorstroomoppervlak bepaald worden, met de formule voor het vermogen van een windmolen, zoals uitgelegd in '2.2.2 Windenergie':

$$A = \frac{P_{wind}}{\frac{1}{2} \rho v_{13}^3 * C_{heuvelflank}} = \frac{1100 W}{\frac{1}{2} * 1.28 \frac{kg}{m^3} * \left(3.56 \frac{m}{s}\right)^3 * 1.20} = 31.7 m^2 \quad (22)$$

De straal van de rotor is 3.18 m. Bij deze berekening is er enkel gerekend met de efficiëntie, vermogenscoëfficiënt en gemiddelde windsnelheid. Zoals uitgelegd in '2.2.2 Windenergie' kan de windsnelheid op een locatie weergegeven worden m.b.v. een kansverdeling. Het vermogen dat opgewekt wordt door de windturbine heeft geen lineair verband met de windsnelheid. Boven de startsnelheid van de turbine volgt de curve een derdemachtsverband tot een bepaalde snelheid. Vermits hier bij voorgaande berekening geen rekening mee gehouden is, is deze berekening maar een benadering, die nauwkeuriger uitgewerkt wordt indien er voor een windmolen gekozen wordt.

3.1.3 Dimensionering van een biomassainstallatie

Als laatste energiebron wordt de biomassainstallatie gedimensioneerd. Zo kan er bepaald worden of hiermee de energiedoelstelling kan behaald worden. Zoals besproken in '2.2.3 Energie uit biomassa en biobrandstoffen' zijn er verschillende types van biomassa. De grootste vorm van beschikbare biomassa is hout. In onderstaande berekening wordt er enkel rekening gehouden met opgewekte energie door middel van verbranding. Voor hout wordt een stookwaarde van $H_{b,hout} = 15\,350 \text{ kJ/kg}$ [6, p. 238] genomen. Voor dit project is een vermogen van 252.5 W nodig, daarmee wordt het volgende verbruik per jaar bekomen:

$$E_{jaar} = 365.25 \frac{dagen}{jaar} * 24 \frac{uur}{dag} * 252.5 W = 2192 \text{ kWh/jaar} \quad (23)$$

Dit komt overeen met een jaarverbruik van:

$$E_{jaar} = 2192 \frac{kWh}{jaar} * 3600 \frac{kJ}{kWh} = 7.89 * 10^6 \text{ kJ} \quad (24)$$

rekening houdend met een gemiddelde efficiëntie van 23% tot 25% [35] komt dit overeen met een jaarlijkse hoeveelheid hout:

$$m_{hout} = \frac{E_{jaar}}{H_{b,hout} \eta_{omzetting}} = \frac{7.89 * 10^6 \text{ kJ}}{15\,350 \frac{kJ}{kg} * 0.25} = 2056 \text{ kg} \quad (25)$$

3.1.4 Vergelijking tussen de energiebronnen

In deze paragraaf wordt voor de verschillende energiebronnen gekeken of hiermee de doelstelling van Le Coquetier Social, zoals besproken in '1.3 Doelstellingen' kan gehaald worden. Daarnaast worden de voor- en nadelen van de verschillende energiebronnen besproken. Deze voor- en nadelen worden samengevat in Tabel 8. Uit de dimensionering van de windmolen en de PV-installatie blijkt dat het haalbaar is om de energiebehoefte te behalen. Uit de dimensionering van de biomassainstallatie blijkt dat er jaarlijks meer dan 2 ton biomassa nodig is om aan de energiebehoefte te voldoen. Met het hout dat komt van de snoei van de aanwezige bomen is het onmogelijk om deze hoeveelheid hout te bekomen. Zelfs met de biomassa afkomstig van de kippen erbij is er nog steeds onvoldoende biomassa om voldoende energie op te wekken. Vermits de biomassainstallatie niet voldoet aan de energiebehoefte, en dus niet kan gekozen worden, wordt er een dubbel minteken geplaatst in de eerste rij van Tabel 8.

Bij zonnepanelen kan als argument aangehaald worden dat de constructie hiervan eenvoudig verloopt. Bij een windmolen hangt de eenvoud van de constructie af van het gekozen ontwerp (een vakwerktoren of een tilt-up-toren). Hierdoor wordt deze rij opgedeeld in de tabel. De constructie is voor beide types torens wel moeilijker dan bij een PV-installatie, vermits windmolens (voor kleine vermogens) veel minder voorkomend zijn dan PV-installaties.

Hierdoor zijn de benodigde onderdelen (zoals wieken) moeilijker te verkrijgen. Ook de eenvoud van het onderhoud hangt af van het type toren. De bereikbaarheid van de installatie is over het algemeen wel eenvoudiger bij zonnepanelen dan bij een windmolen, vermits bij een windmolen de generator zich bij gewone werking op een grote hoogte bevindt, ongeacht het type toren. Bij een biomassainstallatie gebeurt de constructie eveneens op een bereikbare plaats. Vermits dit type energiebron, net zoals de windmolen, minder voorkomend is dan een PV-installatie, zijn de onderdelen minder eenvoudig te verkrijgen. Daarom wordt er eveneens een plus-minus score gegeven bij eenvoud constructie.

Vermits Le Coquetier Social gelegen is in een zanderige omgeving kan er moeilijk verhinderd worden dat er zich stof gaat neerzetten op de zonnepanelen. Omdat er in Le Coquetier Social geen stevige daken zijn waar zonnepanelen op geplaatst kunnen worden, zou de installatie zich dicht tegen de grond bevinden. Dit heeft als voordeel dat het eenvoudig te bereiken is, maar als nadeel dat er gemakkelijker stof op neerdaalt. Uit gesprekken met Afractie blijkt dat er zich geregeld een waterschaarste voordoet, door het ontbreken van een betrouwbare watervoorziening, en de vele droogtes. Dit kan een probleem vormen bij het reinigen van de installatie. Hierdoor is het onderhoud van zonnepanelen niet eenvoudig. De waterschaarste vormt een kleiner probleem bij een windmolen, vermits deze zich veel hoger boven de grond bevindt, en het cruciale oppervlak (voornamelijk de generator) veel kleiner is. Het onderhoud van zonnepanelen is dus niet zo eenvoudig. Bij een biomassainstallatie is het onderhoud eveneens minder eenvoudig uit te voeren, vermits er vele onderdelen zijn. Ook is dit een minder frequent voorkomende energiebron dan bijvoorbeeld een PV-installatie, waardoor de onderdelen en gespecialiseerde kennis schaarser zijn. Ook is hier geen grote hoeveelheid water voor nodig, en moet dit niet zo frequent gebeuren als bij een PV-installatie. Wel moet er constant nieuwe biomassa aangevoerd worden, wat ook als een frequent 'onderhoud' kan gezien worden. Bij een biomassainstallatie zijn alle onderdelen goed bereikbaar

TABEL 8: VOOR- EN NADELEN VAN DE MOGELIJKE ENERGIEBRONNEN

	PV-installatie	Windmolen		Biomassa
		Tilt-up	vakwerk	
Voldoet aan energiebehoefte	+	+		--
Eenvoud constructie	+	±	-	±
Eenvoud onderhoud	-	+	-	±
Frequentie onderhoud	-	+		-
Bereikbaarheid	+	-		+
Totale som (± = 0)	1	2	-1	-2

Uit Tabel 8 blijkt dat zonnepanelen en een (tilt-up) windmolen vergelijkbaar scoren. In overleg met Afractie wordt er gekozen voor een windmolen, met de stoffige omgeving als cruciale factor. Vermits er verschillende types torens voor windmolens zijn, wordt er hierna een vergelijking gemaakt tussen de types. Zodat er in hoofdstuk 4 kan begonnen worden met het mechanisch ontwerp van de toren.

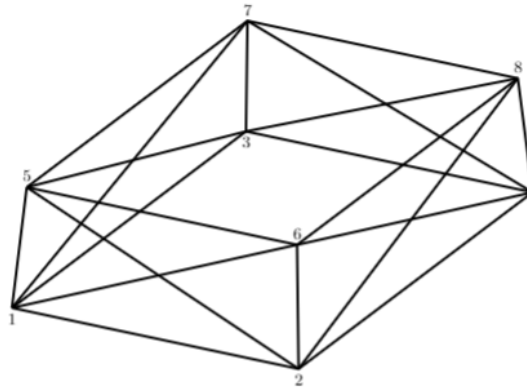
3.2 Keuze van het torenontwerp

Zoals besproken in '2.2.2 Windenergie' zijn er verschillende types torens voor windmolens. De twee belangrijkste types zijn torens die uit betonnen of stalen buizen bestaan, en dan op elkaar geplaatst worden, en torens die bestaan uit een vakwerk. Uit Tabel 8 komt de tilt-up toren naar voor als de beste keuze, maar vermits deze keuze cruciaal is voor het volledige

mechanische ontwerp van de windmolen, worden er in dit subhoofdstuk twee types torens conceptueel uitgewerkt, een vakwerktoren en een tilt-up toren. Dit zijn de twee belangrijkste types torens die te construeren zijn op het terrein van Le Coquetier Social. Voor de meeste andere types is er een kraan nodig om de toren op te bouwen. Dit is echter niet mogelijk vermits Le Coquetier Social enkel bereikbaar is via een smalle zandweg. Een vakwerktoren kan per module opgebouwd worden. Een tilt-up toren kan op de grond opgebouwd worden, en erna rechtgetrokken worden. Hierdoor is er geen kraan nodig voor de constructie van deze types. Hieronder wordt er eerst het concept uitgewerkt voor beide types. Daarna wordt er een vergelijking gemaakt tussen de types, waarbij de voor- en nadelen besproken worden. Deze keuze wordt in '4 Mechanisch ontwerp van de windmolen' gedetailleerd uitgewerkt.

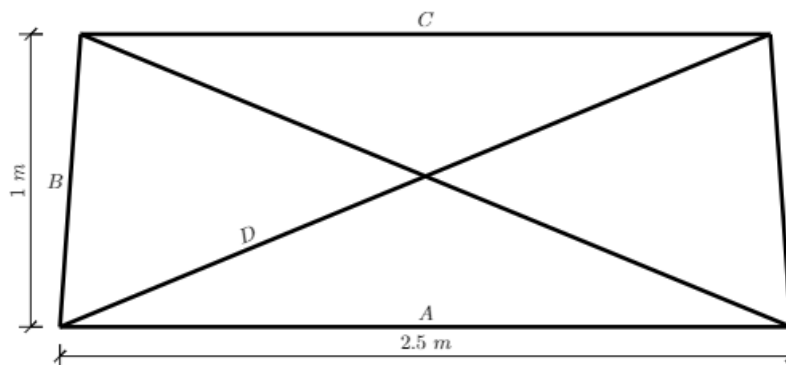
3.2.1 Vakwerktoren

Vermits de windmolen een hoogte van 13 m moet hebben, zoals berekend in '3.1.2 Dimensionering van een windturbine', wordt er gekozen voor een vakwerktoren van 12m hoog. Hierboven komt nog een draaiende as waar de rotor op staat. Elke vakwerkmodule is 1m hoog. In Figuur 22 wordt een concepttekening getoond van een module.



FIGUUR 22: 3D-CONCEPTTEKENING VAN EEN VAKWERKMODULE

In Figuur 23 wordt een schets van het zij aanzicht van de onderste torenmodule getoond.



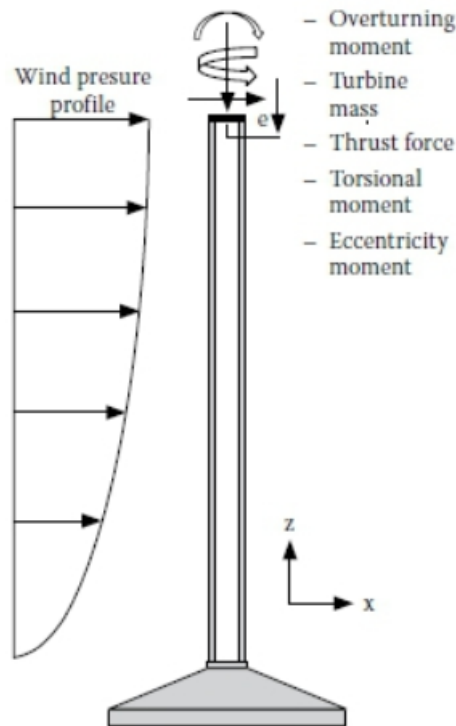
FIGUUR 23: CONCEPTTEKENING ZIJAAZICHT ONDERSTE VAKWERKMODULE

De modules worden opgebouwd met L-profielen van 0.05 m op 0.05 m. De bodem van de toren is 2.50 m * 2.50 m. De bovenkant is 1.00 m * 1.00 m.

Bij het ontwerp van de toren is het belangrijk dat deze niet bezwijkt onder de inwerkende krachten, zowel bij normale werking als bij extreme omstandigheden (in een storm bijvoorbeeld). Om een goed ontwerp te kunnen maken is het belangrijk dat alle inwerkende krachten gekend zijn. In Figuur 24 wordt een overzicht gegeven van de verschillende krachten die inwerken op een windmolen.

Deze krachten bestaan uit: windbelasting (op de toren en op de wieken) en het eigengewicht van de windmolen (generator, wieken, toren en alle overige onderdelen).

De inwerkende momenten zijn: het torsievormend moment (de windbelasting die voor een torsie zorgt), het liftmoment en het excentrisch moment (doordat het massamiddelpunt van het gezamenlijk eigengewicht van de generator en de bladen zich niet loodrecht boven de toren bevindt).



FIGUUR 24: INWERKENDE KRACHTEN OP DE WINDMOLEN [65]

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de verschillende types van torens, is het enkel belangrijk om rekening te houden met de inwerkende windkrachten (en zelfs alleen de windkrachten op de toren). De windkracht op de rotor, en de krachten zoals bijvoorbeeld het excentrisch moment, hebben geen direct verband met de keuze van het torenontwerp.

Om de windbelasting te kunnen berekenen is het belangrijk dat er rekening gehouden wordt met extreme windsnelheden. Er zijn meerdere methodes die gebruikt worden voor het weergeven van extreme windsnelheden. Eén van hen is de 'drie seconden gemiddelde rukwindsnelheid', dit is de hoogste gemeten gemiddelde windsnelheid voor een duur van drie seconden die statistisch gezien éénmaal in de 50 jaar voorkomt. Daarnaast wordt er ook gebruik gemaakt van de 'één minuut gemiddelde rukwindsnelheid' en de 'tien minuten gemiddelde rukwindsnelheid' [66].

Om zo veilig mogelijk verder te rekenen wordt de 'drie seconden gemiddelde rukwindsnelheid' genomen. Deze bedraagt 42 m/s in Dakar op een hoogte van 10m [67]. Deze gekende windsnelheid wordt omgerekend naar de hoogte van de windmolen, m.b.v. de formule die geïntroduceerd werd in '2.2.2 Windenergie':

$$v_{13} = v_{10} \left(\frac{z_{13}}{z_{10}} \right)^a = 42 * \left(\frac{13}{10} \right)^{0.15} = 43.7 \text{ m/s} \quad (26)$$

Deze windsnelheid omrekenen naar een hoogte van 13 m geeft een windsnelheid van 43.7 m/s. Om de windsnelheid nauwkeurig te kennen op lagere hoogtes moet er een

computationeel model opgesteld worden van de omgeving. Vermits de omgeving niet exact gekend is en op lagere hoogtes regelmatig verandert (bomen worden gekapt, kippenstallen worden bijgebouwd,...) wordt er geen windsnelheidsprofiel opgesteld maar wordt er voor de sterkteberekeningen vanuit gegaan dat de windsnelheid een constante is op elke hoogte, en op elke hoogte even groot is als op de hoogte van de rotor. Hierdoor wordt er een overschatting gemaakt van de inwerkende krachten.

De toren is opgebouwd uit 12 modules. De modules zijn opgebouwd uit L-profielen 0.05 m x 0.05 m (volgens DIN). De dikte van de profielen is nog niet gekend, vermits deze afhangt van de sterkteberekening. Deze dikte heeft echter geen effect op de inwerkende windkrachten en wordt dus nog niet berekend.

De onderste horizontale balk heeft een breedte van 2.5 m. De bovenste horizontale balk een breedte van 0.5 m. De schuine zijde van de windmolen is

$$\sqrt{(1 \text{ m})^2 + (12 \text{ m})^2} = 12.04 \text{ m} \quad (27)$$

De oppervlakte van de schuine zijde langs één kant is:

$$2 * 12.04 \text{ m} * 0.05 \text{ m} = 1.20 \text{ m}^2 \quad (28)$$

De gemiddelde breedte van een horizontale balk is 1.5 m. De hoogte van de balken is 0.05 m. Er zijn in één zijde van de windmolen 24 horizontale balken met totale oppervlakte:

$$24 * 1.5 \text{ m} * 0.05 \text{ m} = 1.80 \text{ m}^2 \quad (29)$$

Elke module heeft langs iedere kant 2 diagonale balken. De totale oppervlakte van deze diagonale balken langs één kant van de windmolen is:

$$12 * 2 * 0.05 \text{ m} * \sqrt{(1.5 \text{ m})^2 + (1 \text{ m})^2} = 2.16 \text{ m}^2 \quad (30)$$

De totale zijdelingse oppervlakte van de toren langs één zijde is:

$$12.0 \text{ m}^2 + 1.20 \text{ m}^2 + 1.80 \text{ m}^2 + 2.16 \text{ m}^2 = 17.16 \text{ m}^2 \quad (31)$$

De windkracht op een voorwerp kan berekend worden d.m.v. de *drag equation* [68]:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \text{ [N]} \quad (32)$$

met:

- F [N]: de kracht die de wind op een object uitoefent,
- ρ [kg/m³]: de massadichtheid van het fluïdum,
- C_d : de weerstandscoefficiënt van het object,
- A [m²]: de oppervlakte van het object, loodrecht op de bewegingsrichting van het fluïdum,
- v [m/s²]: de snelheid van het fluïdum ten opzicht van het object.

De weerstandscoefficiënt C_d is afhankelijk van het Reynoldsgetal van de stroming [68]. Vermits het Reynoldsgetal afhankelijk is van de dikte van het profiel, en de dikte afhankelijk is van de sterkteberekening, is deze niet exact gekend. Hierdoor is de berekende windkracht slechts een benadering. Voor het gekozen torenontwerp zal in '4.1 Inwerkende krachten' een nauwkeurigere berekening gemaakt worden.

Voor het bepalen van de weerstandscoefficiënt worden de balken benaderd door een vierkante staaf met scherpe randen. Bij deze geometrische vorm is $C_d = 2.2$ [69]. Bij de berekening van

de maximale kracht op de toren wordt de factor $\frac{1}{2}$ weggelaten vermits de wind zowel op de loefzijde als op de lijzijde van de windmolen aangrijpt (de wind kan door het vakwerk).

De maximale kracht op de toren is:

$$F = 1.28 \frac{kg}{m^3} * (43.7 \frac{m}{s})^2 * 2.2 * 17.16 m^2 = 92.3 kN \quad (33)$$

Deze belasting is (benaderend) evenredig verdeeld over de hoogte van de toren. De kracht kan geschreven worden als $q = 7690 \text{ N/m}$. Hierbij is gerekend met een hoogte van 12 m, vermits de bovenste meter overbrugd wordt door een as waarmee de rotor kan draaien, en dus niet met de vakwerktoren. Zoals eerder vermeld is deze as hetzelfde bij beide torenontwerpen.

Nu de kracht op de toren gekend is, kan er berekend worden wat het inwerkende moment is op de inklemming beneden. Het moment aan de inklemming van de toren is:

$$M_{toren} = \frac{q_{toren} * (h_{toren})^2}{2} = \frac{7690 \frac{N}{m} * (12 m)^2}{2} = 554 kNm \quad (34)$$

3.2.2 Tilt-up toren

De tilt-up toren is gemaakt uit cilindervormige buizen, met een buitendiameter van 0.114 m. De weerstandscoefficiënt hiervan is $C_d = 0.5$ [70]. De maximale kracht op de toren is:

$$F = \frac{1}{2} * 1.28 \frac{kg}{m^3} * (43.7 \frac{m}{s})^2 * 0.5 * 1.368 m^2 = 836 N \quad (35)$$

hieruit blijkt dat de kracht op de toren $F = 836 \text{ N}$ is bij een windsnelheid van 43.7 m/s (indien er eveneens gerekend wordt met een hoogte van 12 m i.p.v. 13 m omdat de bovenste as voor beiden modellen gelijk is). Dit kan als een verdeelde belasting geschreven worden, dan is de kracht $q = 70.0 \text{ N/m}$.

Het moment rond de inklemming beneden, ten gevolge van de windkracht op de toren, is:

$$M_{toren} = \frac{q_{toren} * (h_{toren})^2}{2} = \frac{70.0 \frac{N}{m} * (12 m)^2}{2} = 5.04 kNm \quad (36)$$

3.2.3 Vergelijking van de torenontwerpen

Om een juiste keuze te kunnen maken, worden de twee types nu met elkaar vergeleken. Eerst worden verschillende belangrijke punten besproken van de twee types en dan worden de punten samengevat in een vergelijkende tabel.

Als eerste punt worden de inwerkende krachten op de toren vergeleken. Hieruit blijkt dat het moment rond de inklemming véél groter is bij een vakwerktoren dan bij een tilt-up toren. In de praktijk kan de fundering bij een tilt-up toren nog kleiner gemaakt worden, vermits de toren bij hoge windsnelheden kan platgelegd worden. Uit veiligheidsoverwegingen kan echter geopteerd worden om dit niet te doen, zoals uitgelegd zal worden in '4.3 Fundering'.

Als tweede punt wordt er gekeken naar de eenvoud van de opbouw. Een vakwerktoren wordt module per module opgebouwd. Hierdoor moeten de personen die de toren opbouwen op een grote hoogte werken. Dit brengt steeds een bepaald risico en een bepaalde moeilijkheidsgraad met zich mee. Bij een tilt-up toren kan de toren volledig op de grond opgebouwd worden, en nadien rechtgetrokken worden. Dit vereenvoudigt de opbouw, en vermindert de risico's. Het

rechttrekken van een tilt-up toren kan eenvoudig d.m.v. een kabel en een katrol. Afhankelijk van de grootte en het type ondersteuning (schuine balken en/of kabels) kan dit met één of twee personen. Indien er als ondersteuning gekozen wordt om kabels te gebruiken, kunnen deze m.b.v. een kabelspanner aangespannen worden.

Als laatste punt wordt er gekeken naar het onderhoud. Net zoals bij de opbouw is het onderhoud bij een tilt-up toren gemakkelijker en veiliger dan bij een vakwerktoren. Bij een vakwerktoren moet er voor onderhoud van de wieken, generator, windvaan etc. naar boven geklommen worden, terwijl dit bij een tilt-up toren niet het geval is. Zeker in Senegal, waar veiligheidsuitrustingen minder gebruikelijk zijn, brengt dit een groot risico met zich mee. Het voordeel van een vakwerktoren is echter dat deze moet gedimensioneerd worden om alle weersomstandigheden te kunnen weerstaan, waardoor deze bij een storm kan blijven rechtstaan. Een tilt-up toren kan, om materiaal te besparen, gedimensioneerd worden om maar tot een bepaalde windsnelheid recht te mogen staan. Hierdoor is er geen permanent toezicht nodig bij een vakwerktoren, terwijl dit bij een (rechtstaande) tilt-up toren wel is.

In Tabel 9 worden de aangehaalde punten met elkaar vergeleken. Onder de tabel wordt er een keuze gemaakt tussen de torenontwerpen.

TABEL 9: VERGELIJKING VAN EEN VAKWERKTOREN EN EEN TILT-UP TOREN

	Vakwerktoren	Tilt-up toren
Massa fundering	-	+
Risico opbouw	-	+
Eenvoud onderhoud	-	+
Risico onderhoud	-	+
Toezicht	+	-
Totale som	-3	3

Uit de vergelijking blijkt dat de tilt-up toren beter scoort op bijna alle vlakken. Dit wordt het type dat in '4 Mechanisch ontwerp van de windmolen' uitgewerkt wordt.

3.3 Keuze van de energieopslagmethode

Als laatste ontwerpkeuze moet er gekozen worden op welke manier de energie opgeslagen wordt. Zoals vermeld in '1.3 Doelstellingen', moet er voor 48 uur lang een vermogen van 252.5 W kunnen geleverd worden. De energiemethode moet dus 12.12 kWh aan energie kunnen opslaan. Uit '2.3 Energieopslagmethoden' blijkt dat er twee vormen van energieopslag mogelijk zijn, met behulp van batterijen of d.m.v. (groene) waterstof.

Het voordeel van batterijen is de eenvoud van het systeem, de elektrische energie van de controller of inverter kan namelijk zonder tussenstappen in chemische energie opgeslagen worden in batterijen. Dit is niet zo eenvoudig bij waterstofgas, vermits er een elektrolysestap nodig is om de elektrische energie om te zetten naar chemische energie.

Een ander voordeel van batterijen is de grote beschikbaarheid van de systemen en de eenvoud van aankoop en installatie. Batterijen zijn in Senegal eenvoudig te verkrijgen, kunnen modulair aangekocht worden en zijn eenvoudig te installeren. Om de twee energiesystemen te vergelijken wordt er ook gekeken naar het rendement van beide systemen. Batterijen hebben een hoger rendement dan waterstofgasinstallaties, maar ze hebben een lagere ESOI (Energy Stored on Invested). Dit betekent dat het rendement van de energieomzetting bij batterijen hoger is dan bij waterstofgas, maar dat de verhouding van energie die kan opgeslagen worden tijdens de levensduur van de energieopslagmethode ten opzichte van de energie die nodig is voor de productie van de opslagmethode lager is bij batterijen. De ESOI van waterstofgas is hoger dan de ESOI van batterijen vermits de materialen voor de productie van

waterstofinstallaties gemakkelijker te verkrijgen en produceren zijn. Dit komt deels door het feit dat er zeldzame metalen nodig zijn voor de productie van batterijen [71].

Een andere factor die kenmerkend is voor energieopslagmethoden, is de zelfontlading. Deze factor geeft weer hoeveel energie er gedissipeerd wordt tijdens de opslag van energie. Bij waterstofgas is er praktisch geen zelfontlading. Bij batterijen ligt de zelfontlading voor de meeste types tussen 2% en 30% per maand. De types batterijen met de hoogste zelfontlading zijn Nikkel-Cadmium en Nikkel-Metaalhydride. Loodzuurbatterijen en Lithium-ion batterijen hebben een zelfontlading van respectievelijk 4 – 6% en 2 – 3% per maand [72]. Vermits er geregeld stroompannes optreden en de batterijen bijna constant opgeladen kunnen worden (ofwel door het beschikbare elektriciteitsnet, ofwel door de windmolen) is de zelfontlading minder belangrijk.

Zoals uitgelegd in ‘2.3.1 Batterijen’ staan batterijen er om gekend dat ze een bepaalde degradatie vertonen. Na elke ontladingscyclus daalt de capaciteit van de batterij. Dit verschijnsel is in veel mindere mate aanwezig bij waterstofgas. Dit is dus een nadeel van batterijen, waar rekening mee moet gehouden worden bij het bepalen van de levensduur en kostprijs van de installatie.

Een laatste punt dat aangehaald wordt is de veiligheid. Alhoewel dat de systemen voor het opslaan van waterstofgas veiliger en veiliger worden, is er toch nog steeds een groter risico aan verbonden dan bij batterijen. Dit risico is voornamelijk de zeer lichte ontvlambaarheid van waterstofgas [73].

In Tabel 10 worden de besproken factoren opgesomd voor beide energieopslagmethoden.

TABEL 10: VERGELIJKING ENERGIEOPSLAG IN BATTERIJEN EN WATERSTOFGAS

	Batterijen	Waterstofgas
Eenvoud van systeem	+	-
Beschikbaarheid	+	-
Rendement	+	-
ESOI	-	+
Zelfontlading	-	+
Degradatie	-	+
Veiligheid	+	-
Totale som	1	-1

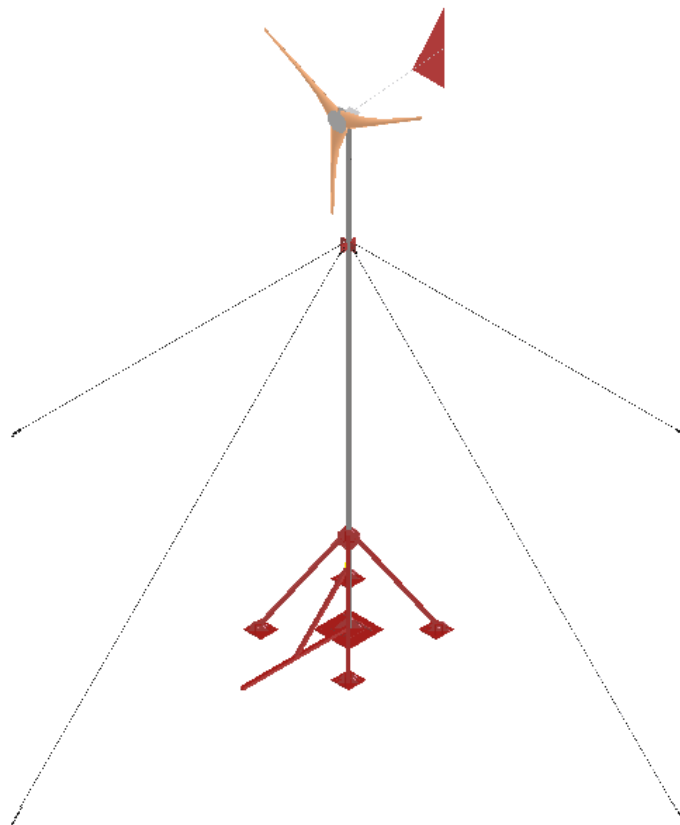
Wegens de eenvoud, grote beschikbaarheid en veiligheid van batterijen wordt er voor deze optie gekozen. Deze kunnen eenvoudig geïmplementeerd worden in de rest van de installatie, zonder extra toestellen. Welk type batterij er wordt gekozen hangt deels af van de lokaal beschikbare batterijen. Deze keuze wordt gemaakt in ‘5.4 Batterijen’

4 Mechanisch ontwerp van de windmolen

Zoals vermeld in het vorige hoofdstuk, wordt in deze masterthesis een tilt-up windmolen ontworpen. Het ontwerp van de windmolen wordt in twee grote delen opgedeeld: het mechanisch ontwerp en de elektrische installatie. In dit hoofdstuk zal het mechanisch ontwerp besproken worden. Het volgende hoofdstuk behandelt de opbouw van de elektrische installatie.

Een goed mechanisch ontwerp vertrekt van een concept. Daarom zal eerst het concept besproken worden. Daarna wordt er een overzicht gegeven van de krachten die inwerken op de windmolen. Dit is belangrijk om de componenten correct te kunnen dimensioneren. Voor de dimensionering is gebruik gemaakt van het softwarepakket Diamonds. Na het subhoofdstuk '4.1 Inwerkende krachten' wordt hierover een toelichting gegeven. Daarna volgt er een bespreking van de individuele componenten.

Het concept van de windmolen wordt afgebeeld in Figuur 25. Hieronder worden kort de verschillende subkoppelen toegelicht, die allen zichtbaar zijn op de concepttekening. In de volgende subkoppelen van dit hoofdstuk worden de onderdelen besproken, gedimensioneerd en ontworpen.



FIGUUR 25: CONCEPT VAN DE WINDMOLEN

De toren zorgt ervoor dat de rotor zich hoog genoeg van de grond bevindt, zodat de invloed van de omgeving, op de invallende wind, beperkt blijft. Om de stabiliteit van de windmolen te verhogen wordt de toren ondersteund door schuine balken en kabels. Onderaan is de toren vastgemaakt d.m.v. een kantelmechanisme waarmee de windmolen platgelegd kan worden. Vanboven op de toren is de rotor zichtbaar. Een belangrijk onderdeel van de rotor zijn de

wieken, die de stromingsenergie van de wind omzetten in een rotatie van de as. De windvaan zorgt ervoor dat de rotor op ieder moment loodrecht op de invallende wind staat, zodat de opbrengst zo hoog mogelijk is.

4.1 Inwerkende krachten

Om de fundering, toren en verschillende onderdelen goed te kunnen dimensioneren, is het belangrijk dat alle krachten op de constructie gekend zijn. De belangrijkste inwerkende krachten bij een windmolen zijn de windkrachten op de rotor en wieken, en het gewicht van de windmolen zelf. In dit subhoofdstuk worden eerst de windkrachten op de rotor en wieken berekend, en daarna het gewicht van de verschillende onderdelen van de windmolen. De inwerkende krachten worden zowel bij de maximale gebruikswindsnelheid (25.0 m/s) als bij de maximale mogelijke windsnelheid op de locatie van 'Le Coquetier Social' (43.7 m/s) berekend. De maximale mogelijke windsnelheid werd berekend in '3.2 Keuze van het torenontwerp'

De windkracht op een voorwerp kan berekend worden d.m.v. de *drag equation* [68]:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 [N] \quad (37)$$

met:

- $F [N]$: de kracht die de wind op een object uitoefent,
- $\rho [kg/m^3]$: de massadichtheid van het fluïdum,
- C_d : de weerstandscoefficiënt van het object,
- $A [m^2]$: de oppervlakte van het object, loodrecht op de bewegingsrichting van het fluïdum,
- $v [m/s]$: de snelheid van het fluïdum ten opzicht van het object.

De weerstandscoefficiënt is afhankelijk van de geometrie en de oppervlakteruwheid van het object, evenals van het Reynoldsgetal. Het Reynoldsgetal is een dimensieloos getal dat de verhouding tussen de inertiekrachten en de viskeuze krachten in een vloeistof weergeeft [68].

4.1.1 Windkracht op de toren

De windsnelheid van de invallende wind op de toren varieert met de hoogte. De exacte windsnelheidsverdeling kan niet bepaald worden vermits deze afhangt van de omgeving, en dus ook afhangt van de windrichting. Hierdoor wordt er voor de volledige toren éénzelfde windsnelheid, de windsnelheid op de top van de toren, genomen. Deze aanname is ook gemaakt in '3.2 Keuze van het torenontwerp'.

Zoals wordt besproken zal worden in '4.4 Toren', wordt de toren opgebouwd uit twee holle buizen die aan elkaar gelast worden. Het Reynoldsgetal van een stroming rond een cilindervormige buis kan berekend worden volgens [74]:

$$Re_D = \frac{U_\infty D}{\nu} \quad (38)$$

met:

- Re_D : het reynoldsgetal,
- $U_\infty [m/s]$: de windsnelheid op oneindige afstand voor het object,
- $\nu [m^2/s]$: de kinematische viscositeit.

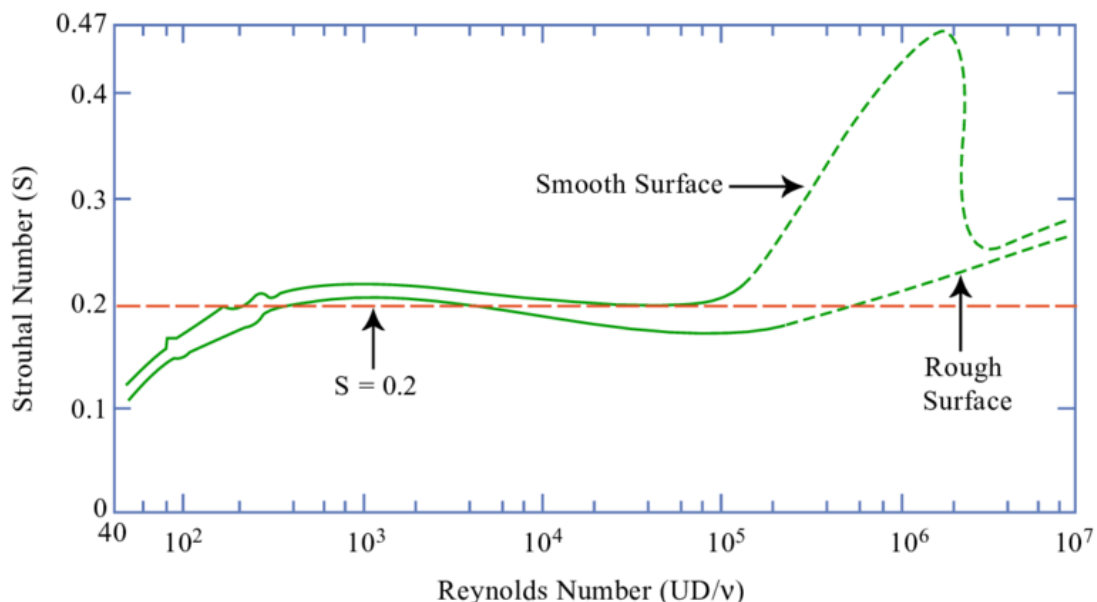
De kinematische viscositeit ν is afhankelijk van de luchttemperatuur. De kinematische viscositeit is groter bij hoge temperaturen. Vermits er voor de sterkteberekeningen rekening gehouden moet worden met de grootst mogelijke krachten, moet er gerekend worden met de

hoogst mogelijke weerstandscoefficiënt. Zoals blijkt uit Figuur 27 is de weerstandscoefficiënt het grootste bij een laag Reynoldsgetal. Er wordt dus gerekend met de grootst mogelijke kinematische viscositeit van de lucht. Dit is bij de maximale luchttemperatuur. Volgens “Climates To Travel” is de hoogst gemeten temperatuur in het binnenland van Senegal 45 °C [75]. Dichter bij de kust ligt de temperatuur iets lager, 45 °C is dus een kleine overschatting. Vermits er geen preciezere data bekend zijn over de temperatuur op de exacte locatie van Le Coquetier Social wordt hiermee verder gerekend.

De kinematische viscositeit van lucht is $\nu = 1.750 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ bij een temperatuur van 45 °C [76]. De buitendiameter van de toren is 0.114 m en de lengte is 13 m, zoals besproken zal worden in ‘4.4 Torens’. In de praktijk is de bovenste 1.40 m van de toren een buis met iets kleinere diameter. Voor de sterkteberekeningen wordt echter aangenomen dat de volledige toren dezelfde diameter heeft. Nu de kinematische viscositeit en de diameter gekend zijn kan het Reynoldsgetal berekend worden bij verschillende windsnelheden:

$$Re_D = \frac{U_\infty D}{\nu} = \frac{U_\infty * 0.114 \text{ m}}{1.75 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \quad (39)$$

Bij een windsnelheid van 25 m/s is $Re_D = 1.63 \cdot 10^5$. Bij een windsnelheid van 43.7 m/s is $Re_D = 2.85 \cdot 10^5$. Volgens Lienhard kan er bij een stroming rond een cilinder met een Reynoldsgetal tussen 300 en $3 \cdot 10^5$ aangenomen worden dat er zich achter de cilinder een turbulente vortexstraat vormt [77]. Dit is bij beide windsnelheden (en bij alle windsnelheden waarbij de windmolen werkt) het geval. Deze vortexvorming kan zorgen voor trillingen op de windmolen. Indien de frequentie van de vortices in de buurt komt van de eigenfrequentie van de windmolen, kan de windmolen mee beginnen trillen. Deze trillingen kunnen schade aanrichten aan de windmolen. Om de oscillatiefrequentie van de vortices f_s te berekenen, moet het Strouhalgetal gekend zijn [78]. Het Strouhalgetal kan a.d.h.v. het Reynoldsgetal bepaald worden uit Figuur 26. Vermits de toren gemaakt is uit gegalvaniseerde buizen, is het een glad oppervlak (*smooth surface*).



FIGUUR 26: HET STROUHALGETAL IN FUNCTIE VAN HET REYNOLDSGETAL [78, P. 13]

Bij een windsnelheid $v = 25 \text{ m/s}$ is het Strouhalgetal $S_t = 0.31$. Bij een windsnelheid $v = 43.7 \text{ m/s}$ is het Strouhalgetal $S_t = 0.35$. Het verband tussen de oscillatiefrequentie en het Strouhalgetal kan wiskundig weergegeven worden volgens [79]:

$$S_t = \frac{f_s * D}{V} \quad (40)$$

met:

- S_t : het getal van Strouhal,
- f_s [Hz]: de oscillatiefrequentie van de vloeistof,
- D [m]: de diameter van de cilinder,
- V [m/s]: de windsnelheid op oneindige afstand voor het object,

Deze formule kan omgevormd worden om de oscillatiefrequentie van de vortices te bepalen:

$$f_s = \frac{S_t * V}{D} \quad (41)$$

Hieruit blijkt dat de frequentie $f_s = 68.0$ Hz is bij $v = 25.0$ m/s en $f_s = 134.2$ Hz is bij $v = 43.7$ m/s. Om te bepalen wat de invloed hiervan op de windmolen is, moet de eigenfrequentie van de windmolen bepaald worden. Voor de eenvoud wordt er enkel bepaald wat de eigenfrequentie is indien de toren ingeklemd rechtstaat zonder ondersteuning. De eigenfrequentie bestaat niet uit één waarde maar uit een breder spectrum. Vermits de eerste natuurlijke frequentie de grootste invloed heeft, wordt enkel hiernaar gekeken. Deze waarde kan benaderd worden door [80]:

$$f_{nat} = \sqrt{\frac{3.04 * E * I}{4 * \pi^2 * (0.227 * \mu * L + M) * L^3}} \quad (42)$$

met:

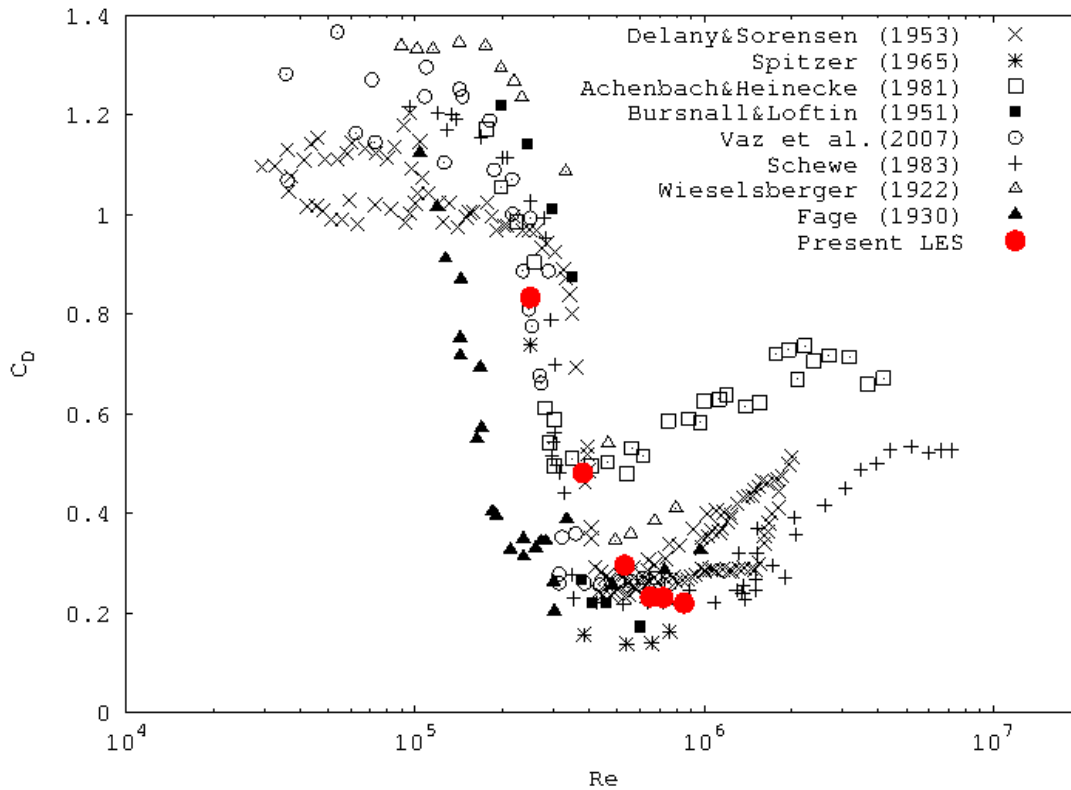
- f_{nat} [Hz]: de eerste natuurlijke eigenfrequentie van de windmolen,
- E [Pa]: de elasticiteitsmodulus van de toren,
- I [m⁴]: het buigtraagheidsmoment van de toren,
- μ [kg/m]: het massa van de toren per meter,
- L [m]: de lengte van de toren,
- M [kg]: de massa van de rotor.

Vermits de toren een holle buis is met buitendiameter 0.114 m en binnendiameter 0.102 m, kan het buigtraagheidsmoment I geschreven worden als [81]:

$$I = \frac{\pi * (0.114 \text{ m})^4}{64} - \frac{\pi * (0.102 \text{ m})^4}{64} = 2.98 * 10^{-6} \text{ m}^4 \quad (43)$$

Voor de elasticiteitsmodulus van de toren wordt er $E_{staal} = 200$ GPa genomen [81]. De massa's van de toren en rotor zullen in een verder subhoofdstuk berekend worden en zijn respectievelijk $\mu = 15.9$ kg/m en $M = 100$ kg. De lengte van de toren is $L = 13$ m. Hiermee kan berekend worden dat $f_{nat} = 0.377$. De oscillatiefrequenties van de geïnduceerde vortices liggen dus ver van de eigenfrequentie van de toren. Indien de windsnelheid lager is, ligt de oscillatiefrequentie van de vortices dicht bij de eerste natuurlijke eigenfrequentie van de toren. Bij lagere windsnelheden is de windkracht op de windmolen echter veel lager, waardoor dit minder kritisch is. Bij voorgaande berekening werd er van uit gegaan dat de toren niet ondersteund wordt. In de realiteit wordt de toren bij normale werking ondersteund door schuine balken en kabels, waardoor trillingen gedempt worden.

Nu de Reynoldsgetallen gekend zijn kunnen de weerstandscoefficienten bepaald worden. Zoals blijkt uit Figuur 27 is de weerstandscoefficient niet éénduidig te bepalen. Er wordt verder gerekend met de recentste berekende waarden. Deze zijn berekend d.m.v. *Large Eddy Simulations* (LES). Bij een windsnelheid van 25 m/s is de weerstandscoefficient $C_D = 0.9$. Bij een windsnelheid van 43.7 m/s is de weerstandscoefficient $C_D = 0.5$.



FIGUUR 27: DE WEERSTANDSCOËFFICIËNT VAN EEN CILINDERVORMIGE BUIS IN FUNCTIE VAN HET REYNOLDSGETAL [70].

Voor de massadichtheid van lucht wordt $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$ genomen [76]. Dit is de waarde bij 20 °C. Bij een hogere temperatuur is de massadichtheid iets lager. Om zeker te zijn dat de windkrachten niet onderschat worden, wordt hiermee verder gerekend.

Nu alle variabelen gekend zijn kan de windkracht op de toren uitgerekend worden bij een windsnelheid van 25 m/s en een windsnelheid van 43.7 m/s:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 [N] \quad (44)$$

Bij een windsnelheid van 25 m/s geldt:

- $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$,
- $C_D = 0.9$,
- $A = 0.114 \text{ m} * 13 \text{ m} = 1.482 \text{ m}^2$,
- $v = 25 \text{ m/s}$.

Hieruit blijkt dat de kracht op de toren $F = 502 \text{ N}$ is bij een windsnelheid van 25m/s. Indien dit als een verdeelde belasting geschreven wordt is de kracht $q = 38.6 \text{ N/m}$.

Bij een windsnelheid van 43.7 m/s geldt:

- $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$,
- $C_D = 0.5$,
- $A = 0.114 \text{ m} * 13 \text{ m} = 1.482 \text{ m}^2$,
- $v = 43.7 \text{ m/s}$.

Hieruit blijkt dat de kracht op de toren $F = 852 \text{ N}$ is bij een windsnelheid van 43.7 m/s. Indien dit als een verdeelde belasting geschreven wordt is de kracht $q = 65.5 \text{ N/m}$.

Uit deze berekeningen kan geconcludeerd worden dat de windkracht op de toren groter is bij hogere windsnelheden. Welk effect dit heeft op de stabiliteit van de windmolen zal besproken worden in '4.2 Sterkteberekening'.

4.1.2 Windkracht op de rotor

In '5.3 Controller' en '4.8 Wieken' zal uitgelegd worden dat er in de WINDPMG 48V 3kW wind solar controller een ingebouwde remfunctie is, waardoor de rotor wordt geremd bij hoge windsnelheden. Bij hoge windsnelheden wordt de rotor dus geblokkeerd. In '4.8 Wieken' gaat de kracht op de wieken berekend worden voor het dynamisch geval, dus zonder geblokkeerde rotor. Hieruit blijkt dat de krachten in dit geval groter zijn dan bij een geblokkeerde rotor. Het grootste deel van deze krachten wordt echter omgezet in een roterende beweging van de rotor [82]. Dit kan dus niet geschreven worden als een puntbelasting op de toren. Daarom wordt er, om de maximale kracht op de rotor te berekenen, voor sterkteberekeningen van de windmolen, gerekend met de geblokkeerde rotor.

Om de kracht op de (stilstaande) rotor te berekenen, moet de weerstandscoefficiënt gekend zijn. Er zijn echter meerdere manieren om deze te berekenen. In '4.8.1 Theoretisch model' gaan de werkelijke lift- en weerstandscoefficiënten van de ontworpen wiek weergegeven worden. Deze coëfficiënten zijn echter de coëfficiënten bij een bewegende wiek. Daarom worden deze werkelijke coëfficiënten hieronder vectorieel opgeteld, om zo een totale weerstandscoefficiënt te bekomen, indien de wiek stilstaat. Om zeker te zijn dat deze totale weerstandscoefficiënt niet onderschat wordt, wordt deze waarde daarna vergeleken met twee andere waarden: zowel met een empirische formule om de maximale weerstandscoefficiënt van een wiek te berekenen [83] als met een C_{D90} -waarde van een vergelijkbare wiek. De C_{D90} is de weerstandscoefficiënt waarbij de wind onder een hoek van 90° op de wieken invalt. Dit is ook de weerstandscoefficiënt indien een wiek *gepitcht* (rond zijn eigen as gedraaid) wordt, om de invalshoek op 90° te krijgen om een natuurlijke *stall* te creëren (wat niet mogelijk is bij deze windmolen) [84].

Als eerste wordt er gekeken wat de maximale, theoretische, waarde is bij het gekozen vleugelprofiel. In Figuur 50 is de maximale lift en dragcoëfficiënt weergegeven. Een deel van de krachten die inwerken op de wiek (de liftkracht) wordt gebruikt om een lift te creëren waarmee de rotor kan ronddraaien. Indien de rotor geblokkeerd is, wordt er nog altijd een liftkracht gegenereerd, maar wordt deze niet omgezet in een beweging. Deze zorgt enkel voor een torsievormende kracht rond de as van de rotor. Voor volgende berekening wordt er echter van uitgegaan dat de volledige kracht op de rotor als een puntbelasting kan geschreven worden, en worden de liftcoëfficiënt (C_L) en de weerstandscoefficiënt (C_D) vectorieel opgeteld om de totale, maximale weerstandscoefficiënt van de wiek te berekenen:

$$C_{D,max} = \sqrt{C_L^2 + C_D^2} = \sqrt{1.40^2 + 0.05^2} = 1.40 \quad (45)$$

Uit deze eerste methode blijkt dat de weerstandscoefficiënt $C_D = 1.40$. Zoals eerder vermeld, wordt deze weerstandscoefficiënt vergeleken met een tweede methode, op basis van een empirische formule. Dit is volgens een methode van Viterna en Corrigan [83]. Volgens deze methode kan de maximale weerstandscoefficiënt van een overtrokken (*post-stall*) wiek berekend worden m.b.v.:

$$C_{D,max} = 1.11 + 0.018 * AR \quad (46)$$

In deze formule is AR de aspect ratio. Dit is de verhouding tussen de lengte van de wiek en een representatieve koordelengte. Voor deze berekening wordt rekening gehouden met de gemiddelde, werkelijke, koordelengte van de wiek, zoals uitgelegd zal worden bij de bespreking van de wieken. Dit is de gemiddelde koordelengte waarbij de wiek aan de oorsprong dunner is dan in het theoretisch optimum, om de bevestiging te vereenvoudigen. Voor de rest van de

berekeningen wordt er gerekend met het theoretisch optimum, om zeker te zijn dan de krachten niet onderschat worden. In dit geval is AR:

$$AR = \frac{2.50 \text{ m}}{0.14 \text{ m}} = 17.86 \quad (47)$$

Hieruit blijkt dat de maximale weerstandscoefficiënt volgens Viterna en Corrigan gelijk is aan $C_{D, \max} = 1.43$. Als derde en laatste methode wordt er gekeken naar de maximale C_{D90} bij een vergelijkbaar type wiek. Uit een experimenteel en numeriek vergelijkbare studie door Montgomerie blijkt dat de maximale $C_{D90} = 1.4$ [84].

De drie methodes geven een vergelijkbaar resultaat. Wegens veiligheidsoverwegingen wordt er gerekend met de grootste waarde, deze volgens de methode van Viterna en Corrigan: $C_{D, \max} = 1.43$. De oppervlakte van één wiek is bij benadering 2.5 m x 0.178 m. Vermits dit een belasting is, en deze berekening dient om de uiterste sterkte van de wiek te berekenen, wordt er een veiligheidsfactor van 1.35 gebruikt, zoals voorgeschreven in IEC 1400-1 [85].

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (48)$$

Bij een windsnelheid van 25.0 m/s geldt:

- $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$,
- $C_D = 1.43$
- $A = 2.5 \text{ m} * 0.178 \text{ m} = 0.445 \text{ m}^2$,
- $v = 25 \text{ m/s}$.

Hieruit blijkt dat de kracht op de rotor $F = 239 \text{ N}$ is bij een windsnelheid van 25 m/s. Vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor van 1.35 is dit 323 N. Voor de drie wieken samen is dit $F = 970 \text{ N}$.

Bij een windsnelheid van 43.7 m/s geldt:

- $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$,
- $C_D = 1.43$,
- $A = 2.5 \text{ m} * 0.178 \text{ m} = 0.445 \text{ m}^2$,
- $v = 43.7 \text{ m/s}$.

Hieruit blijkt dat de kracht op een wiek $F = 732 \text{ kN}$ is bij een windsnelheid van 43.7 m/s. Vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor van 1.35 is dit 988 N. Voor de drie wieken samen is dit $F = 2963 \text{ N}$.

Vermits er een grote overlap is tussen de wieken en de naaf van de rotor, en er een veiligheidsfactor in acht genomen wordt, wordt de windkracht op de naaf niet apart beschouwd.

4.1.3 Gewicht van de windmolen

Om de fundering juist te kunnen dimensioneren, is het belangrijk om het gewicht van de windmolen te kennen. Voor het model in Diamonds is dit niet nodig, vermits Diamonds zelf het gewicht van de buizen berekent. De windmolen wordt opgedeeld in rotor, toren en schuine balken.

$$G_{\text{windmolen}} = G_{\text{rotor}} + G_{\text{toren}} + G_{\text{schuine balken}} \quad (49)$$

Rotor:

Het gewicht van de rotor is het gewicht van de wieken, de generator, de flens, de windvaan en alle verbindingen tussen de verschillende onderdelen. De massa van de generator is 12kg [86]. De windvaan wordt uit een dunne plaat vervaardigd, deze weegt 5 kg.

Het volume van de wieken is:

$$V_{wieken} = 3 * 2.5 \text{ m} * 0.14 \text{ m} * 0.10 \text{ m} = 0.105 \text{ m}^3 \quad (50)$$

De wieken zijn gemaakt uit *bois rouge*, zoals besproken zal worden in '4.8 Wieken'. Als massadichtheid van *bois rouge* wordt $\rho = 790 \text{ kg/m}^3$ genomen [87]. Hiermee kan de massa van de wieken berekend worden:

$$M_{wieken} = \rho_{bois\ rouge} V_{wieken} = 790 \text{ kg/m}^3 * 0.105 \text{ m}^3 = 83.0 \text{ kg} \quad (51)$$

Het gewicht van de wieken is:

$$G_{wieken} = m_{wieken} g = 83.0 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 814 \text{ N} \quad (52)$$

De totale massa van de rotor (wieken, generator en windvaan) is 100kg. Als totaal gewicht van de rotor is dit 981 N.

Toren:

De massa van de toren is:

$$m_{toren} = \left(\frac{\pi * (0.114 \text{ m})^2}{4} - \frac{\pi * (0.102 \text{ m})^2}{4} \right) * 13 \text{ m} * 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 206.4 \text{ kg} \quad (53)$$

Het gewicht van de toren is:

$$G_{toren} = m_{toren} * g \quad (54)$$

$$G_{toren} = 206.4 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2025 \text{ N} \quad (55)$$

Schuine balken:

De massa van een schuine balk is moeilijk exact te bepalen vermits de randen afgeschuind zijn en er gaten in geboord zijn. Maar deze massa kan benaderd worden door:

$$m_{schuine\ balken} = (0.08 \text{ m} * 0.08 \text{ m} - 0.077 \text{ m} * 0.077 \text{ m}) * 3 \text{ m} * 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 11 \text{ kg} \quad (56)$$

Het gewicht van de vier schuine balken samen is:

$$G_{schuine\ balken} = 4 * m_{schuine\ balken} * g \quad (57)$$

$$G_{schuine\ balken} = 4 * 11 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 432 \text{ N} \quad (58)$$

Volledige windmolen:

De totale massa van de windmolen kan benaderd worden door:

$$m_{windmolen} = m_{rotor} + m_{toren} + m_{schuine\ balken} \quad (59)$$

$$m_{windmolen} = 100 \text{ kg} + 206 \text{ kg} + 44 \text{ kg} = 350 \text{ kg} \quad (60)$$

Het totale gewicht van de windmolen kan benaderd worden door:

$$G_{windmolen} = G_{rotor} + G_{toren} + G_{schuine\ balken} \quad (61)$$

$$G_{windmolen} = 981 \text{ N} + 2025 \text{ N} + 432 \text{ N} = 3438 \text{ N} \quad (62)$$

Nu zijn alle krachten op de windmolen gekend. Deze krachten op zichzelf geven weinig informatie, maar deze worden in het volgende hoofdstuk gebruikt om de sterkteberekening van de windmolen uit te voeren. Er wordt op dit moment geen totale som gemaakt van de

krachten, vermits deze krachten bij de sterkteberekening en bij het model in Diamonds ook apart zullen beschouwd worden.

4.2 Sterkteberekening

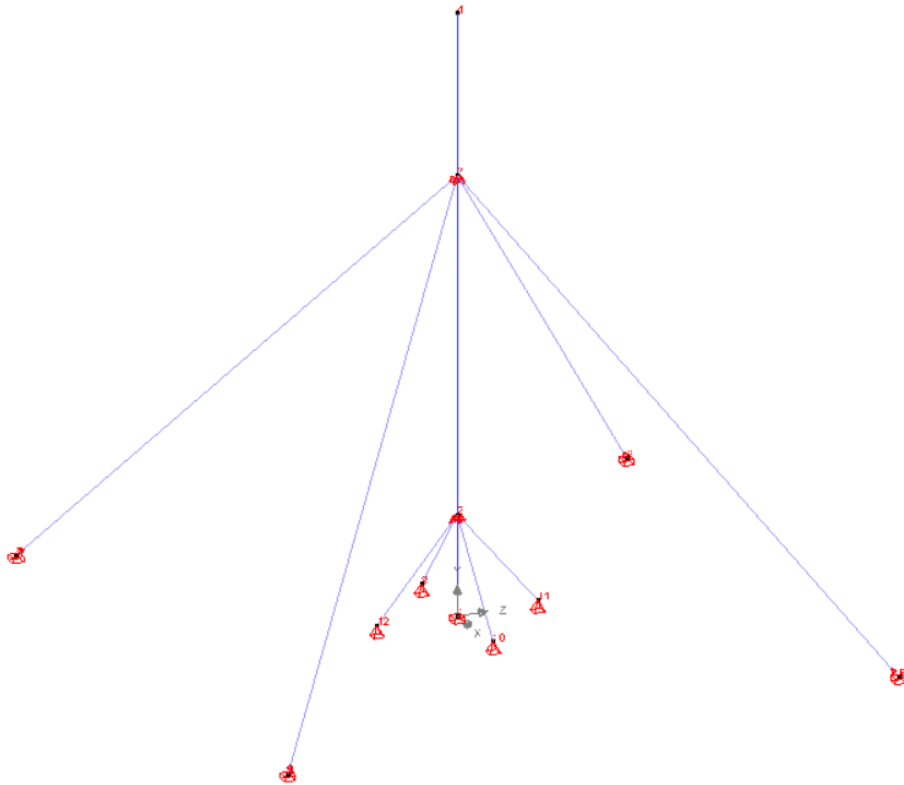
Alle componenten van de windmolen moeten voldoende sterk zijn om de inwerkende krachten te kunnen weerstaan. Vermits de windmolen met de inklemming beneden, de schuine balken en de kabels, een meervoudig hyperstatisch stelsel is, is het niet eenvoudig om te berekenen welke hoogte of hoek optimaal is voor de kabels en balken. Daarnaast is het niet eenvoudig om de invloed van de wind volgens verschillende richtingen manueel te berekenen. Bij iedere verandering van lengte, hoek of windoriëntatie moeten de berekeningen opnieuw gemaakt worden. Daarom wordt er een model opgesteld in het softwarepakket Diamonds van BuildSoft. In dit subhoofdstuk wordt het model uitgelegd en wordt aan de hand van het model een conclusie getrokken.

Naast dit model in Diamonds wordt er ook een (vereenvoudigde) sterkteberekening uitgevoerd op de windmolen, deze is uitgeschreven in Bijlage A. De verbindingen en bevestigingen van de verschillende onderdelen worden niet in Diamonds uitgerekend. Deze worden via manuele sterkteberekeningen gedimensioneerd, in de bijhorende subkoppen.

De eerste stap in de berekeningen met Diamonds is het ingeven van de geometrie van de constructie. De geometrie die gebruikt is voor de windmolen wordt getoond in Figuur 28. Hierbij worden alle balkvormige elementen weergegeven als een lijn. Aan elke lijn wordt dan het materiaal en de type balk meegegeven. De vorm en de materialen van de componenten worden besproken in het bijhorende deel van dit hoofdstuk.

De rotor wordt niet berekend met behulp van Diamonds om de berekeningen te vereenvoudigen. Deze wordt in het model vervangen door een kracht ten gevolge van het gewicht en een puntbelasting voor de windbelasting.

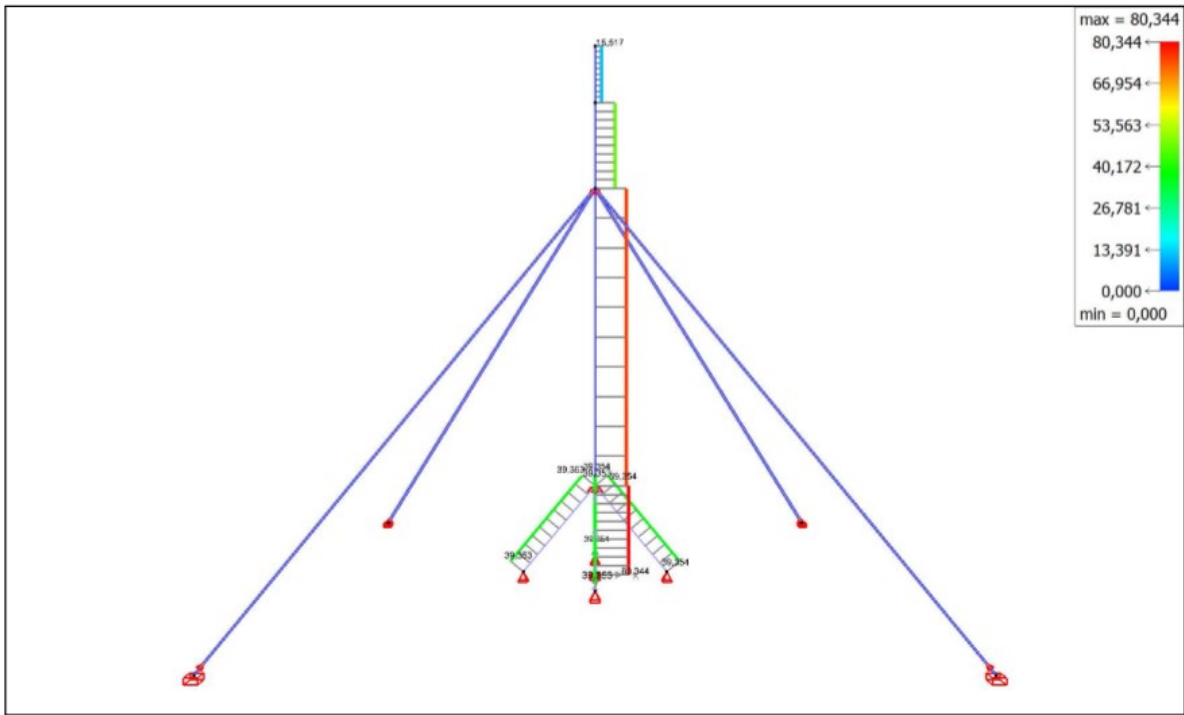
Naast het definiëren van de balken, moeten ook de steunpunten gedefinieerd worden. Er zijn verschillende mogelijkheden in Diamonds, zoals bv. scharnier en oplegging. Er kan opgegeven worden in welke richtingen er krachten kunnen worden opgevangen, en in welke richtingen niet. Daarnaast moeten de kabels nog gedefinieerd worden als trekstaven, hierdoor wordt er meegegeven aan Diamonds dat de kabels enkel trek kunnen opvangen en geen enkele andere kracht. In het model wordt geen rekening gehouden met verbindingen (bv. lasnaden). Hier moet dus aandacht aan geschonken worden bij het kiezen van de juiste componenten.



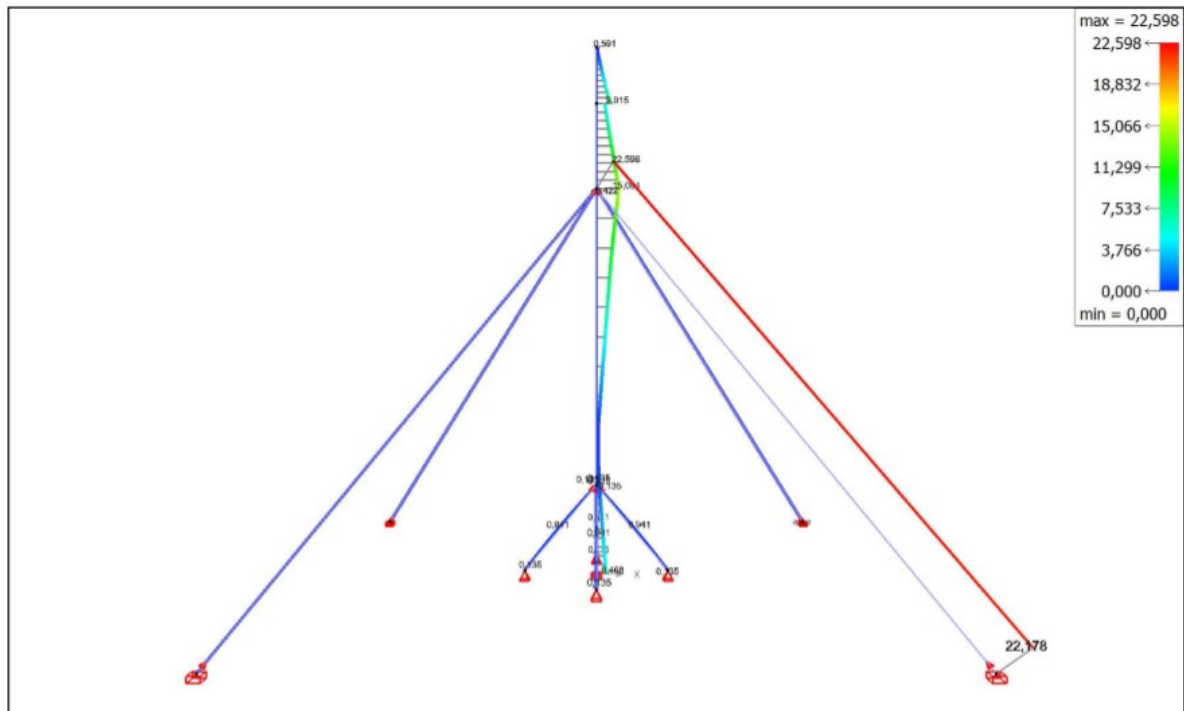
FIGUUR 28: DE GEOMETRIE VAN DE WINDMOLEN IN DIAMONDS

Wanneer de geometrie volledig is ingegeven worden de lasten ingegeven. Hiervoor worden lastengroepen aangemaakt, die volgens norm gecombineerd worden. De verschillende krachten werden berekend in '4.1 Inwerkende krachten'. Daarna wordt er een *mesh* gegeneerd en kunnen de resultaten berekend worden. Naast spanningen, krachten, etc. kan er ook een normcontrole worden uitgevoerd. Hiermee kan gecontroleerd worden voor hoeveel procent elke component voldoet aan Eurocode 3.

Het resultaat van de normcontrole van de stabiliteit bij de maximale gebruikswindsnelheid (25m/s) is zichtbaar in Figuur 29. De normcontrole voor de sterkte bij de maximale gebruikswindsnelheid is zichtbaar in Figuur 30. Om te voldoen aan de Eurocode 3 mag het percentage niet meer dan 100% bedragen. Bij deze twee figuren is de windkracht volgens de richting van een kabel ingegeven. Dezelfde berekening wordt ook uitgevoerd indien de wind volgens de richting van een schuine balk komt. Uit Figuur 29 en Figuur 30 blijkt dat het model volledig aan de Eurocode voldoet.



FIGUUR 29: STABILITEITSCONTROLE VAN DE WINDMOLEN BIJ MAXIMALE GEBRUIKSWINDSNELHEID (25 M/S) VOLGENS DE RICHTING VAN EEN KABEL



FIGUUR 30: STERKTECONTROLE VAN DE WINDMOLEN BIJ MAXIMALE GEBRUIKSWINDSNELHEID (25 M/S) VOLGENS DE RICHTING VAN EEN KABEL

Vermits er in Diamonds veiligheidsfactoren ingebouwd zijn, is er een kleinere veiligheidsfactor genomen voor de wieken, dan gehanteerd in '4.1 Inwerkende krachten'. De invloed hiervan op de stabiliteit en sterkte is echter kleiner dan 2%, waardoor in beide gevallen het ontwerp aan alle normen voldoet. Een verslag van de volledige berekening (met de gebruikte krachten) is terug te vinden in Bijlage B.

4.3 Fundering

De krachten die inwerken op de rotor en de toren worden opgevangen door de fundering. De fundering wordt opgebouwd uit gewapend beton. De vier kabels worden ook vastgemaakt d.m.v. kleinere funderingen. De berekening van deze funderingen wordt besproken bij het ontwerp van de kabels in '4.6 Kabels'.

Om een correcte fundering te kunnen ontwerpen, is het belangrijk dat de ondergrond gekend is. Uit de bodematlas van de Europese Commissie blijkt dat het bodemtype in Ndiéguène *Arenosol* is [88]. Dit is een bodemtype dat vooral voorkomt in (semi-) aride gebieden. Vermits dit een dynamisch bodemtype is wordt het in veel classificaties niet als een bodem aanschouwt [89]. Volgens de classificatiemethode van de *United States Departement of Agriculture* is de bodem van het type *Alfisol* of *Inceptisol* in de regio van Ndiéguène [90].

Vermits de inwerkende krachten gekend zijn, en er een indicatie is van het type bodem, kan het type fundering bepaald worden. Hierna wordt de fundering gedimensioneerd om alle inwerkende krachten te kunnen opvangen.

Voor windmolens worden er in het algemeen twee types funderingen gebruikt: *shallow* of ondiepe funderingen, en diepe funderingen. Diepe funderingen worden gebruikt indien de draagkracht van de nabije ondergrond niet hoog genoeg is. In dit geval kunnen, d.m.v. een diepe fundering, de lasten overgebracht worden naar een dieper gelegen, sterkere, ondergrond. In deze toepassing is een ondiepe fundering de beste keuze vermits de ondergrond stevig is, en een ondiepe fundering eenvoudiger te construeren is dan een diepe fundering [91], [92]. Indien een betonnen fundering in contact komt met temperaturen onder het vriespunt, is dit schadelijk voor de fundering [93]. Vermits het niet vriest in Senegal moet de fundering niet bedekt worden door de ondergrond [75]. Er wordt gekozen voor een fundering met een vierkanten grondvlak. Hierdoor kunnen de vier schuine balken bevestigd worden op de hoekpunten van de fundering, zoals beschreven zal worden in '4.5 Schuine balken'.

Om de fundering te dimensioneren moeten alle inwerkende krachten, zoals weergegeven in Figuur 31, gekend zijn. Het moment om de fundering (oorsprong) kan berekend worden m.b.v. de krachten berekend in '4.1 Inwerkende krachten'. Er wordt gerekend met de maximaal mogelijke windsnelheid, en zonder kabels. Indien er een mechanisch defect is waardoor de windmolen niet neergehaald kan worden, of er een kabelbreuk optreedt, is de fundering zo nog steeds bestendig tegen alle inwerkende krachten. Het inwerkende moment wordt vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor. Vermits het een belasting is wordt er gerekend met $\gamma_{\text{belasting}} = 1.35$ [85]:

$$M_o = (F_{ww,43.7\text{ m/s}} * h_{\text{toren}} + F_{wt} * \frac{h_{\text{toren}}}{2}) * \gamma_{\text{belasting}} \quad (63)$$

$$M_o = (2.76\text{ kN} * 13\text{ m} + 0.85\text{ kN} * 6.5\text{ m}) * 1.35 = 55.9\text{ kNm} \quad (64)$$

De kracht Q is de som van de gewichten van de windmolen en de fundering. Het gewicht van de windmolen werd berekend in '4.1 Inwerkende krachten'. De verticale kracht is:

$$Q = g_{\text{windmolen}} + g_{\text{fundering}} \quad (65)$$

$$Q = 3438\text{ N} + (3\text{ m} * 3\text{ m} * h) * 2200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (66)$$

Met 'h' de hoogte van de fundering. Dit kan ook geschreven worden als:

$$Q = 3.4\text{ kN} + 194 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * h \quad (67)$$

De totale verticale kracht is $Q = 266 \text{ kN}$.

Voor de grondoppervlakte van de fundering wordt er een vierkant van $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ gekozen. Zo is er genoeg plaats om de schuine balken te bevestigen. Nu kan er bepaald worden wat de minimale diepte van de fundering moet zijn, zodat het weerstandsmoment groot genoeg is. Indien de diepte bepaald is wordt gekeken of de draagkracht van de ondergrond groot genoeg is.

Indien het moment rond de fundering maximaal is, mag de fundering niet omkantelen. Het weerstandsmoment moet dus groter zijn dan het inwerkende moment. Het weerstandsmoment kan berekend worden d.m.v. [94], [95]:

$$M_r = (F_z + W_s + W_c) * r \quad (68)$$

met:

- M_r [Nm]: het weerstandsmoment van de fundering,
- F_z [N]: de verticale normaalkracht van de windmolen,
- W_s [N]: het gewicht van de grond boven de fundering,
- W_c [N]: het gewicht van de fundering,
- r [m]: de afstand van het middelpunt tot het uiterste punt.

Vermits de fundering kubusvormig is en tot aan het grondoppervlak komt, is er geen grond boven de fundering. De krachten F_z en W_c worden samengenomen tot kracht Q . Hieruit volgt dat het weerstandsmoment gelijk is aan:

$$M_r = Q * r \quad (69)$$

Het weerstandsmoment is:

$$M_r = (3.4 \text{ kN} + 194 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * h) * 1.5 \text{ m} \quad (70)$$

Het weerstandsmoment van de fundering M_r moet minstens even groot zijn als het inwerkende moment M_o . De hoogte van de fundering wordt vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor γ .

$$M_r \geq M_o \quad (71)$$

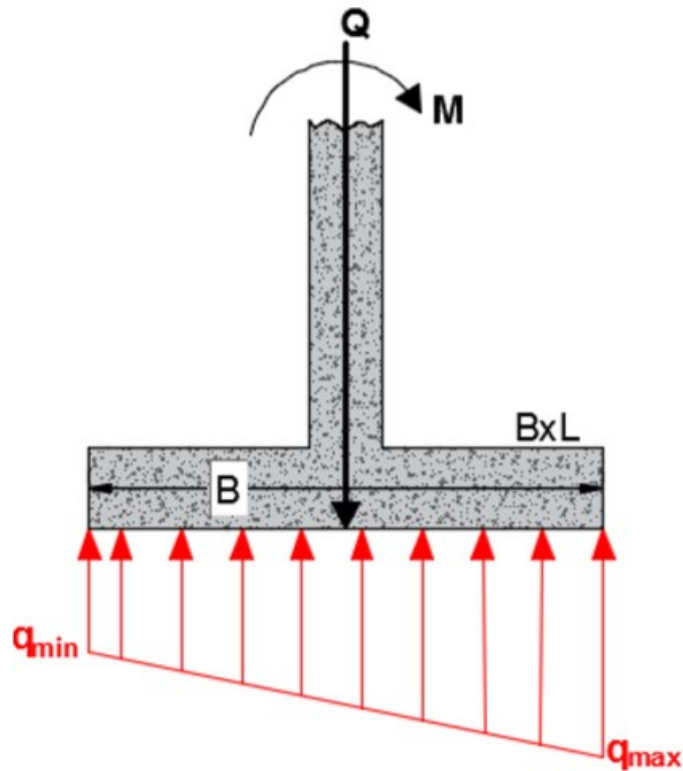
$$(3.4 \text{ kN} + 194 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * (\frac{h}{\gamma})) * 1.5 \text{ m} \geq 55.9 \text{ kNm} \quad (72)$$

Deze vergelijking kan omgevormd worden om de minimale hoogte van de fundering h te bepalen:

$$h \geq \frac{55.9 \text{ kNm} - 5.1 \text{ kNm}}{291 \text{ kNm}} * \gamma \quad (73)$$

Als veiligheidsfactor wordt $\gamma = 6.5$ genomen [96]. Dit brengt de minimale hoogte van de fundering op 1.14 m . Vermits de geometrie van de uitgegraven put niet exact kan bepaald worden, wordt er gekozen voor $h = 1.35 \text{ m}$.

Nu de fundering gedimensioneerd is, moet er bepaald worden of de draagkracht van de ondergrond groot genoeg is. Hiervoor wordt eerst de maximale druk onder de fundering berekend. De druk is niet even groot op elk punt onder de fundering, vermits er een excentrische belasting is door het inwerkende moment. De drukverdeling wordt weergegeven in Figuur 31.



FIGUUR 31: DRUKVERDELING ONDER DE FUNDERING [97]

De maximale en minimale druk wordt berekend d.m.v. [97]:

$$q = \frac{Q}{A} \pm \frac{Mc}{I} \quad (74)$$

met:

- q [Pa]: de druk onder de fundering,
- Q [N]: de kracht loodrecht op de fundering,
- A [m²]: de grondoppervlakte van de fundering,
- M [Nm]: het inwerkende moment op de fundering,
- c [m]: de maximale afstand van het centrum,
- I [m⁴]: het oppervlaktetraagheidsmoment.

Het oppervlaktetraagheidsmoment van een rechthoekige doorsnede is [81]:

$$I = \frac{bl^3}{12} \quad (75)$$

Het oppervlaktetraagheidsmoment wordt vervangen in de formule voor druk.

$$q = \frac{Q}{A} \pm \frac{Mc}{\left(\frac{bl^3}{12}\right)} \quad (76)$$

Nu kunnen alle parameters ingevuld worden:

$$q = \frac{266 \text{ kN}}{3 \text{ m} * 3 \text{ m}} \pm \frac{55.9 \text{ kN} * 1.5 \text{ m}}{\left(\frac{3 \text{ m} * (3 \text{ m})^3}{12}\right)} \quad (77)$$

De maximale druk op de ondergrond onder de fundering is $q_{\max} = 42.0$ kPa. De minimale druk is $q_{\min} = 17.1$ kPa.

Als de fundering gegoten is treedt er zetting op. Hierbij wordt de grond onder de fundering samengedrukt door de inwerkende krachten. Vermits de contactdruk laag genoeg is (<75 kPa) moet hier geen rekening mee gehouden worden indien de draagkracht van de grond groot genoeg is. De zetting bij windmolens is typisch kleiner dan 2.5 cm [98].

De draagkracht kan berekend worden m.b.v. verschillende theorieën, zoals de theorie van Terzaghi of de theorie van Meyerhof [99]. De theorie van Meyerhof is een uitbreiding op de theorie van Terzaghi, waarin ook rekening wordt gehouden met de schuifweerstand van de grond boven de fundering. Ook kan deze gebruikt worden voor diepe funderingen [99]. Vermits geen van beide gevallen hier van toepassing is, omdat er geen grond boven de fundering is, en omdat de fundering als ondiep kan beschouwd worden, wordt de theorie van Terzaghi gebruikt. De *ultimate bearing capacity* of de maximaal toegelaten draagkracht van een fundering met vierkante grondvlak, wordt berekend volgens [100]:

$$q_{ult} = 1.3c'N_c + qN_q + 0.4B'\gamma N_\gamma \quad (78)$$

met:

- q_{ult} [Pa]: de maximale draagkracht,
- c' [N/m²]: de effectieve cohesie van de dragende grond,
- N_c , N_q en N_γ : de draagkrachtcoëfficiënten die afhangen van de effectieve wrijvingshoek van de grond,
- q [Pa]: de effectieve spanning onder de fundering,
- γ [N/m³]: het effectieve specifieke gewicht van de dragende ondergrond,
- B' [m]: de effectieve breedte van de fundering.

Vermits de drukverdeling onder de fundering niet uniform is door de excentrische belasting, moet in de laatste term de 'effectieve breedte' gebruikt worden. Hiervoor moet eerst de excentriciteit e van de belasting berekend worden:

$$e = \frac{M}{Q} = \frac{55.9 \text{ kNm}}{266 \text{ kN}} = 0.21 \text{ m} \quad (79)$$

De effectieve breedte B' is:

$$B' = B - 2 * e = 3 \text{ m} - 2 * 0.21 \text{ m} = 2.58 \text{ m} \quad (80)$$

De draagkrachtcoëfficiënten kunnen berekend worden volgens [100], [101]:

$$N_q = \frac{e^{2\pi(0.75 - \frac{\phi'}{360^\circ}) \tan \phi'}}{2 \cos^2(45 + \phi'/2)} \quad (81)$$

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\tan \phi'} \quad (82)$$

$$N_\gamma = \frac{2(N_q + 1) \tan \phi'}{1 + 0.4 \sin 4\phi'} \quad (83)$$

De effectieve cohesie bij een zandgrond is $c' = 0$ N/m². Als effectieve wrijvingshoek wordt $\phi = 35^\circ$ genomen [102]. Daaruit volgt dat de draagkrachtcoëfficiënten gelijk zijn aan: $N_q = 41.4$, $N_c = 57.8$ en $N_\gamma = 47.3$. Het gemiddelde effectieve specifieke gewicht van zand is 15.7 kN/m³ [103]. Indien de grondwaterspiegel in de buurt van het oppervlak van de fundering komt moet de formule van Terzaghi aangepast worden. Uit putboringen in de omgeving blijkt dat de grondwaterspiegel tussen de 34 m en 160 m diep is. De theorie van Terzaghi kan dus gebruikt worden zonder aanpassingen. M.b.v. deze parameters kan berekend worden dat de maximaal toegelaten draagkracht $q_{ult} = 2.51$ MPa is. Indien er een veiligheidsfactor van 3 gebruikt wordt,

is de draagkracht van de ondergrond groot genoeg. Hieruit blijkt dat het ontwerp van de fundering volstaat. De put voor de fundering is weergegeven in Figuur 32.



FIGUUR 32: DE PUT VOOR DE FUNDERING

Beton staat er om gekend dat het relatief goed drukspanningen kan opvangen (tot zo'n 20 MPa), maar dat het niet goed trekspanningen kan opvangen (tot zo'n 3 MPa) [104]. Het eigengewicht van de windmolen is een zuivere drukbelasting, maar als er een windkracht wordt uitgeoefend op de windmolen ontstaat er een moment om de fundering. In dit geval treden er zowel druk- als trekkrachten op. Om te zorgen dat het beton niet scheurt onder de inwerkende trekkrachten, wordt er een metalen wapening aangebracht in het beton. Nu het volume van de fundering gekend is, kan het minimum wapeningsvolume berekend worden. Er wordt een minimum wapeningspercentage van 0.12 % aangenomen [105]:

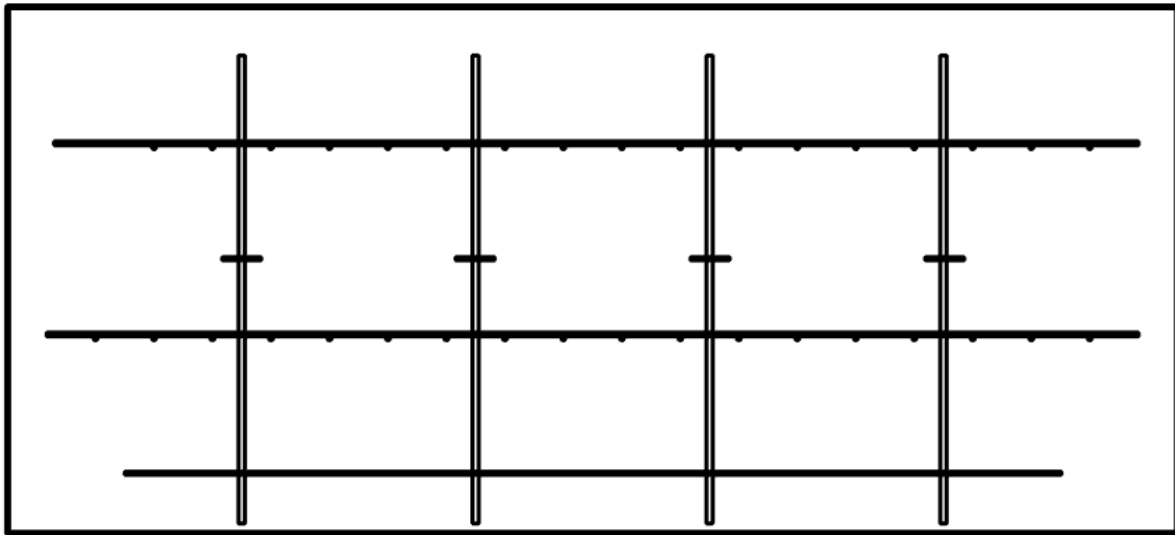
$$1350 \text{ mm} * 3000 \text{ mm} * 3000 \text{ mm} * 0.0012 = 1.46 * 10^7 \text{ mm}^3 \quad (84)$$

Indien er twee horizontale wapeningsnetten gelegd worden, gemaakt uit wapeningsstaal met een diameter van 10 mm en een lengte van 2.80 m, kan het minimum aantal parallelle baren berekend worden:

$$1.46 * 10^7 \text{ mm}^3 \leq a * 4 * 2800 \text{ mm} * \frac{\pi * (10 \text{ mm})^2}{4} \quad (85)$$

$$a \geq 16.6 \quad (86)$$

Er moeten dus minstens 17 parallelle baren per net geplaatst worden. Er wordt gekozen om er 18 per net te gebruiken. Daarnaast worden er ook nog horizontale latten en verticale baren geïnstalleerd om de fundering samen te houden. De exacte opbouw wordt in Figuur 33 weergegeven en eronder uitgelegd.

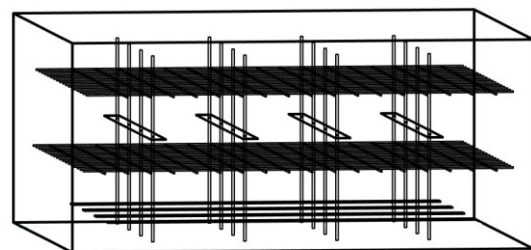


FIGUUR 33: HET VOORAANZICHT VAN DE WAPENING IN DE FUNDERING

In Figuur 33 is de wapening zichtbaar. De wapening wordt opgebouwd uit twee wapeningsnetten van 18 op 18 baren met een diameter van 10 mm en een lengte van 2.80 m (de tweede en vierde laag van onder gekeken). Daarnaast zijn er twee rijen horizontale latten (die 90° gedraaid zijn ten opzicht van elkaar) die bestaan uit 4 latten van 8 mm op 100 mm met een lengte van 2.40 m (de eerste en derde laag van onder gekeken). De technische tekening van deze latten is te vinden in Bijlage C. Als verticale wapening worden er vier rijen van vier baren met een diameter van 16 mm gebruikt. In Figuur 34 is het model van de fundering en de wapening zichtbaar. Het ontwerp is gemaakt in Autodesk Revit.



a)



b)

FIGUUR 34: (A) HET BUITENAANZICHT EN (B) BINNENAANZICHT VAN DE FUNDERING MET DE WAPENING

In Figuur 35 is de volledige wapening van de fundering zichtbaar. Daarnaast zijn ook de vier metalen platen voor de schuine balken (op de hoekpunten) en de grote onderplaat, voor de toren van de windmolen, zichtbaar. Deze platen worden met M20 draadstangen met een lengte van 1.00 m bevestigd in het beton van de fundering. In Figuur 36 is de afgewerkte fundering zichtbaar met de vier platen voor de schuine balken.



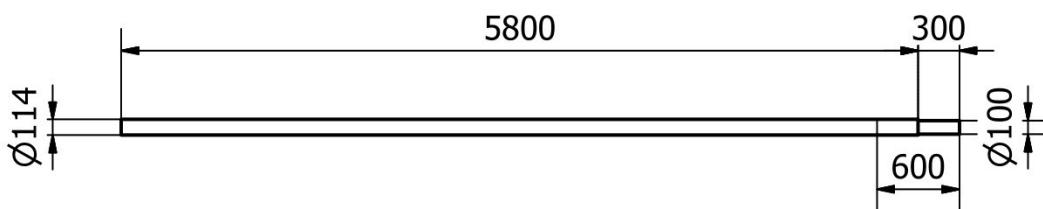
FIGUUR 35: DE WAPENING VAN DE FUNDERING



FIGUUR 36: DE AFGEWERKTE FUNDERING

4.4 Toren

Zoals eerder vermeld wordt de toren van de windmolen opgebouwd uit stalen buizen. Door de roestvaste eigenschappen wordt er gekozen om deze op te bouwen uit gegalvaniseerde buizen. Er wordt gebruik gemaakt van gegalvaniseerde buizen met een buitendiameter van 114 mm, binnendiameter 102 mm en een lengte van 5.80 m. Twee van deze buizen worden in de lengte aan elkaar gemaakt zodat er een lengte van 11.60 m wordt bekomen. Om deze twee buizen aan elkaar te bevestigen wordt er een verbindingsbuis met buitendiameter van 100 mm, een wanddikte van 3.6 mm en een lengte van 0.60 m vanboven in de onderste buis geschoven. Deze wordt 0.30 m diep in de onderste buis gestoken, zodat er nog 0.30 m verbindingsbuis uit de onderste buis uitsteekt. In Figuur 37 is de onderste buis weergegeven, met de verbindingsbuis die er ingeschoven is.



FIGUUR 37: DE ONDERSTE BUIS VAN DE TOREN, MET DE VERBINDINGSBUIS DIE ER INGESCHOVEN IS

De verbindingsbuis wordt aan de onderste buis gelast. Dan wordt de bovenste buis over de verbindingsbuis geschoven, en worden de onderste en de bovenste buis aan elkaar gelast. Op deze manier neemt de sterkte van de toren niet af door de lasverbinding. In Figuur 38 zijn de twee buizen, met een lengte van 5.80 m, waar de toren uit opgebouwd wordt, zichtbaar.



FIGUUR 38: DE BUIZEN VOOR DE TOREN

In totaal is de toren 13 meter hoog. De bovenste 1.40 m wordt overbrugd met een buis met een totale lengte van 3 m, buitendiameter van 100 mm en een wanddikte van 3.6 mm. Deze kleinere buis wordt ingesmeerd met smeermiddel, en wordt in de toren geplaatst zodat deze vrij kan roteren. Op deze bovenste buis wordt een metalen rand gelast, zodat ze niet in de toren zakt.

Uit Figuur 29 blijkt dat de buis tussen de schuine balken en de fundering het hardste belast wordt, maar met een stabiliteit van 80,344 % voldoet deze wel aan de eurocode 3. Een rapport van de berekening van de stabiliteit van deze buis is bijgevoegd in Bijlage D.

In het midden van de fundering bevindt zich een grote onderplaat, die met 12 M20 draadstangen bevestigd is in de fundering. Deze plaat is zichtbaar in Figuur 35 en Figuur 45. De technische tekening van deze plaat is te vinden in Bijlage E. Op deze plaat ligt een kleinere plaat, die gescharnierd kan worden, zoals uitgelegd zal worden in '4.7 Kantelmechanisme'. Op deze kleinere plaat wordt de toren gelast. Er worden vier rechtstaande driehoeken tegen de toren gelast om het lasoppervlakte en de stabiliteit te verhogen. De technische tekening van deze driehoeken is te vinden in Bijlage F.

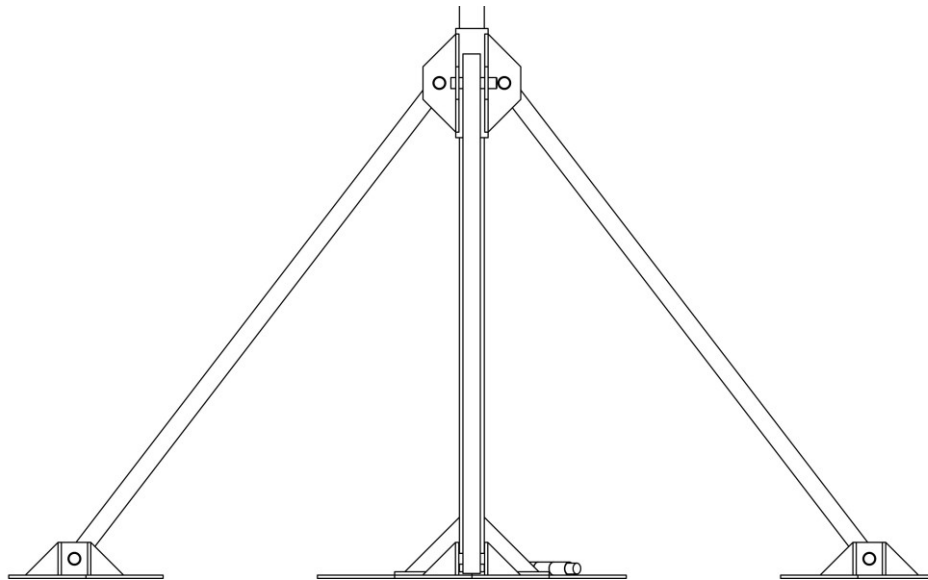
4.5 Schuine balken

De toren wordt ondersteund door vier balken tussen de toren en de hoekpunten van de fundering. Er wordt gekozen voor balken gemaakt uit S235 met doorsnede 80 mm x 80 mm met een wanddikte van 3 mm, waarvan de technische tekening in Bijlage G staat. In Figuur 39 wordt een foto weergegeven van de vier schuine balken. Deze balken zijn (in het rood) geverfd, om ze roestbestendig te maken.



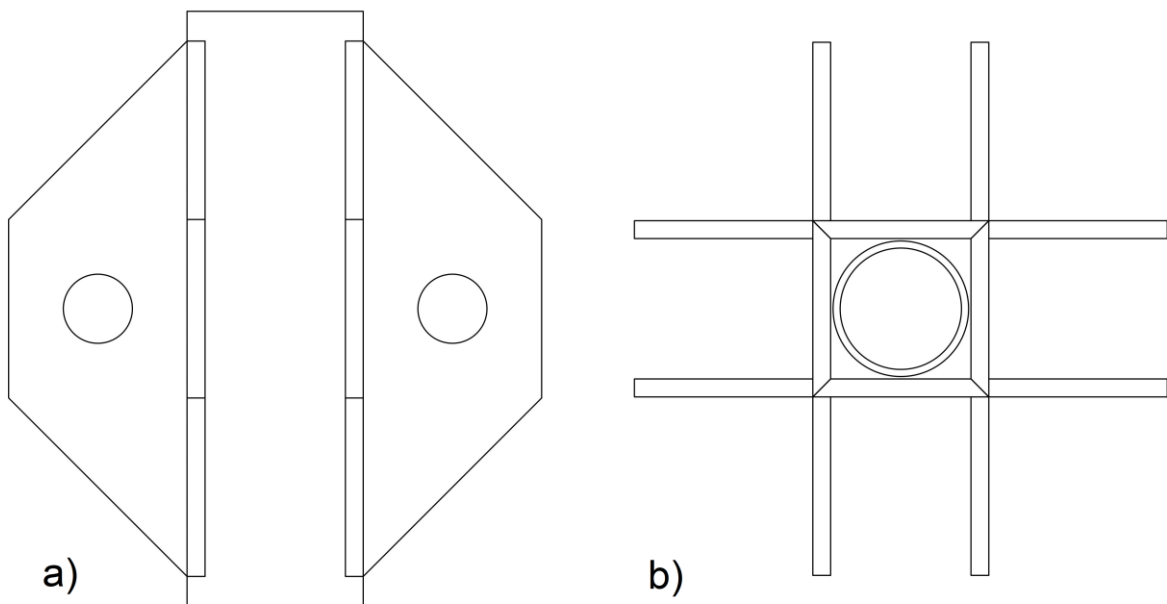
FIGUUR 39: DE VIER SCHUINE BALKEN

In Figuur 40 wordt een concepttekening weergegeven van de onderkant van de toren, waarop drie schuine balken zichtbaar zijn. In de schuine balken is, zowel van boven als beneden, een gat geboord. Hierdoor kan er een horizontale as, met een diameter van 50 mm, doorgestoken worden om de balk te bevestigen aan de grond, en aan de toren.



FIGUUR 40: CONCEPTTEKENING VAN DE SCHUINE BALKEN MET DE ONDERKANT VAN DE WINDMOLEN

De schuine balken worden bevestigd aan de toren met behulp van een bus. Hierdoor vangen de schuine balken alleen horizontale krachten op, zodat ze het uitzetten van de toren niet tegenwerken. Een tekening van het concept van deze bus wordt afgebeeld in Figuur 41. De samenstelling van de bus staat in Bijlage H.



FIGUUR 41: CONCEPTTEKENING VAN (A) VOORAANZICHT EN (B) BOVENAANZICHT VAN DE BUS WAARMEE DE SCHUINE BALKEN AAN DE TOREN BEVESTIGD WORDEN. IN (B) IS DE TOREN IN HET MIDDEN ZICHTBAAR.

De bus wordt opgebouwd uit vier rechthoekige platen, die aan elkaar worden gelast. Op deze bus worden dan acht platen gelast waarin een gat zit. Door deze gaten kunnen de pennen worden gestoken, waaraan de schuine balken bevestigd worden.

Aan de onderkant worden de schuine balken m.b.v. een gelijkaardig systeem bevestigd aan de fundering. Op de vier hoekpunten van de fundering wordt een metalen plaat van 0.50 m op 0.50 m bevestigd. De technische tekening van deze plaat is te vinden in Bijlage I. Deze plaat zit met vier M20 draadstangen vast in het beton. Op elke plaat staan twee opstaande zijden, die rechtgehouden worden m.b.v. vier driehoeken. Deze bevestiging is zichtbaar op de

concepttekening in Figuur 40. De technische tekening is zichtbaar in Bijlage J. De schuine balk wordt hier, net zoals bij de bevestiging aan de bus aan de toren, bevestigd d.m.v. een as. Een sterkteberekening voor deze as wordt gegeven in Bijlage K.

4.6 Kabels

Om de stabiliteit van de toren te verhogen wordt er gekozen om vier kabels te spannen tussen de toren en de grond. Hoe hoger de kabels aan de toren bevestigd worden, hoe groter het moment dat ze kunnen opvangen. Indien ze te hoog hangen kunnen ze echter in contact komen met de wieken. Volgens Jenkins is de bevestigingshoogte van de kabel meestal tussen de 50 en 75 % van de volledige hoogte van de toren [106].

Vermits de toren 13 m is, en de wieken 2.50 m meter lang zijn, worden de kabels op een hoogte van 9.50 m opgehangen. Zo is er een afstand van 1.00 m tussen de tip van de wiek en de bevestiging van de kabel aan de toren. De kabels worden eveneens op 9.50 m van de toren bevestigd aan een fundering op de grond. De kabels worden in het horizontale vlak 45° gedraaid t.o.v. de schuine balken, om de kniklengte van de toren te vergroten. De funderingen loodrecht op de kantelrichting worden enkele centimeters dichter naar de kantelrichting geplaatst, zodat de kabels niet losgemaakt moeten worden als de windmolen platgelegd wordt.

Om de kabels en de funderingen te dimensioneren moet er gekeken worden naar de maximale kracht die op de kabels inwerkt. Uit de berekening in Diamonds blijkt dat, indien de windmolen rechtstaat, de maximale kracht op de kabel 2.32 kN is. Indien de toren rechtgetrokken wordt, is de kracht op de kabel waar het katrol aan bevestigd is 10.3 kN, zoals berekend bij het subhoofdstuk over het kantelmechanisme. Op dit moment is de kracht echter bijna horizontaal, waardoor deze niet wordt opgevangen door het gewicht van de fundering, maar het verticale contactoppervlak met de grond. Met deze kracht moet echter wel rekening gehouden worden bij het dimensioneren van de kabel zelf.

Indien de maximale kracht op een kabel inwerkt, moet de fundering ervoor zorgen dat de kabel niet beweegt. Het gewicht van de fundering moet dus groter zijn dan de kracht op de kabel. Voor de kracht op de kabel wordt gerekend met een veiligheidsfactor γ van 1,5.

$$m_{fundering,min} = \frac{F_{kabel,max} * \gamma}{g} \quad (87)$$

$$m_{fundering,min} = \frac{2321 \text{ N} * 1.5}{9.81 \text{ m/s}^2} = 354.9 \text{ kg} \quad (88)$$

De fundering wordt gemaakt uit gewapend beton. De massadichtheid van beton kan variëren, maar vermits de exacte samenstelling niet kan gegarandeerd worden wordt er verder gerekend met een massadichtheid van 2300 kg/m^3 [107]:

$$V_{fundering,min} = \frac{m_{fundering,min}}{\rho_{beton}} \quad (89)$$

$$V_{fundering,min} = \frac{354.9 \text{ kg}}{2300 \text{ kg/m}^3} = 0.1543 \text{ m}^3 \quad (90)$$

Voor de vorm van de fundering wordt gekozen voor een verticale cilindervorm. Er wordt gekozen voor een verticale lengte van 60cm. Hieruit kan de minimale diameter berekend worden:

$$V_{fundering,min} = \frac{\pi * D_{fundering,min}^2}{4} h \quad (91)$$

$$D_{fundering,min} = \sqrt{\frac{4V_{fundering,min}}{\pi h}} \quad (92)$$

$$D_{fundering,min} = \sqrt{\frac{4 * 0.1543 \text{ m}^3}{\pi * 0.60 \text{ m}}} = 0.57 \text{ m} \quad (93)$$

De positieve wortel geeft de minimale diameter voor de fundering. De fundering moet dus een minimum diameter hebben van 57 cm.

Om de kabel te kunnen vastmaken aan de fundering worden er twee funderingsstaven met een diameter van 16 mm verticaal gezet met een onderlinge afstand van 30 cm. Deze worden aan de bovenkant met elkaar verbonden d.m.v. twee gebogen funderingsstaven van 10 mm, zoals te zien in Figuur 42. In Figuur 43 is de fundering te zien als de beton gegoten is. Hier is te zien hoe de twee gebogen wapeningsijzers, die gebruikt worden om de kabel aan te bevestigen, uit de fundering steken (met een houten balk door om de metalen te stabiliseren bij het gieten van de beton).



FIGUUR 42: DE PUT VOOR DE KABELFUNDERING MET HET WAPENINGSIJZER



FIGUUR 43: DE KABELFUNDERING NADAT HET BETON GEGOTEN IS

De maximale kracht op de kabels (wanneer de toren wordt rechtgetrokken) is 10.3 kN. Er wordt gekozen voor kabels van 12 mm. Volgens EngineeringToolbox is de minimale breeksterkte van een kabel van 11.5 mm 73.6 kN en de veilige belasting 14.7 kN [108].

De kabel kan enkel krachten opvangen indien deze aangespannen is. Om te zorgen dat er altijd een spanning in de kabel is wordt er een kabelspanner geïnstalleerd. De kabelspanner wordt d.m.v. een D-sluiting verbonden aan het metaal van de fundering. De kabel wordt d.m.v. drie kabelklemmen vastgemaakt aan de draadspanner.

Aan de toren wordt een plaat gelast met een opening in om de kabel door te lussen. Hier wordt de kabel ook bevestigd met drie kabelklemmen. De technische tekening van de plaat is te vinden in Bijlage L.

Eén van de kabels wordt ook gebruikt om de toren te kantelen, zoals besproken zal worden in '4.7 Kantelmechanisme'. In deze fundering worden twee keer twee gebogen wapeningsijzers, en drie verticale baren gestoken, zoals weergegeven in Figuur 44. Eén van deze bogen wordt gebruikt om de katrol aan te bevestigen, de andere om de kabel aan te bevestigen, als de toren recht staat.



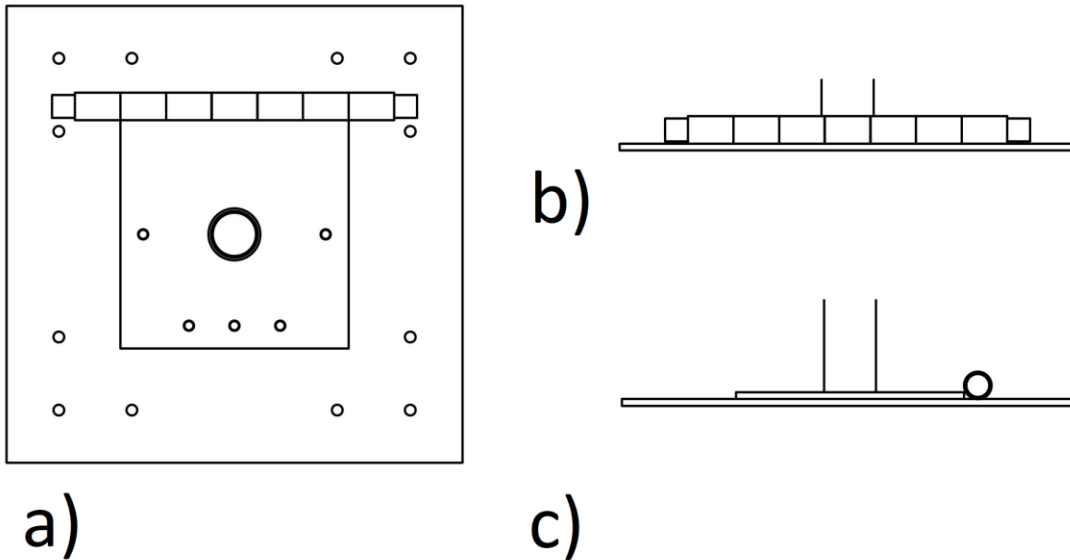
FIGUUR 44: DE WAPENING VAN DE KABELFUNDERING WAAR DE KATROL AAN BEVESTIGD WORDT

4.7 Kantelmechanisme

Eén van de grote voordelen van een tilt-up windmolen is de mogelijkheid om de windmolen op de grond te kunnen opbouwen en dan recht te kunnen zetten. Daarnaast kan de windmolen neergelegd worden bij hevige windsnelheden of onderhoud.

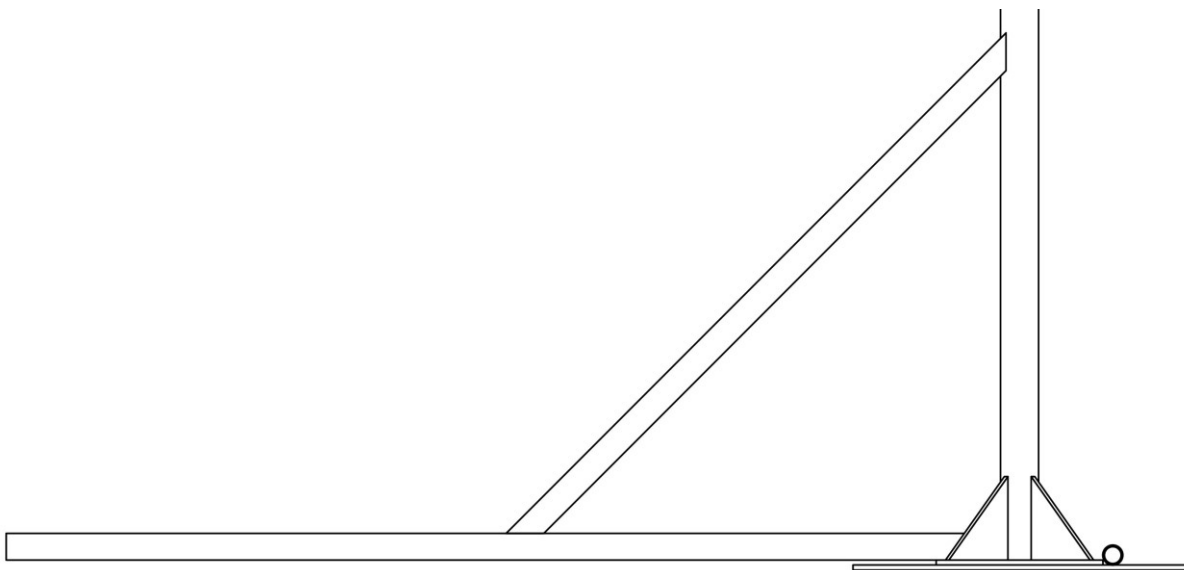
Om de windmolen te kunnen kantelen wordt de toren op een scharnier bevestigd. In Figuur 45 is het scharnier in verschillende aanzichten te zien. In het bovenaanzicht is de positionering ten opzichte van de onderplaat van de fundering zichtbaar.

Het scharnier wordt opgebouwd uit twee metalen platen, waarvan de onderste wordt gefixeerd op de fundering. Deze fixatie gebeurt met behulp van twaalf M20 draadstangen, die vastgegoten worden in de fundering. Op de bovenste metalen plaat zal de toren worden gelast. Om het draaien mogelijk te maken, worden de buitenste buizen van het scharnier beurtelings aan de bovenste en de onderste plaat gelast. De verschillende buizen worden aan elkaar verbonden door middel van een as, met een diameter van 50 mm, die door de buizen wordt gestoken. In Bijlage M wordt de sterkteberekening voor deze as uitgeschreven. In de onderste plaat zijn vijf gaten geboord waar draad in getapt is. Wanneer de windmolen in gebruik is wordt de bovenste plaat vastgemaakt aan de onderste met behulp van schroeven, om omkantelen onmogelijk te maken.



FIGUUR 45: (A) BOVENAANZICHT, (B) ACHTERAANZICHT EN (C) ZIJAAANZICHT VAN HET KANTELMECHANISME

Zoals in '4.6 Kabels' aangehaald, wordt één van de kabels gebruikt om de windmolen te kantelen. Deze kabel is op een hoogte van 9.50 m vastgemaakt aan de toren zoals de andere kabels. Er wordt een balk loodrecht t.o.v. de toren geplaatst, zoals weergegeven in Figuur 46, die de kabel raakt wanneer de toren horizontaal genoeg is (onder de 35 °). Zo wordt de kracht op de kabel beperkt. De technische tekening van deze balk is te vinden in Bijlage N. De sterkteberekening voor deze balk wordt weergegeven in Bijlage O. De vorm van de toren wordt in de balk gesneden, zodat ze goed aansluit. De balk wordt aan de toren, en aan de bovenste plaat van het scharnier, gelast. Daarnaast wordt er een schuine ondersteuningsbalk geplaatst, ook zichtbaar in Figuur 46, zodat de spanning in de balk niet te hoog wordt. De technische tekening van de ondersteuningsbalk is te vinden in Bijlage P. Proefondervindelijk wordt gekeken of deze balk volstaat om de kabel te geleiden. Indien het oppervlak te klein zou zijn, kan hier nog een goot om de kabel te geleiden.



FIGUUR 46: DE BALKEN DIE GEBRUIKT WORDEN OM DE TOREN TE KANTELLEN

4.8 Wieken

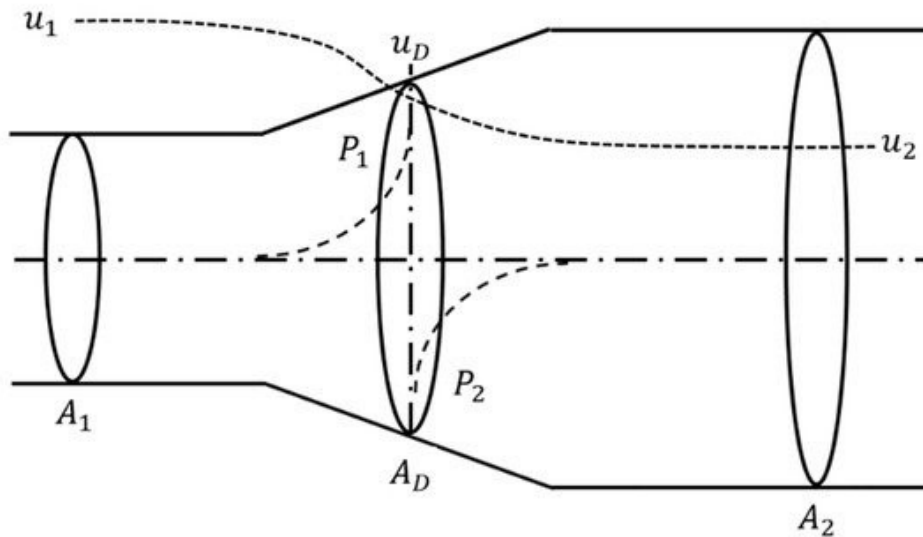
Het ontwerp van de wieken is belangrijk om de mechanische energie van de wind om te zetten in een rotatie van de rotor. Eerst wordt er m.b.v. een theoretisch model bepaald wat het aerodynamisch optimum is bij de gegeven randvoorwaarden. De stroming van een fluïdum (en dus ook van de wind rond een wiek) wordt voornamelijk beschreven d.m.v. niet-lineaire vergelijkingen [109]. Dit heeft als gevolg dat een kleine variatie in de randvoorwaarden een groot verschil in uitkomst kan geven. Vermits er geen mogelijkheid is om de wieken te testen in een windtunnel, is het vrijwel onmogelijk om alle parameters exact te kennen. Om toch een goed beeld te krijgen van het gedrag van de windmolen, en om het theoretische model te kunnen verifiëren, wordt er daarna m.b.v. de theoretische waarden, een simulatiemodel van de rotor opgesteld. Als laatste wordt dit model omgezet naar een praktisch realiseerbaar ontwerp voor de wieken.

Zoals in '3.1.2 Dimensionering van een windturbine' bepaald, is de straal van de rotor 3.18 m. Vermits de wieken bevestigd worden aan de naaf van de windmolen, en de naaf een diameter heeft van 1 m, mogen de wieken iets korter zijn. Er wordt een lengte van 2.50 m genomen voor de wieken, vermits deze lengte economisch gezien het meest haalbaar is met de aanwezige materialen, zoals besproken zal worden in het praktisch model.

4.8.1 Theoretisch model

Om berekeningen uit te voeren met windmolenwieken bestaan meerdere theorieën. Een voorbeeld van zo'n theorie is de *momentum*- of *impulstheorie* [110]. In deze theorie wordt de rotor als een *actuator disc* beschouwd, waarbij geen rekening gehouden wordt met de geometrie van de wiek. Een andere theorie is de *blade element* theorie waarbij de geometrie van de wiek beschouwd wordt [110]. Voor het vervolg van de berekeningen wordt gewerkt met de *blade element momentum* (BEM) theorie. Deze theorie combineert de vorige twee theorieën en heeft als voordeel dat de geïnduceerde snelheden die voorkomen in de blade element theorie uitgerekend kunnen worden door deze vergelijkingen uit te werken met de resultaten uit de momentum theorie [110]. Hieronder wordt de vlakke schijf van de impulstheorie, en de geometrie van een wiek volgens de blade element theorie, getoond. Daarna worden de karakteristieke waarden van de wiek bepaald.

In Figuur 47 wordt de actuator disc getoond zoals gebruikt in de momentum theorie. De waarden A_1 , A_D en A_2 zijn respectievelijk de oppervlakte (m^2) van het fluïdum ver voor-, ter hoogte van-, en ver na de rotor. U_1 , U_D en U_2 zijn respectievelijk de snelheden van de luchtstroom (m/s) ver voor-, ter hoogte van-, en ver na de rotor. De waarden P_1 en P_2 zijn de waarden van de druk van het fluïdum (Pa) vlak voor en vlak na de rotor.



FIGUUR 47: DE ACTUATOR DISC DIE BESCHOUWD WORDT IN DE MOMENTUM THEORIE [111]

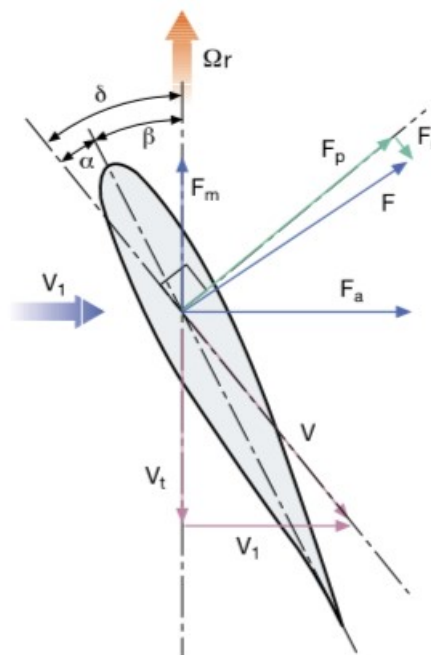
Een belangrijk begrip uit de impulsstheorie is de axiale inductie factor a :

$$a = \frac{U_1 - U_D}{U_1} = 1 - \frac{U_D}{U_1} \quad (94)$$

Indien de impulsstheorie wordt uitgebreid door aan te nemen dat de actuator disc kan rondraaien, kan er nog een inductiefactor geïntroduceerd worden, de *angular induction factor* of tangentiële inductie factor a' waarin de verhouding wordt gegeven tussen de hoeksnelheid van de tangentiële stroming na de rotor ω en de hoeksnelheid van de rotor disc Ω [112]:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (95)$$

In Figuur 48 worden de verschillende karakteristieke kenmerken van een windmolenwiek overlopen, zoals gedefinieerd door de blade element theorie. Deze worden onder de figuur besproken.



FIGUUR 48: KARAKTERISTIEKE HOEKEN, WINDSNELHEDEN EN KRACHTEN OP EEN WINDMOLENWIEK VOLGENS DE BLADE ELEMENT THEORIE [24]

hoeken:

- α [rad]: de *angle of attack* of invalshoek. Dit is de hoek tussen de relatieve luchtstroming en de maximum koorde van de doorsnede van de wiek.
- β [rad]: de *pitch angle* of hellingshoek. Dit is de hoek tussen het rotatievlak van de wiek en de maximum koorde van de doorsnede van de wiek.
- δ [rad]: de *fabrication angle* of *inflow angle*. Dit is de som van de invalshoek en de hellingshoek: $\delta = \alpha + \beta$,

krachten:

- F [N]: de totale kracht, uitgeoefend door de wind, op de wiek,
- F_p [N]: de liftkracht,
- F_r [N]: de dragkracht of weerstandskracht,
- F_m [N]: de *motive force* of drijfkracht. Dit is de koppelvormende kracht op de as,
- F_a [N]: de *axial force* of axiale kracht. Deze kracht levert geen koppel en zorgt enkel voor extra belasting op de wieken en toren,

windsnelheden:

- V_1 [m/s]: de wind die invalt op de wiek, deze loopt parallel met de as van de turbine,
- V_t [m/s]: de tangentiële windsnelheid, deze wordt veroorzaakt door de rotatie van de wiek,
- V [m/s]: de totale snelheid van de luchtstroom over de wiek.

bewegingssnelheden:

- Ω_r [m/s]: de tipsnelheid van de wiek. Dit is de hoeksnelheid Ω (rad/s) van de wiek vermenigvuldigd met de afstand van het beschouwde punt (de tip) tot het middelpunt van het rotatievlak.

Nu de belangrijkste parameters uit de blade element theorie en de momentum theorie besproken zijn, kunnen de benodigde parameters bepaald worden a.d.h.v. de blade element momentum theorie.

Vermits de vergelijkingen niet-lineair en afhankelijk zijn van elkaar is het niet mogelijk om een directe, analytische, oplossing uit te werken. Daarom moeten deze vergelijkingen iteratief uitgewerkt worden. Er wordt begonnen met een initiële schatting voor de invalshoek en de axiale-, en tangentiële inductiefactor. Deze waarden kunnen ofwel willekeurig geschat worden, ofwel geschat worden d.m.v. een sterk vereenvoudigde berekening, zodat de iteratieve berekening sneller convergeert. Er wordt gekozen voor een vereenvoudigde berekening. Hierbij wordt er van uit gegaan dat er geen weerstand en geen tipverliezen zijn [113]. Voordat deze schattingen gemaakt worden, moeten de basisrandvoorwaarden, zoals de nominale hoeksnelheid van de rotor, bepaald worden. Deze wordt gelijk gesteld aan de nominale hoeksnelheid van de gekozen generator. Zoals besproken zal worden in '5.2 Generator' is het nominale toerental van de generator 100 RPM:

$$\Omega = 2\pi f = 2\pi * \frac{100 \text{ RPM}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 10.47 \text{ rad/s} \quad (96)$$

Nu de hoeksnelheid bepaald is kan de tip speed ratio (TSR) λ berekend worden. Dit is de verhouding van de snelheid van de tip van de wiek en de invallende windsnelheid [24]:

$$\lambda = \frac{\Omega * R}{U_1} = \frac{10.47 \text{ rad/s} * 2.50 \text{ m}}{3.56 \text{ m/s}} = 7.353 \quad (97)$$

Met dezelfde formule kan ook de tip speed ratio op een willekeurige straal r berekend worden:

$$\lambda_r = \frac{\Omega * R}{U_1} \quad (98)$$

Het volgende dat bepaald moet worden is het aantal wieken. Bij windturbines met een TSR tussen 6 en 8 wordt er meestal gekozen voor drie wieken [114]. Voor de invalshoek α wordt een hoek van 9° gekozen. Dit is bij kleine windturbines de optimale hoek bij een windsnelheid tussen 3.5 m/s en 5 m/s [115]. Om verder te gaan met de berekeningen wordt de wijk opgedeeld in tien gelijke delen in de lengterichting van de wijk. Zo worden de nodige parameters berekend op elf punten die 0.25 m van elkaar af liggen. In Bijlage Q wordt de volledige berekening voor elk punt gegeven. Om een geschikt vleugelprofiel te kiezen, is het belangrijk om te weten bij welk Reynoldsgetal de wijk moet werken. Om het Reynoldsgetal te bepalen moet de lengte van de koorde gekend zijn op de elf beschouwde punten. Om de koorde te berekenen moet de liftcoëfficiënt echter gekend zijn. Hierdoor wordt eerst de liftcoëfficiënt berekend van een willekeurige wijk, bij de gekozen invalshoek. Hierna kan het Reynoldsgetal gekozen worden, waarna er een geschikt vleugelprofiel gekozen wordt. Op basis van de invalshoek α ($^\circ$) wordt de liftcoëfficiënt benaderd d.m.v. [82]:

$$C_L = 6 * 10^{-5} \alpha^4 - 0.002 \alpha^3 + 0.023 \alpha^2 + 0.028 \alpha + 0.44 \quad (99)$$

Indien als invalshoek $\alpha = 9^\circ$ genomen wordt is $C_L = 1.464$. In Tabel 11 wordt het resultaat weergegeven. Op elk punt wordt de inflowhoek δ berekend d.m.v. een benaderende formule. Bij deze formule wordt geen rekening gehouden met tipverliezen of weerstand, daarom wordt deze berekening enkel gebruikt om een benaderend idee te hebben om het iteratief proces te starten [113]:

$$\delta = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) [rad] \quad (100)$$

Aan de tip van de wijk ontstaat er in het fluïdum een vortex of wervel. Dit is een turbulente stroming die rond zijn eigen as draait. Hierdoor daalt de nuttige kracht op de wijk. Dit verlies, ook wel Prandtl's of Prandtl's-Glauert tipverlies genoemd, kan weergegeven worden m.b.v. een factor Q die tussen 0 en 1 ligt. Hoe meer deze factor afwijkt van 1, hoe groter de verliezen. Deze factor kan berekend worden a.d.h.v. de inflowhoek δ , de afstand van de naaf r , de totale lengte van de wijk R en het aantal wieken N [116], [113], [117]:

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[e^{\left(\frac{-N/2(1-r/R)}{(r/R) \cos \delta} \right)} \right] \quad (101)$$

Op ieder punt wordt de totale snelheid V berekend door de gemiddelde windsnelheid en de tangentiële snelheid vectorieel op te tellen m.b.v. de stelling van Pythagoras:

$$V = \sqrt{(V_1)^2 + (V_t)^2} \quad (102)$$

De tangentiële windsnelheid V_t kan vervangen worden door $\Omega * r$:

$$V = \sqrt{(V_1)^2 + (\Omega * r)^2} \quad (103)$$

Daarnaast wordt de optimale lengte van de koorde (*chord*) berekend op elk van de elf punten [118]:

$$C_{opt} = \frac{2\pi * r}{n} \frac{8}{9 * C_L} \frac{V_{wd}}{\lambda * V} \quad (104)$$

met:

- C_{opt} [m]: de optimale lengte van de koorde,
- r [m]: de afstand van het middelpunt,
- n : het aantal wieken van de windmolen,
- C_L : de liftcoëfficiënt,
- λ : de tip-speed-ratio (TSR),
- V_{wd} of V_1 [m/s]: de ontwerpwind snelheid,
- V [m/s]: de totale windsnelheid,
- V_t [m/s]: de tangentiële snelheid van de wiek.

Hierin kan de totale windsnelheid vervangen worden:

$$C_{opt} = \frac{2\pi * r}{n} \frac{8}{9 * C_L} \frac{V_{wd}}{\lambda * \sqrt{(V_1)^2 + (\Omega * r)^2}} \quad (105)$$

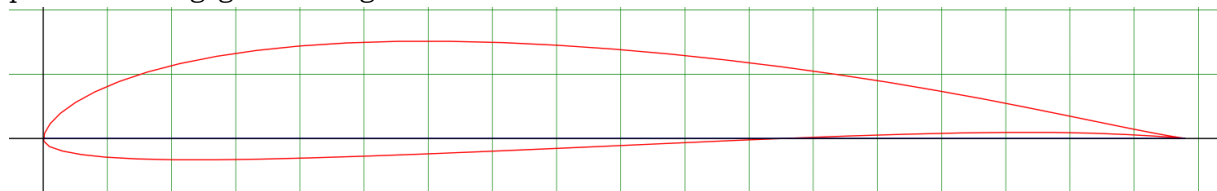
M.b.v. de lengte van de koorde C en het aantal wieken N kan de *solidity* (oppervlakteverhouding) σ' berekend worden. Dit is de verhouding van de som van de kordes van de wieken op een bepaalde afstand van het middelpunt van de rotor r , en de volledige omwentelingsomtrek op diezelfde afstand van het middelpunt. De oppervlakteverhouding kan op eender welk punt van de wiek berekend worden met [119]:

$$\sigma' = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (106)$$

Met behulp van de lengte van de koorde C kan het Reynoldsgetal berekend worden. Voor het berekenen van het Reynoldsgetal wordt er gebruik gemaakt van de massadichtheid en de dynamische viscositeit van het fluïdum. Deze twee waarden variëren met de temperatuur. Bij de berekening in '4.1 Inwerkende krachten' werd voor deze waarden respectievelijk de hoogst en de laagst mogelijke temperatuur gebruikt, zodat de maximale kracht berekend kon worden. Bij onderstaande berekening wordt de wiek ontworpen om bij alle temperaturen zo goed mogelijk te kunnen werken, daarom wordt er gebruik gemaakt van de gemiddelde temperatuur. De gemiddelde temperatuur in Dakar is ongeveer 25 °C [4]. Bij deze temperatuur is de massadichtheid van lucht $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$ [76]. De dynamische viscositeit is $\mu = 1.849 * 10^{-5} \text{ kg/m*s}$ [76].

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} C}{\mu} \quad (107)$$

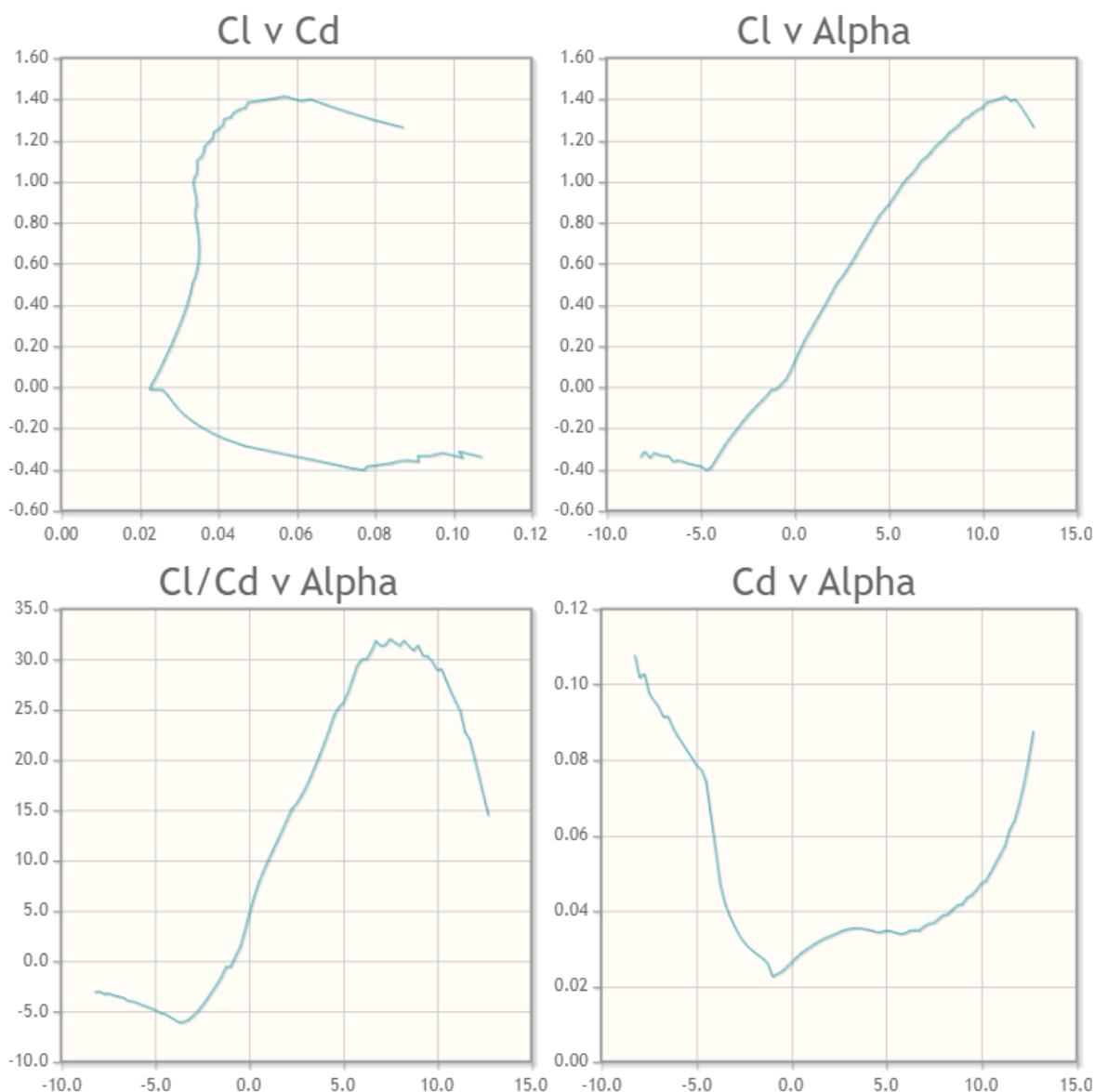
Hieruit blijkt dat het gemiddelde Reynoldsgetal $Re = 1.053 * 10^5$ is. Er wordt gekozen voor het SD7032-vleugelprofiel. Dit profiel is ontworpen voor lage Reynoldsgetalen [120]. Het gekozen profiel is weergegeven in Figuur 49.



Name = SD7032-099-88
Chord = 178mm Radius = 0mm Thickness = 100% Origin = 0% Pitch = 0°

FIGUUR 49: EEN DOORSNEDE VAN HET SD7032-VLEUGELPROFIEL OP DE GEMIDDELDE KOORDE [120]

Vermits er nu een vleugelprofiel gekozen is, kunnen de lift- en weerstandscoëfficiënten exact bepaald worden. In Figuur 50 wordt de liftcoëfficiënt in functie van de weerstandscoëfficiënt, de liftcoëfficiënt in functie van de invalshoek, de verhouding tussen de lift- en weerstandscoëfficiënt in functie van de invalshoek en de weerstandscoëfficiënt in functie van de invalshoek weergegeven. Deze verhoudingen zijn bij een Reynoldsgetal van $Re = 10^5$ [120].



FIGUUR 50: DE (VERHOUDINGEN) TUSSEN DE LIFTCOËFFICIËNT C_L EN WEERSTANDSCOËFFICIËNT C_D IN FUNCTIE VAN DE INVALSHOEK α [120]

De Reynoldsgetallen bij ontwerpwindnelheid blijven laag genoeg (rond de 10^5) waardoor de coëfficiënten voor alle berekeningen kunnen gebruikt worden [121]. Nu de inflowhoek δ , de lengte van de koorde C en de oppervlakteverhouding σ' gekend zijn, kan er een initiële gok gemaakt worden voor de axiale en tangentiële inductiefactor [113]:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{4 \sin^2 \delta}{\sigma' C \cos \delta}} \quad (108)$$

C_p is maximaal (bij het geïdealiseerde model) als [122]:

$$a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \quad (109)$$

Nu er een initiële gok gemaakt is voor de inflowhoek, de axiale- en de tangentiële inductiefactor kan het iteratief proces gestart worden. Hiervoor worden nauwkeurigere vergelijkingen gebruikt om de drie parameters te bepalen [113]:

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{1 - a}{\lambda_r(1 + a')}\right) \quad (110)$$

$$a = \frac{1}{\left(1 + \frac{4 \sin^2 \delta}{\sigma' C \cos \delta}\right)} \quad (111)$$

$$a' = \frac{\sigma' C}{4\lambda_r \sin \delta}(1 - a) \quad (112)$$

Na vier iteraties is het verschil tussen de vorige iteratiestap en de huidige stap voor de drie parameters kleiner dan 0.1 %. De drie parameters zijn geconvergeerd en de iteratie wordt gestopt. In Tabel 11 wordt de lengte van de koorde, de axiale- en de tangentiële inductiefactor gegeven op het einde van de iteratie op de elf beschouwde punten op de wiek.

TABEL 11: DE LENGTE VAN DE KOORDE, AXIALE- EN TANGENTIËLE INDUCTIEFACTOR OP DE 11 BESCHOUWDE PUNTEN OP DE WIEK

r (m)	C (m)	a	a'
0.00m	0.462m	0.000	∞
0.25m	0.372m	0.265	0.326
0.50m	0.260m	0.194	0.097
0.75m	0.191m	0.125	0.046
1.00m	0.149m	0.083	0.027
1.25m	0.121m	0.058	0.017
1.50m	0.102m	0.043	0.012
1.75m	0.088m	0.032	0.009
2.00m	0.077m	0.025	0.007
2.25m	0.069m	0.020	0.005
2.50m	0.062m	0.017	0.004

De gemiddelde lengte van de koorde is 17.8 cm. Nu alle parameters gekend zijn, kan er berekend worden wat de vermogenscoëfficiënt van de windmolen is. Deze kan berekend worden m.b.v. [113]:

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} Q \lambda_r^3 a'(1 - a) \left[1 - \frac{C_D}{C_L} \tan \delta\right] d\lambda_r \quad (113)$$

Deze integraal kan d.m.v. een numerieke integratiemethode uitgerekend worden. Wegens de eenvoud wordt er gekozen voor de trapeziumregel. Bij deze regel kan de integraal benaderd worden door [123]:

$$C_P \approx \frac{8}{\lambda^2} * \frac{\lambda - \lambda_h}{2n} (y_0 + y_n + 2 \sum_{j=1}^{n-1} y_j) \quad (114)$$

Met n het aantal intervallen, in dit geval 10. Hierin is y_j gelijk aan:

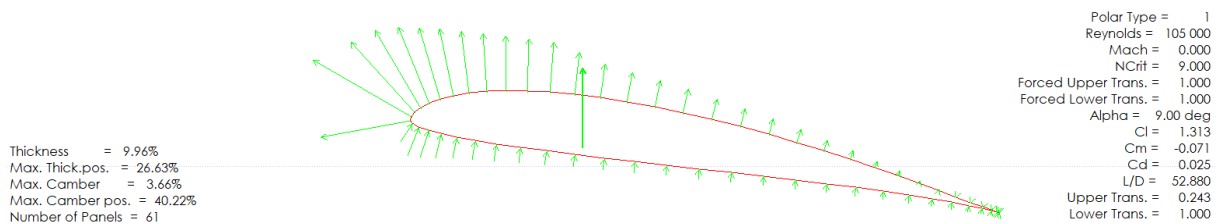
$$y_j = Q \lambda_r^3 a'(1 - a) \left[1 - \frac{C_D}{C_L} \tan \delta\right] \quad (115)$$

Uit de berekening, die uitgeschreven staat in Bijlage Q, blijkt dat de theoretische vermogenscoëfficiënt van de windmolen gelijk is aan $C_P = 0.519$.

4.8.2 Simulatiemodel

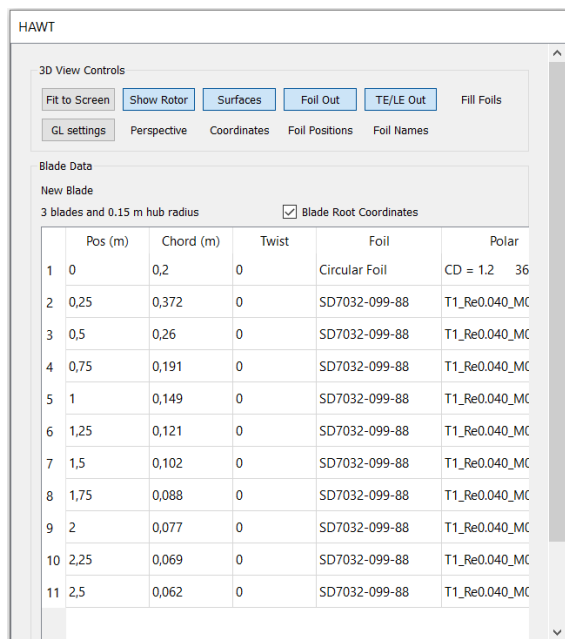
Aan de hand van de gekende randvoorwaarden is er nu een theoretisch model opgesteld. Dit theoretisch model kent echter enkele beperkingen. Dit model is zo opgesteld dat het optimaal werkt bij de gemiddelde windsnelheid. Hierdoor is er echter nog geen directe informatie beschikbaar over de werking van de windmolen bij andere windsnelheden. Om te bepalen hoe de windmolen zich gedraagt bij andere windsnelheden, zou er een nieuwe berekening moeten gemaakt worden bij iedere windsnelheid. Bij het bepalen van het nominale toerental van de rotor is er gewerkt met het nominale toerental van de generator. Er is echter geen zekerheid of de rotor bij de gemiddelde windsnelheid even snel gaat draaien als het nominale toerental van de generator. Daarnaast is het model enkel gebaseerd op het aerodynamisch optimum, en wordt er dus niet gekeken naar eventuele aanpassingen die nodig zijn voor de praktische uitwerking (zoals de afname van de koorde bij de oorsprong van de wiek, om de wiek te kunnen bevestigen aan de naaf). Om een beter zicht te krijgen op de werking van de windmolen, bij verschillende randvoorwaarden, is het nodig om een simulatiemodel van de windmolen op te stellen. Hiervoor wordt er een model opgesteld in het softwarepakket QBlade. Dit is een opensourcepakket ontwikkeld door een onderzoeksinstituut van de TU Berlijn, gemaakt voor het ontwerpen en simuleren van windmolenwieken [124].

Er wordt begonnen met het inladen van het gekozen vleugelprofiel, zoals weergegeven in Figuur 49. Hierna is het mogelijk om de drukverdeling rond een wiek te bekijken, bij verschillende invalshoeken en Reynoldsgetallen. In Figuur 51 is de drukverdeling weergegeven bij het gemiddelde Reynoldsgetal en de gekozen invalshoek, zoals bepaald in '4.8.1 Theoretisch model'.



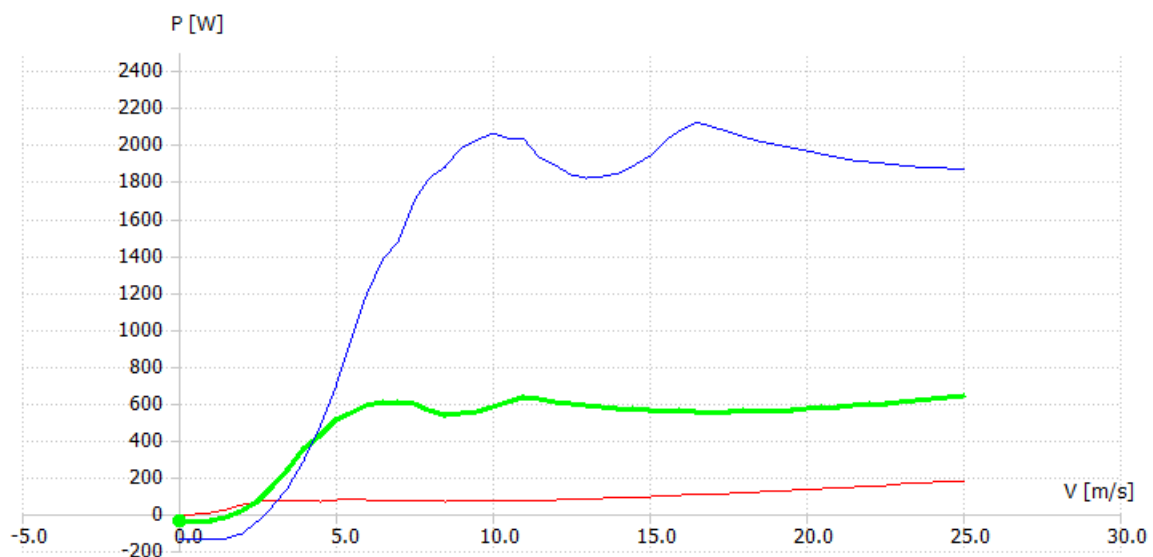
FIGUUR 51: DRUKVERDELING ROND EEN WIEK IN QBLADE

Hierna wordt er een polair (360°) model opgesteld van de wiek, en wordt de lengte van de koorde op de elf beschouwde punten ingegeven, zoals weergegeven in Tabel 11. Een eerste aanpassing t.o.v. het theoretisch model is dat de lengte van de koorde op het eerste beschouwde punt kleiner is, om de wiek te kunnen bevestigen, zoals zichtbaar in Figuur 52. Bij het model in QBlade is er voor het eerste interval een cirkelvormig vleugelprofiel gekozen.



FIGUUR 52: HET MODEL VAN DE WIEKEN IN QBLADE

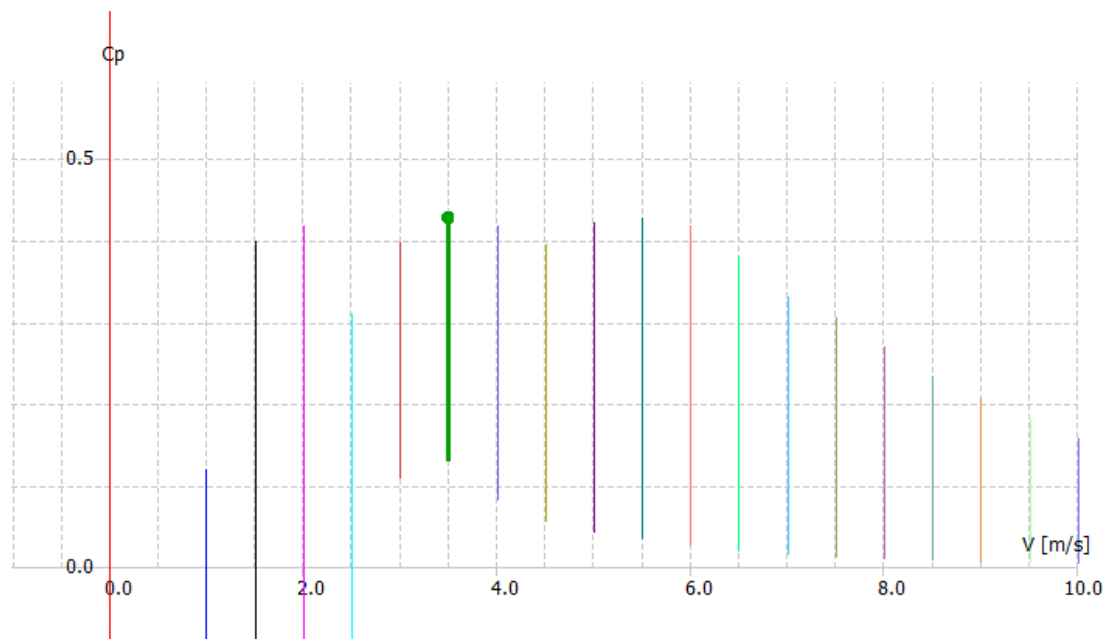
Nu het model van de rotor opgesteld is, kan er begonnen worden met de simulatie. Zowel een BEM- als een multiparameter-BEM-simulatie zijn mogelijk. Met behulp van de multiparameter-BEM-simulatie wordt het mechanische asvermogen van de windmolen weergegeven in functie van de windsnelheid. Hierbij wordt de figuur geplot over het volledige werkbereik van de windmolen, tot de maximale gebruikswindsnelheid (van 0 m/s tot 25 m/s). De plot wordt uitgevoerd bij drie verschillende rotorsnelheden, zoals weergegeven in Figuur 53.



FIGUUR 53: HET MECHANISCH VERMAGEN VAN DE WINDMOLEN IN FUNCTIE VAN DE WINDSNELHEID BIJ 50 RPM (ROOD), 100 RPM (GROEN) EN 150 RPM (BLAUW)

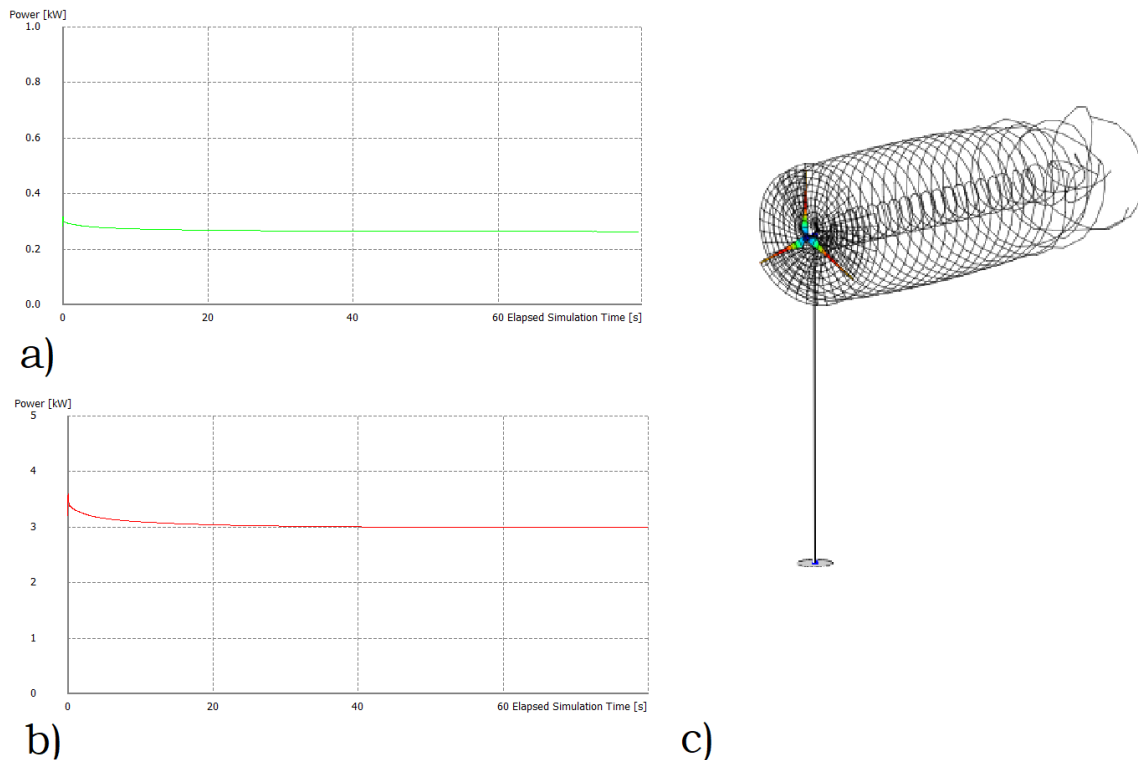
Daarnaast kan de vermogenscoëfficiënt berekend worden in functie van de windsnelheid. De vermogenscoëfficiënt hangt af van het toerental van de rotor. Bij deze plot is er eveneens gekozen voor drie rotorsnelheden: 50 RPM, 100 RPM en 150 RPM. De stip vanboven op de groene verticale lijn in Figuur 54 is de vermogenscoëfficiënt net onder de gemiddelde windsnelheid (3.50 m/s), bij een rotatiesnelheid van 100 RPM. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er een goede overeenkomst is tussen het ontwerp van de wieken en de generator,

vermits bij de gemiddelde windsnelheid, de hoogste vermogenscoëfficiënt voorkomt bij het nominale toerental van de generator (100 RPM).



FIGUUR 54: HET INTERVAL VAN DE VERMOGENSCOËFFICIËNT IN FUNCTIE VAN DE WINDSNELHEID.

Het theoretisch model van de windmolen, zoals uitgewerkt in '4.8.1 Theoretisch model', is volledig gebaseerd op de Blade Element Momentum (BEM) theorie. Deze theorie kent echter zijn beperkingen, vermits het macroscopisch gedrag van de stromingsfysica, grotendeels gebaseerd is op microscopische, empirische, modellen. In QBlade is er een mogelijkheid om m.b.v. een *non-linear lifting line* algoritme een simulatie uit te voeren, gebaseerd op een vortexmethode. Dit is een nauwkeurigere methode dan BEM [125]. Hierdoor kan het effect van een vortex die geïnduceerd is door de rotatie van de rotor, op verschillende parameters, zoals het vermogen, bekeken worden. In Figuur 55 is het effect van vortices zichtbaar op het verloop van het vermogen van de windmolen bij twee verschillende windsnelheden. De groene curve geeft het verloop van het vermogen weer bij de gemiddelde windsnelheid (3.56 m/s), de rode curve geeft het verloop van het vermogen weer bij een windsnelheid van 8 m/s. Indien deze curves met elkaar vergeleken worden is te zien dat vortices een grotere impact hebben bij hogere windsnelheden.

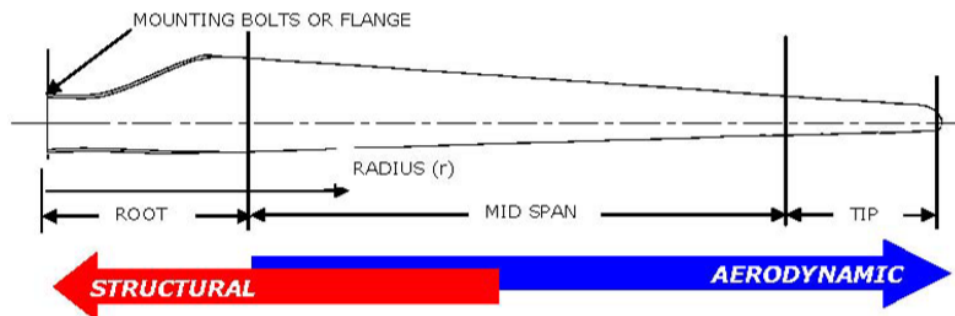


FIGUUR 55: HET VERLOOP VAN HET VERMOGEN BIJ EEN WINDSNELHEID VAN (A) 3.56 M/S, (B) 8 M/S. (C) HET EFFECT VAN VORTICES IS ZICHTBAAR ACHTER DE ROTOR

4.8.3 Praktisch model

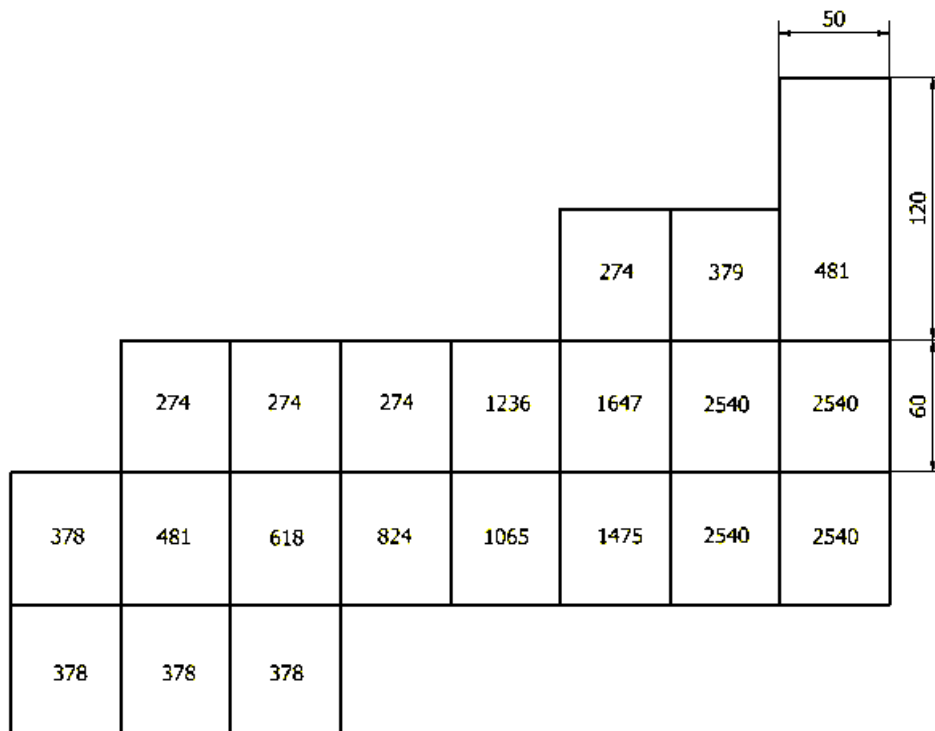
In het theoretische model is er enkel rekening gehouden met het aerodynamisch optimum. Als een wiek geconstrueerd wordt moet er echter ook rekening gehouden worden met de sterkte, beschikbare materialen en de aanwezige bewerkingsmogelijkheden. In dit subhoofdstuk wordt een praktisch realiseerbaar model van de wiek ontworpen.

Zoals weergegeven in Figuur 56 kan een wiek opgedeeld worden in drie regio's: de oorsprong (*root*), het middendeel (*mid span*) en het uiteinde (*tip*). De oorsprong is belangrijk voor het structurele, dit deel moet alle krachten die inwerken op de wiek overbrengen naar de bevestiging. Hoe verder van de oorsprong, hoe belangrijker het aerodynamische aspect. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het vooral op het einde van de wiek belangrijk is om het theoretisch model te volgen. Aan de oorsprong van de wiek wordt de koorde kleiner genomen dan berekend in het theoretisch optimum. Dit moet gebeuren zodat de naaf, om de wieken aan te kunnen bevestigen, niet onnodig groot moet gekozen worden.



FIGUUR 56: DE DRIE REGIO'S VAN EEN WIEK [118].

De wieken worden gemaakt uit houten balken die aan elkaar gelijmd worden, gebaseerd op het ontwerp van James Biggar. Vermits er enkel oppervlakken evenwijdig met elkaar in de lengterichting aan elkaar gelijmd worden, en de grootste spanningen in de wiek buigspanningen in de lengterichting zijn, heeft het lijmen geen invloed op de sterkte van de wiek. Als de balken aan elkaar gelijmd zijn, wordt de juiste, aerodynamische, vorm in de wieken geschaafd. Dit heeft als voordeel dat de wieken minder mechanische vervormingen vertonen d.m.v. uitzettingen [126]. Ook is dit model eenvoudiger in de juiste vorm te krijgen, vermits de basismaten al aanwezig zijn als de blokken gelijmd zijn. In Figuur 57 wordt het zijaanzicht van de aan elkaar gelijmden balken gegeven.



FIGUUR 57: DE AFMETINGEN (IN MM) VAN DE BALKEN VOOR DE CONSTRUCTIE VAN EEN WIEK

Voor het fabriceren van de wieken zijn er verschillende houtsoorten beschikbaar:

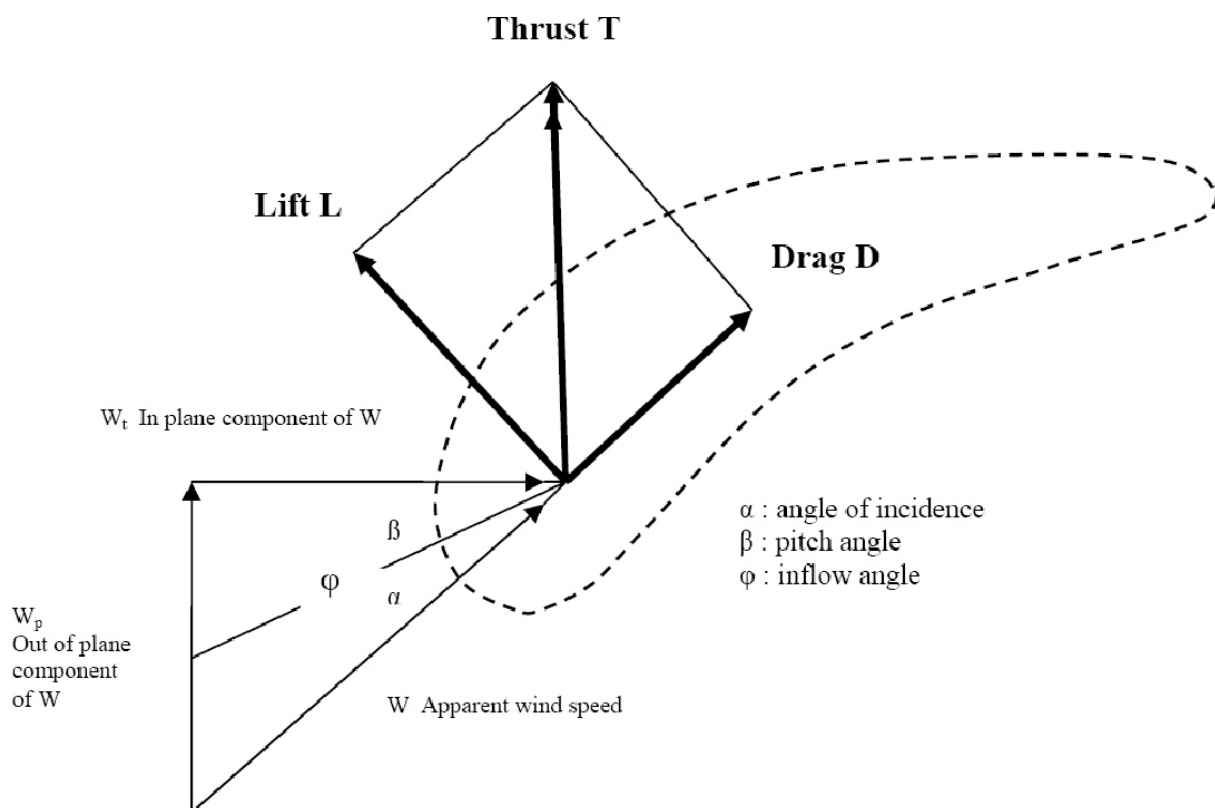
- Bois rouge,
- Frake,
- Dibefou,
- Vene,
- Linke,
- Dimb,
- Sapin,

Voor de wieken wordt er gekozen om gebruik te maken van het bois rouge, door zijn hoge treksterkte en goede verlijmbaarheid (vermits er weinig olie in deze houtsoort zit) [127]. Om te bepalen of dit type hout geschikt is voor het maken van de wiek, wordt de spanning in het hout berekend bij maximale belasting. Vermits er verschillende types bois rouge zijn, en niet geweten is welk type er beschikbaar is in Senegal, wordt er gekeken wat de laagst toelaatbare spanningen zijn bij de verschillende types. Als laagst toelaatbare schuifspanning wordt $\tau = 15.7$ MPa genomen, als laagst toelaatbare normaalspanning wordt $\sigma = 59.0$ MPa genomen [128].

Op een windmolenwiek werken verschillende krachten in: aerodynamische, gravitationele, centrifugale, gyroscopische en operationele. De gravitationele en centrifugale krachten zijn evenredig met de massa van de wijk. Vermits de massa van een wijk kwadratisch stijgt met de rotorlengte, zijn deze krachten te verwaarlozen bij een windmolen met rotordiameter onder de 10 m [118]. Gyroscopische krachten zijn krachten die optreden bij het kruien (draaien) van de rotor. Vermits het kruien gebeurt door een windvaan, zie '4.9 Windvaan', kunnen hier geen systeemp parameters worden bepaald. De operationele krachten zijn krachten die optreden d.m.v. operationele uitvoeringen, zoals het remmen van de windmolen. Vermits deze afhangen van de instellingen van de gebruikte controller en de opbouw van de generator, kunnen deze niet op voorhand bepaald worden. Deze laatste twee krachten kunnen niet exact bepaald worden, daarom wordt er enkel gerekend met de aerodynamische krachten. Volgens Crossley kunnen wieken die de aerodynamische, gravitationele en centrifugale krachten kunnen opvangen ook meestal de gyroscopische en operationele krachten opvangen [118]. De aanpak van te rekenen zonder gyroscopische en operationele krachten, is dus gerechtvaardigd.

Bij hoge windsnelheden wordt de rotor geremd door de controller. Indien dit systeem zou falen blijft de rotor draaien. De belasting voor de wieken is echter het grootste bij het dynamische geval. Dit is intuïtief eenvoudig te begrijpen, vermits de (relatieve) snelheid van de wind over de wieken veel groter is bij bewegende wieken, dan als de rotor geblokkeerd is. Deze redenering is echter enkel geldig als de coëfficiënten in de weerstandsformule bij beide gevallen van dezelfde grootteorde zijn. Indien de coëfficiënten uit '4.1.2 Windkracht op de rotor' en '4.8.1 Theoretisch model' vergeleken worden blijkt dit zo te zijn. De kracht op de wijk wordt dus berekend bij de hoogste gebruikswindsnelheid (25 m/s).

De kracht, uitgeoefend door de wind, die inwerkt op een windmolenwiek kan opgesplitst worden in twee vectoren, de liftkracht en de *drag*- of weerstandskracht, zoals weergegeven in Figuur 58. Vermits deze kracht op ieder punt van de wijk verschillend is, wordt de wijk opnieuw opgedeeld in tien gelijke delen. Hieronder wordt de redenering opgebouwd. De volledige berekening is weergegeven in Bijlage R.



FIGUUR 58: DE INWERKENDE KRACHTEN OP EEN WINDMOLENWIEK [129]

Deze twee krachten kunnen berekend worden met volgende formules [24]:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L A \rho V^2 \quad (116)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho V^2 \quad (117)$$

met:

- F_L [N]: de liftkracht,
- F_D [N]: de dragkracht,
- C_L : de liftcoëfficiënt,
- C_D : de dragcoëfficiënt,
- A [m²]: de oppervlakte van de wijk,
- ρ [kg/m³]: de massadichtheid van het fluïdum,
- V [m/s]: de relatieve windsnelheid van de wijk ten opzichte van de invallende wind.

De totale inwerkende aerodynamische kracht op de wijk (de *Thrust* in Figuur 24) kan berekend worden door het vectorieel optellen van de liftkracht en weerstandskracht. Om exact te zijn moet er ook rekening gehouden worden met de afname van de relatieve snelheid door de axiale en tangentiële inductiefactor. Vermits deze waarden niet exact gekend zijn bij hoge windsnelheden, en om de berekening overzichtelijk te houden, wordt ervoor gekozen om hier geen rekening mee te houden, en dus een kleine overschatting te maken van de inwerkende krachten.

Eerst wordt bepaald wat de hoeksnelheid is bij maximale windsnelheid (25 m/s). Voor deze berekening wordt aangenomen dat de tip-speed ratio (TSR) bij hoge windsnelheden gelijk blijft aan de optimale TSR (TSR = 7.353), zoals berekend in '4.8.1 Theoretisch model'. Hiermee kan de hoeksnelheid van de rotor bepaald worden:

$$\Omega = \frac{\lambda * U_1}{R} = \frac{7.353 * 25 \text{ m/s}}{2.50 \text{ m}} = 73.53 \text{ rad/s} \quad (118)$$

Dankzij deze aanname is ook de lokale TSR op de verschillende punten van de wijk gelijk aan de lokale TSR bij het optimale geval. Aan de hand van de hoeksnelheid kan het toerental berekend worden:

$$f = \frac{\Omega * 60 \frac{s}{min}}{2\pi} = \frac{73.53 \text{ rad/s} * 60 \frac{s}{min}}{2\pi} = 702 \text{ RPM} \quad (119)$$

Volgens de producent van de gekozen generator is het toerental bij het maximale vermogen gelijk aan 850 RPM, zoals zal vermeld worden in '5.2 Generator'. Dit is dus een realistische waarde. Nu de hoeksnelheid bepaald is, kan de relatieve windsnelheid op elk deel van de wijk worden uitgerekend:

$$V = \sqrt{v_1^2 + v_t^2} = \sqrt{v_1^2 + (\omega * r)^2} \quad (120)$$

met:

- V [m/s]: de relatieve windsnelheid van de wijk ten opzichte van de invallende wind,
- v_1 [m/s]: de windsnelheid invallend op de wijk,
- v_t [m/s]: de tangentiële windsnelheid,
- ω [rad/s]: de hoeksnelheid van de wijk,
- r [m]: de afstand van de hub tot het beschouwde punt.

Nu alle parameters gekend zijn, worden de lift- en weerstandskracht bepaald:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L A \rho V^2 \quad (121)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho V^2 \quad (122)$$

Als maximale liftcoëfficiënt wordt $C_L = 1.40$ genomen, zoals af te lezen valt uit Figuur 50. Bij deze liftcoëfficiënt is de weerstandcoëfficiënt gelijk aan $C_D = 0.05$. Deze twee krachten kunnen vectorieel opgeteld worden, zoals weergegeven in Figuur 58:

$$F_{\text{totaal}} = \sqrt{F_L^2 + F_D^2} \quad (123)$$

Hiermee is er de kracht op elk interval gekend. Hierna wordt de kracht gesommeerd volgens het krachtenevenwicht. Nu de krachten gekend zijn kan het moment berekend worden op ieder punt:

$$M = F_{\text{totaal}} * r \quad (124)$$

Om de spanningen in de wijk te berekenen, moet de dikte van de wijk gekend zijn. Deze parameter wordt benaderd door een dikte van 18 cm te nemen aan de oorsprong, en bij elk interval 1.5 cm te verkleinen. Zo is er op de tip een dikte van 3cm. Nu de geometrische parameters bepaald zijn, kan het buigtraagheidsmoment op ieder punt berekend worden. Deze is bij een balkvormige doorsnede gelijk aan [81]:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (125)$$

De wijk wordt op twee soorten spanningen belast: buigspanning en afschuifspanning. Deze spanning treden echter niet gelijktijdig op. De buigspanning is maximaal op het punt dat het verste verwijderd is van de neutrale lijn. De afschuifspanning daarentegen is maximaal op de neutrale lijn. Er wordt dus voor beide gevallen apart gekeken of de wijk de spanning kan weerstaan.

Buiging:

De formule voor buiging is [81]:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (126)$$

met:

- σ [Pa]: de normaalspanning,
- M [Nm]: het resulterende inwendige moment,
- y [m]: de loodrechte afstand van de neutrale lijn tot het punt waar de buigspanning bepaald wordt.

Uit de berekening blijkt dat de maximaal optredende buigspanning $\sigma = 59.5$ MPa is

Afschuiving:

Bij een balkvormige doorsnede kan de maximale afschuifspanning (ter hoogte van de neutrale lijn) berekend worden m.b.v. [81]:

$$\tau_{s,max} = 1.5 * \frac{V}{A} \quad (127)$$

met:

- τ [Pa]: de schuifspanning,
- V [N]: de inwendige dwarskracht,
- A [m²]: de oppervlakte van de doorsnede.

Uit de berekening blijkt dat de maximaal optredende afschuifspanning $\tau = 0.288$ MPa bedraagt.

Zoals vermeld in de inleiding van dit subhoofdstuk, is de maximaal aanvaarde buigspanning bij bois rouge $\sigma = 59.0$ MPa, en de maximaal aanvaarde schuifspanning $\tau = 15.7$ MPa. Hieruit blijkt dat de berekende waarde bij buiging 0.8 % groter is, en bij afschuiving veel kleiner is, dan de aanvaarde waarde. Toch wordt er gekozen om deze houtsoort te behouden. Deze keuze is verantwoord vermits er verschillende overschattingen gemaakt zijn. Zo is er gerekend met de maximaal mogelijke weerstandscoefficienten die bij dit type vleugelprofiel voorkomen, terwijl deze enkel optreden bij een invalshoek van 11° (er wordt gestreefd naar een invalshoek van 9°). Daarnaast worden de inwerkende spanningen berekend alsof beide krachten volgens de zwakke as optreden, terwijl in werkelijkheid de weerstandskracht 90° gedraaid is ten opzichte van de liftkracht, zoals weergegeven in Figuur 58. Ook wordt er geen rekening gehouden met de afname van de windsnelheid door de inductiefactoren, waardoor er een overschatting van de relatieve windsnelheid wordt gemaakt. Als laatste werd er in deze berekening van uit gegaan dat de rotor bij 25m/s op zijn maximale snelheid draait, terwijl deze in de realiteit zou geremd worden door de controller. In Figuur 59 worden de drie wieken weergegeven, voordat ze geschaafd zijn.



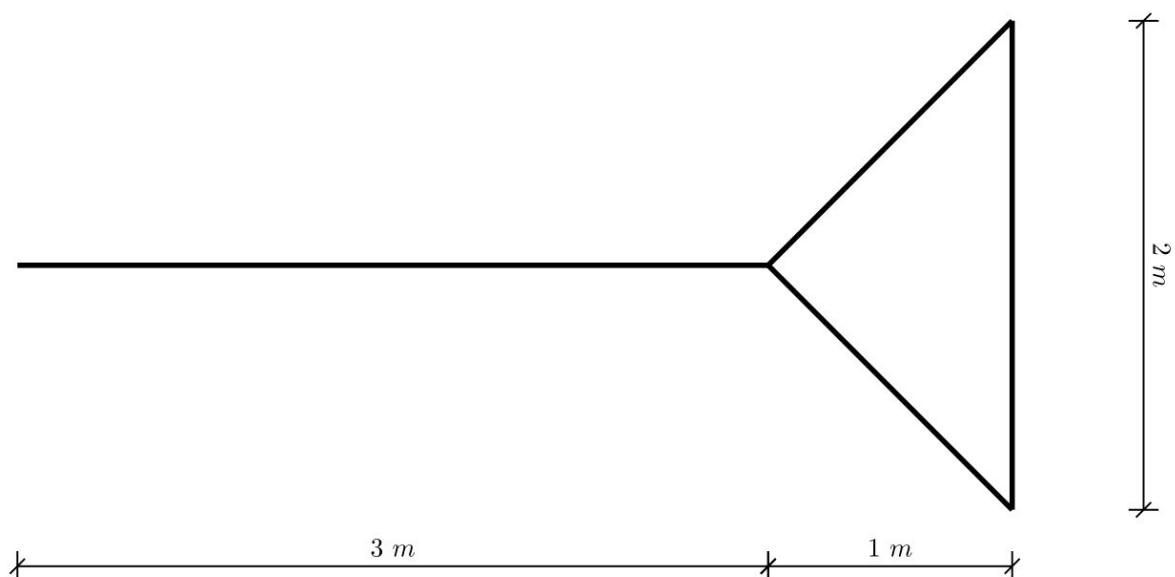
FIGUUR 59: DE DRIE WIEKEN, VOOR HET SCHAVEN

4.9 Windvaan

De opbrengst van de windmolen is het hoogste wanneer het rotatievlak van de wieken loodrecht op de windrichting staat. Vermits de wind constant van richting verandert moet de rotor meedraaien. Hiervoor kan een actief kruisysteem gebruikt worden. Dit is een systeem waarbij de windrichting continu gemeten wordt en de rotor d.m.v. een aangedreven as in de juiste richting gedraaid wordt [24].

Een andere mogelijkheid, die vaak gebruikt wordt bij kleinere windmolens, is het gebruiken van een passief kruisysteem zoals een windvaan. Een windvaan is een uitsteking achter de rotor die zorgt dat de rotor in de richting van de wind draait. Het voordeel van een windvaan is dat er geen elektromotor, elektronica of tandwielkast moet gebruikt worden. Er zijn verschillende vormen mogelijk voor de windvaan, zoals driehoekig, trapeziumvormig en rechthoekig. Uit onderzoek van Raikar en Kale blijkt dat bij een driehoekige windvaan de drukken en inwerkende krachten groter zijn, maar de efficiëntie ook hoger ligt [130]. Daarnaast blijkt dat het tweede-ordesysteem van de rotor die rond zijn eigen as oscilleert bij een veranderende windrichting, sneller gedempt wordt bij een driehoekvormige windvaan [131].

Een vuistregel is dat de oppervlakte van de windvaan minstens 5 % moet zijn van de oppervlakte die de wieken beschrijven [132]. Bij een rotordiameter van 5 m is dit minstens 1 m². De afstand van de rotor moet 120% van de straal van de wieken zijn [133]. Bij een straal van 2.5 m is dit minstens 3 m. In Figuur 60 wordt het ontwerp gegeven van de windvaan. Deze wordt vervaardigd uit een aluminiumplaat van 2 mm dik, met afgeschuinde hoeken. De windvaan wordt ondersteund door een ronde holle aluminium buis met buitendiameter van 5 cm en binnendiameter van 4 cm.



FIGUUR 60: ONTWERP VAN DE WINDVAAN

4.10 Conclusie mechanisch ontwerp

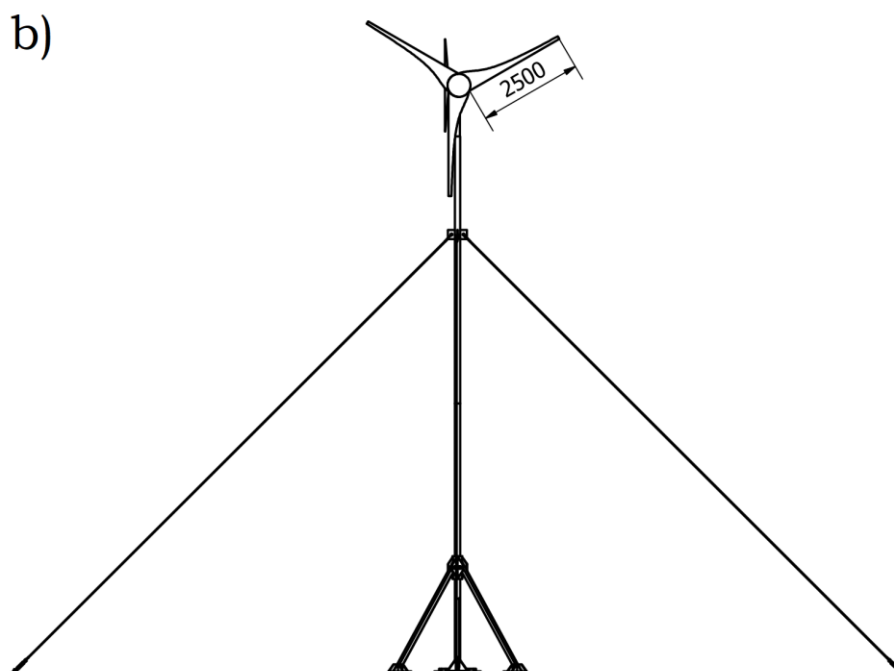
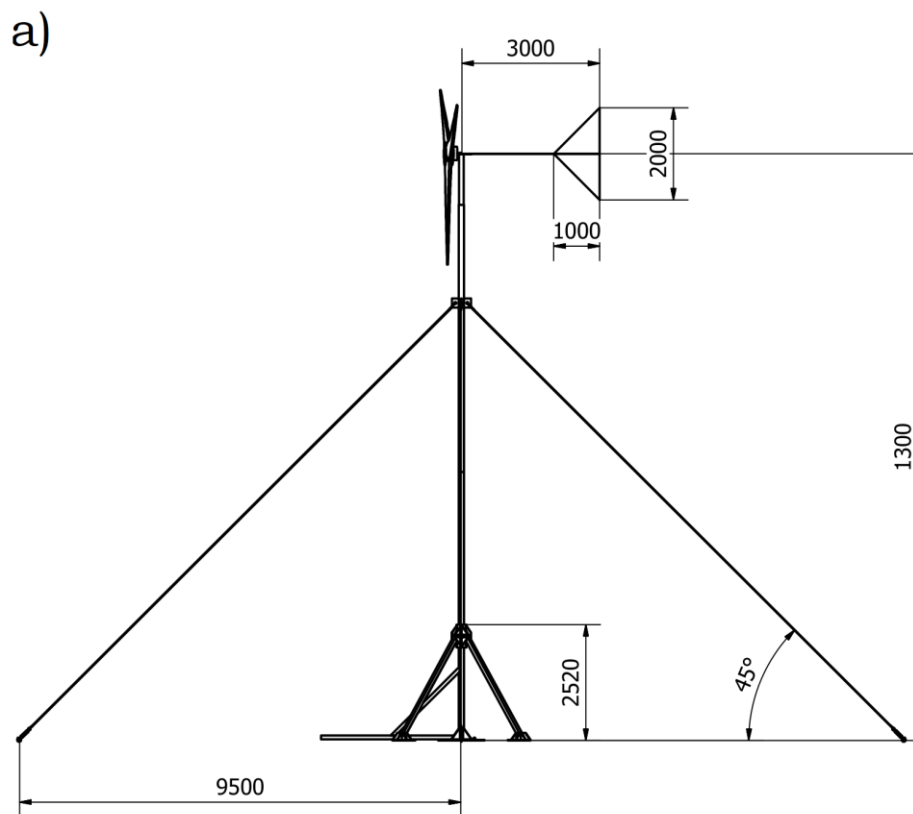
In het hoofdstuk '4 Mechanisch ontwerp van de windmolen' zijn alle onderdelen van de windmolen besproken en gedimensioneerd. Vermits een groot deel van deze informatie ook in andere hoofdstukken wordt gebruikt, wordt er in dit subhoofdstuk een conclusie en een samenvatting gegeven van het mechanisch ontwerp van de windmolen. Op die manier is alle informatie over het mechanisch ontwerp overzichtelijk gebundeld. In Tabel 12 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste mechanische parameters van de windmolen.

In '1.3 Doelstellingen' is vermeld dat er getracht wordt zoveel mogelijk gebruik te maken van lokale materialen. Voor het mechanische deel kan alles opgebouwd worden m.b.v. materialen die in Senegal te verkrijgen zijn. Ook is het gelukt om het mechanisch ontwerp te maken, zodat er aan de energievraag kan voldaan worden.

TABEL 12: BELANGRIJKSTE MECHANISCHE PARAMETERS WINDMOLEN

Eigenschap	Waarde
Grondoppervlak fundering (m)	3.00 m * 3.00 m
Diepte fundering (m)	1.35 m
Buitendiameter toren (m)	0.114 m
Hoogte windmolen (m)	13.00 m
Maximum hoogte schuine balken (m)	2.520 m
Bevestigingshoek schuine balken (°)	52.5 °
Bevestigingshoogte kabels (m)	9.50 m
Bevestigingshoek kabels (°)	45 °
Lengte wiek (m)	2.50 m
Gemiddelde praktische breedte wiek	0.14 m
Max. Theoretische vermogenscoëfficiënt	0.519
Max. Praktische vermogenscoëfficiënt	0.430
Oppervlakte windvaan (m²)	1.00 m ²
Lengte bevestiging windvaan (m)	3.00 m

In Figuur 61 worden de belangrijkste parameters weergegeven op een tekening van de windmolen.



FIGUUR 61: BELANGRIJKSTE PARAMETERS VAN DE WINDMOLEN IN (A) ZIJAAZICHT EN (B) VOORAANZICHT

5 Elektrisch ontwerp van de windmolen

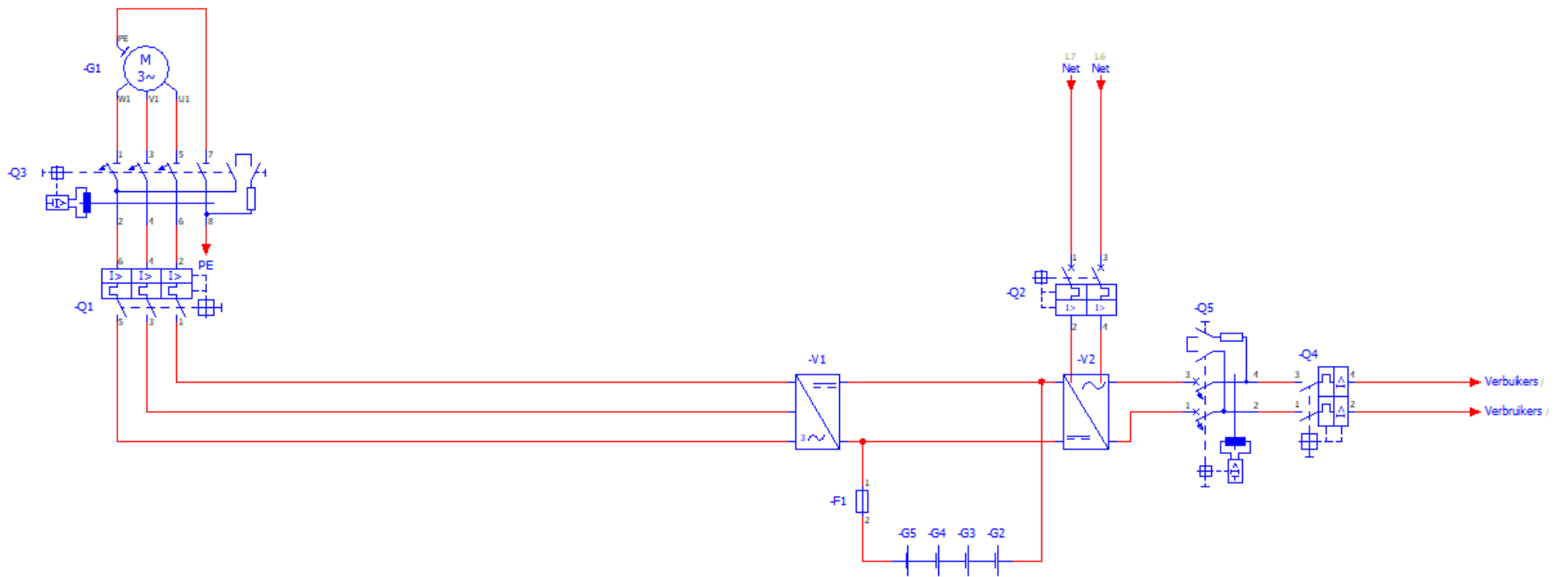
In dit hoofdstuk wordt het ontwerp van de elektrische installatie besproken. Eerst wordt er een overzicht gegeven van de opbouw van de installatie, waarna er dieper wordt ingegaan op de individuele componenten.

5.1 Overzicht van de elektrische installatie

De mechanische energie van de rotor wordt omgevormd in elektrische energie met behulp van een generator. Deze elektrische energie wordt dan opgeslagen in batterijen. Doordat de spanning en de frequentie van de generator afhankelijk zijn van de windsnelheid, moet deze omgezet worden naar gelijkstroom alvorens deze nuttig te gebruiken is. Hiervoor wordt een controller gebruikt. Het elektrisch signaal aan de uitgangszijde van de controller, waarmee de batterijen worden opgeladen, is gelijkstroom. Er is dus nog een inverter nodig om de energie bruikbaar te maken voor de elektrische verbruikers. De elektrische installatie bevat volgende componenten:

- generator,
- controller,
- inverter,
- batterijen,
- kabels,
- beveiligingen.

Deze componenten worden aangesloten zoals weergegeven in Figuur 62, de elektrische tekeningen zijn ook terug te vinden in Bijlage S.



FIGUUR 62: ELEKTRISCH SCHEMA

5.2 Generator

Zoals besproken in de literatuurstudie zijn er verschillende types generator mogelijk in een windmolen. De meeste types hebben een nominale rotatiesnelheid van 1500 RPM of meer [134]. Deze rotatiesnelheid is echter niet te behalen bij de windmolen (omdat de tip speed ratio dan te hoog zou zijn, zoals uitgelegd werd in '4.8 Wieken'). Om bij gemiddelde windsnelheid het toerental van de as van de generator in de buurt van het nominale toerental van de generator te laten komen, om voldoende vermogen op te wekken, zijn er twee mogelijkheden. Ten eerste kan er een overbrenging in de vorm van een tandwielkast geplaatst worden, zodat de rotatiesnelheid van de as van de generator een factor groter kan zijn dan de rotatiesnelheid van de wieken. Ten tweede kan er een generator gekozen worden met een lager nominaal toerental. Het gebruiken van een tandwielkast zorgt voor extra verliezen, extra componenten die kapot kunnen gaan, en een hogere massa van de rotor. Daarom wordt er gekozen voor een generator met een nominaal toerental dat laag genoeg is.

Een type generator dat kan werken op een laag toerental is een synchrone axiale flux generator met permanente magneten. Vermits de flux van deze generator volgens de axiale richting georiënteerd is, is het mogelijk om de generator met een groter aantal poolparen uit te voeren, waardoor er al een nuttig vermogen kan opgewekt worden bij een lage rotatiesnelheid [30]. Een ander voordeel van dit type generator is dat het rendement van generatoren met permanente magneten bij deellast hoger is dan bij generatoren met een externe veldbekrachtiging [62]. Daarnaast is de massa en het volume van een axiale flux generator kleiner dan bij een radiale flux generator met éénzelfde nominaal vermogen [135]. Dit komt doordat de machine een hoger koppel produceert, omdat de magnetische interacties gemiddeld gezien verder van de as van de machine plaatsvinden, dan bij een radiale flux machine [136].

Er wordt gekozen voor een WindPMG 1000 generator, van constructeur WindPMG, zoals weergegeven in Figuur 63. Dit is een axiale flux generator met permanente magneten en een externe rotor. Het voordeel van een externe rotor is dat er een groot oppervlak is om de wieken aan te bevestigen. WindPMG produceert vier verschillende modellen van dit type generator, met als nominale spanningen: 12 V, 24 V, 48 V en 110 V [86]. Indien de nominale spanning van het gekozen model te laag is, zijn de jouleverliezen te groot. Voor de keuze van de nominale spanning van de generator moet er echter ook gekeken worden naar de rest van de elektrische installatie: de controller moet kunnen werken met deze spanning. Afhankelijk van de interne werking van de controller moeten de batterijen en inverter ook kunnen werken op dit spanningsniveau.



FIGUUR 63: DE WINDPMG 1000 GENERATOR [86]

Er wordt gekozen voor de WindPMG 1000, met als nominale spanning 48 V. Dit heeft meerdere voordelen: zo kan er gewerkt worden met de MPPT 3kW controller van WindPMG van 48 V (deze kost €200 minder dan de modellen die op hogere spanning werken). Vermits de uitgangsspanning van de controller hetzelfde is als de ingangsspanning kan er gewerkt worden met een spanning van 48 V voor de batterijen, en als ingangsspanning voor de inverter. Deze spanning is eenvoudiger te bereiken door het serieel aansluiten van batterijen, dan een hogere spanning. Alsook is deze spanning een meer voorkomende spanning als ingangsspanning voor invertoren, zoals besproken gaat worden in '5.5 Inverter'.

In Tabel 13 wordt er een overzicht gegeven van de eigenschappen van de WindPMG 1000 generator.

TABEL 13: EIGENSCHAPPEN VAN DE WINDPMG 1000 GENERATOR VAN 48V [86]

Eenheid	Waarde
Materiaal	Aluminiumlegering 6061
Grootste diameter (mm)	290 mm
Asdiameter (mm)	30 mm
Massa (kg)	12 kg
Spanningsvorm	Driefasige wisselspanning
Nominale spanning (V)	48 V
Nominaal toerental (RPM)	100 RPM
Maximum spanning (V)	468V
Toerental bij maximum spanning (RPM)	850 RPM
Maximum vermogen (W)	5000 W
Startkoppel (Nm)	<0.1 Nm
Type rotor	Externe rotor
Draaiveld	Synchroon
Fluxoriëntatie	Axiaal
Magnetisch veld	Permanente magneten
Levensduur (j)	20 jaar
Minimale werkingstemperatuur (°C)	-45 °C
Maximale werkingstemperatuur (°C)	70 °C

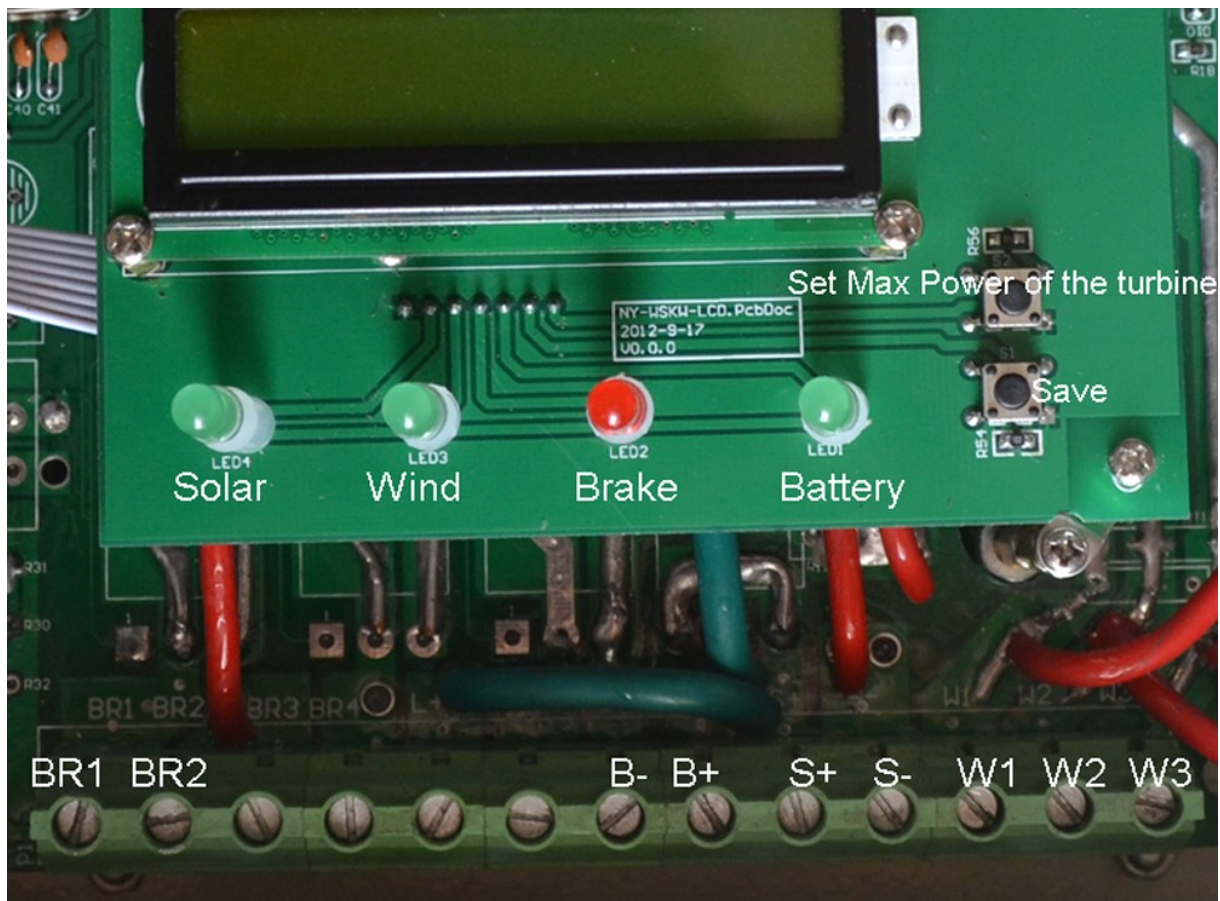
5.3 Controller

Vermits er gekozen is voor een windturbine met variabele snelheid, door de hogere efficiëntie en wegens de eenvoud van de controlealgoritmes, varieert zowel de spanning als de frequentie, afhankelijk van de windsnelheid [137]. Zoals besproken in de literatuurstudie zijn er twee mogelijkheden om de wisselspanning van de generator, die varieert in spanning en frequentie, om te zetten naar gelijkspanning: een MPPT-controller of gelijkrichterbrug met laadregelaar, die werkt volgens pulsbreedtemodulatie (PBM). Uit een onderzoek van Syahputra en Soesanti met een generator van 3 kW blijkt dat de gemiddelde verhoging van het rendement 50.77% bedraagt bij het gebruik van een controller i.p.v. een gelijkrichterbrug [31]. Het nadeel van MPPT-controllers is dat ze een hogere prijs hebben dan laadregelaars. Deze kunnen tot twee keer zo duur zijn [138]. Vermits de keuze tussen een gelijkrichterbrug en een controller een groot verschil maakt in het rendement, en de bouw van de windmolen veel duurder is dan de investering in de controller of gelijkrichterbrug, zoals weergegeven zal worden in '6.1 Kosten', is een grotere investering in de elektrische installatie gerechtvaardigd bij de keuze voor een controller. Er wordt gekozen voor een MPPT 3 kW wind solar controller van WindPMG. Van deze controller zijn er, zoals bij de generatoren van WindPMG, verschillende modellen, die werken op verschillende spanningsniveau's. Er zijn modellen met een nominale spanning van 12 V, 24 V, 48 V, 110 V en 220 V [139]. Zoals besproken bij de keuze van de generator wordt er gekozen voor het model met een nominale spanning van 48 V AC, zoals weergegeven in Figuur 64.



FIGUUR 64: WINDPMG 3 kW MPPT WIND SOLAR CONTROLLER [139]

Op de controller kan ingesteld worden wat de maximum laadspanning van de gebruikte batterijen is, alsook het maximaal vermogen van de generator. De controller kan de windmolen zowel automatisch, wanneer de generator overbelast wordt, als manueel, remmen. Op de controller is een scherm waar de belangrijkste parameters (spanning van de generator, spanning van de batterijen, laadstroom en laadvermogen) op kunnen afgelezen worden. Er is ook de mogelijkheid om maximum 1 kW aan te zonnepanelen aan te sluiten op de controller. Hierdoor kan de installatie in de toekomst uitgebreid worden met zonnepanelen, om een nog grotere bedrijfszekerheid te hebben. In Figuur 65 zijn de aansluitingen van de controller zichtbaar. In de handleiding in Bijlage T worden de verschillende aansluitingen, alsook de algemene werking, van de controller uitgelegd.



FIGUUR 65: AANSLUITMOGELIJKHEDEN OP DE WINDPMG 3 kW MPPT WIND SOLAR CONTROLLER [139]

Er wordt eveneens een dumpload van 3 kW geïnstalleerd. Dit is nodig om energie te kunnen dissiperen indien er meer energie wordt opgewekt, dan er wordt geleverd aan de batterijen en de verbruikers samen.

5.4 Batterijen

De elektrische energie die opgewekt wordt door de windmolen, wordt opgeslagen op batterijen. Zoals aangehaald in de literatuurstudie en in '3.3 Keuze van de energieopslagmethode' zijn er verschillende types batterijen, met elk hun specifieke kenmerken. Batterijen van het type Nikkel-Cadmium en Nikkel-Metaalhydride hebben een grote zelfontlading. De zelfontlading ligt voor beide types respectievelijk tussen 15 – 20 % en rond 30 % per maand [72]. Vermits er gestreefd wordt naar een zo hoog mogelijk rendement, is dit niet optimaal. Andere veelgebruikte types van batterijen zijn Lithium-ion en Loodzuurbatterijen. Lithium-ionbatterijen hebben een hogere energiedichtheid, levensduur, efficiëntie en temperatuurbereik dan Loodzuurbatterijen, ze zijn echter ook veel duurder (tot 10 keer duurder) per kilowattuur opslag [140]. De energiedichtheid is in deze toepassing echter niet belangrijk, vermits de batterijen in een gebouwtje staan, en deze niet moeten getransporteerd worden. Uit een economische analyse van de Universiteit van Thailand, waarbij Lithium-ionbatterijen gebruikt zijn die vijf keer duurder zijn dan Loodzuurbatterijen, blijkt dat voor een kleinschalige energie-installatie Loodzuurbatterijen een betere investering zijn [141]. Een voordeel van Loodzuurbatterijen is de grote beschikbaarheid, deze zijn in Senegal eenvoudiger te vinden dan Lithium-ionbatterijen.

Loodzuurbatterijen kunnen opgedeeld worden in geventileerde en ventielgeregelde batterijen. Bij geventileerde batterijen moet er om de 2 à 4 maanden water bijgevuld worden [142]. Dit heeft als nadeel dat de persoon die het onderhoud uitvoert in contact kan komen met een zeer

corrosief zwavelzuur ($\text{pH} < 2$) [47], [143]. Vermits veiligheid zeer belangrijk is wordt er gekozen voor *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) of ventielgeregelde loodzuurbatterijen. Een veelgebruikte vorm van ventielgeregelde loodzuurbatterijen zijn gelbatterijen.

In Tabel 14 wordt een overzicht gegeven van twee types batterijen die lokaal te vinden zijn. Beide batterijen zijn van het type gel.

TABEL 14: OVERZICHT VAN DE BESCHIKBARE BATTERIJEN

	Batterij 1	Batterij 2
Merk	Bo Yang	WHC Solar
Typenummer	6-GFM-200	WHC-24V240AH
Elektrische lading [Ah]	200 Ah	240 Ah
Capaciteit [Wh]	2400 Wh	5760 Wh
Nominale spanning [V]	12 V	24 V
Type	Gel	Gel
Prijs [CFA]	85 000 CFA	350 000 CFA
Prijs [€]	€129.58	€533.57

De controller heeft een uitgangsspanning van 48 V gelijkspanning. Aangezien de batterijen aan de outputzijde van de controller worden gekoppeld, moet de spanning over de batterijen ook 48 V bedragen. De twee batterijen in Tabel 14 hebben een verschillende nominale spanning. Om 48 V te halen moeten er 4 batterijen in serie geplaatst worden van het type 1, of 2 batterijen in serie van het type 2. In Tabel 15 wordt er een vergelijking gegeven tussen beide opstellingen.

TABEL 15: VERGELIJKING TUSSEN DE OPSTELLING MET BATTERIJEN VAN TYPE 1 EN TYPE 2

	Batterij 1	Batterij 2
Aantal	4	2
Totale capaciteit [Wh]	9 600 Wh	11 520 Wh
Totale kostprijs [CFA]	340 000 CFA	700 000 CFA
Totale kostprijs [€]	€518.33	€1067.14

Ondanks de hogere capaciteit van batterij 2 wordt er toch gekozen voor batterij 1, door de veel lagere (totale) kostprijs. In Figuur 66 wordt de gekozen batterij, Bo Yang 6FM-200, weergegeven. In Tabel 16 worden de eigenschappen weergegeven van deze batterij.



FIGUUR 66: BATTERIJ BO YANG 6-GFM-200

TABEL 16: EIGENSCHAPPEN VAN DE BO YANG 6-GFM-200

Omschrijving	Grootte
Gewicht	50 kg
Capaciteit	200 Ah
Nominale spanning	12 V
Laadspanning	14.5 -14.9 V (25°C)
Stand-by spanning	13.6-13.8 V (25°C)
Startstroom	<3.6 A

Door het plaatsen van 4 batterijen in serie wordt er een opslagcapaciteit van 9.60 kWh geïnstalleerd. Hiermee is de gewenste capaciteit van 12.48 kWh niet bereikt. Er zou dus een tweede reeks van 4 batterijen in parallel met de eerste reeks moeten worden geplaatst. Omwille van financiële redenen is dit niet haalbaar, dus wordt er momenteel maar 1 reeks geplaatst. Doordat zowel de windmolen als de inverter de batterijen oplaadt, zal dit enkel in de uitzonderlijke gevallen, zoals een onderhoud, een extreem hoog verbruik of een lange tijd zonder wind of netspanning, leiden tot het wegvallen van de spanning. De extra batterijen kunnen in de toekomst steeds worden bijgeplaatst.

5.5 Inverter

Aangezien de controller een outputspanning heeft van 48 V DC moet de inverter ook een ingangsspanning hebben van 48 V DC. De uitgangsspanning van de inverter moet 230 V AC zijn, om de elektrische gebruikers te kunnen voorzien van energie. Er wordt gekozen voor een inverter met een vermogen van 3 kW, vermits de controller eveneens een vermogen heeft van 3 kW. De gekozen inverter gebruikt voor dit project is de WHC solar 3048, deze wordt afgebeeld in Figuur 67.

**FIGUUR 67: INVERTOR WHC SOLAR 3048**

Deze inverter heeft 2 ingangen: een DC-ingang en een AC-ingang voor het elektriciteitsnet. Op deze manier kan er een automatische netkoppeling gebeuren, en moet er dus geen schakelaar worden omgezet indien de netspanning wegvalt of terug op komt. Dit heeft ook als voordeel dat de batterijen kunnen worden opgeladen m.b.v. het elektriciteitsnet. Dit is een interessante eigenschap voor dit project vermits de batterijen op deze manier zo snel mogelijk kunnen worden opgeladen, en er zo optimaal kan ingespeeld worden op stroompannes. Dit is vooral een voordeel wanneer er veel stroompannes zijn op korte tijd.

Het uitgangsvermogen van de inverter is 3000 W. In de doelstellingen is bepaald dat het totaal geïnstalleerd vermogen gelijk is aan 5135.5 W. Indien alle elektrische verbruikers aan de uitgangszijde van de inverter geïnstalleerd worden, om bij stroompannes door de batterijen gevoed te kunnen worden, geeft dit een maximale gelijktijdigheidsfactor van:

$$\text{gelijktijdigheid} = \frac{3000 \text{ W}}{5135.5 \text{ W}} * 100 \% = 58.4 \% \quad (128)$$

Dit is een voldoende hoge gelijktijdigheid. Zeker vermits bijvoorbeeld de pomp, oven en TV voornamelijk overdag gebruikt worden, en de lampen in de kippenstallen enkel 's nachts.

5.5.1 Instellingen inverter

Voor de correcte werking van de inverter is het natuurlijk belangrijk dat deze juist is ingesteld. De handleiding van de inverter is terug te vinden in Bijlage U. De inverter wordt ingesteld via het bedieningspaneel afgebeeld in Figuur 68, voor de instelling gebruikt men de bedieningsknoppen: Funct, Up en Down. Via de ON/OFF-knop kan de inverter aan en uit gezet worden. De werking, het type batterij en de laadstroom moeten ingesteld worden.



FIGUUR 68: BEDIENINGSPANEEL WHC-SOLAR 3048

5.5.1.1 Werking

De inverter heeft drie werkingmethoden: netprioriteit, energiebesparing en batterijprioriteit. De drie modes werken zoals vermeld in Tabel 17.

TABEL 17: WERKINGSMODES VAN DE WHC-SOLAR 3048

Mode	Werking
Netprioriteit	Als het toestel opgestart is, op netprioritaire modus, en het elektriciteitsnet normaal werkt, worden de verbruikers via een bypass rechtstreeks uit het net gevoed. Op hetzelfde moment worden de batterijen opgeladen. Indien het net een te hoge of te lage spanning heeft, te hard verstoord is, of andere abnormaliteiten vertoont, gaan de elektrische verbruikers via een interne module gevoed worden met een kwalitatieve spanningsvorm, die gegenereerd wordt m.b.v. de energie van de batterijen.
Energiebesparing	Als het toestel opgestart is, op energiebesparende modus, wordt automatisch het verbruik gemeten. Als het elektriciteitsverbruik hoger is dan 5% van het nominale vermogen, wordt er een wisselspanning gegenereerd, en worden de gebruikers gevoed. Indien er geen belasting (groter dan 5% van het nominale vermogen) wordt gedetecteerd, gaat het toestel automatisch over

	naar de detectiecyclus, waarbij het verbruik van de energie uit de batterijen minimaal is. Bij deze modus meet het toestel het verbruik om de 10 seconden, om op deze manier zo veel mogelijk energie te besparen.
Batterijprioriteit	Als het toestel voor de eerste keer wordt opgestart, in batterijprioriteitsmodus staat, en het elektriciteitsnet normaal werkt, werkt het toestel onder de modus netprioriteit, maar worden de batterijen niet opgeladen. Wanneer de batterijen via een extern laadtoestel (zoals een laadregelaar op zonne-energie) voldoende opgeladen zijn, gaat het toestel via een interne module automatisch overschakelen op de batterijen, om zo de gebruikers van een kwalitatieve spanning te voorzien.

Vermits het voor dit project cruciaal is om zo weinig mogelijk zonder elektriciteit te vallen, wordt de inverter aanvankelijk ingesteld op de modus netprioriteit. Eenmaal dat de windmolen volledig opgebouwd is, en er eventueel zonnepanelen geïnstalleerd zijn, zoals aangehaald werd in ‘5.3 Controller’, kan er via metingen gekeken worden of het mogelijk is om over te schakelen op batterijprioriteit. Via deze modus kan het mogelijk zijn om volledig onafhankelijk van het elektriciteitsnet te werken. Dit heeft als voordeel dat er sterk bespaard wordt op elektriciteitskosten, maar hierdoor daalt de bedrijfszekerheid. Dit is enkel te overwegen indien het totale, gemiddelde, opgewekte vermogen minimaal even hoog is als het totale, gemiddelde, verbruikte vermogen.

Werken op de energiebesparingsmodus is niet aan te raden voor dit project. Bij deze modus wordt er geen energie geleverd indien het verbruik onder de 5 % van het nominale vermogen (3 kW) ligt. Dit betekent dat het verbruik dus steeds boven de 150 W moet liggen om een spanning te hebben. Zoals opgesomd werd in ‘1.3.2 Projectparameters’ is het nominale vermogen van de essentiële verbruikers die overdag werken, dus van de diepvriezer en de koelkast, respectievelijk 87.5 en 75 W. Indien één van beide verbruikers een tijd een vermogen heeft dat iets lager is dan het nominaal vermogen, ligt het totale verbruik dus onder de 150 W, en valt de spanning weg.

5.5.1.2 Laadstroom

Op de inverter kan ingesteld worden hoe groot de maximale laadstroom is. De mogelijke instellingen worden weergegeven in Tabel 18.

TABEL 18: MOGELIJKE INSTELLINGEN VOOR DE LAADSTROOM VAN DE WHC-SOLAR 3048

Code	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Laadstroom [A]	0 A	5 A	10 A	15 A	20 A	25 A	30 A

Zoals vermeld zal worden in ‘5.6.5 Kabelberekening gelijkstroomkabel tussen batterijen’, is de maximale laadstroom van de batterijen niet gekend, maar is de maximale laadstroom van gelijkaardige batterijen 60 A. Voordat de windmolen geïnstalleerd is, en er dus enkel met de batterijen, inverter en het elektriciteitsnet gewerkt wordt, kan de laadstroom op de maximale waarde (30 A) staan. Eenmaal dat de windmolen volledig opgebouwd is, moet er ook gekeken worden naar de stroom die uit de controller komt, om de totale laadstroom te bepalen.

$$I_{max,laadstroom} = I_{max,controller} + I_{max,inverter} \quad (129)$$

De totale laadstroom, van de controller en de inverter samen, moet lager zijn dan de maximale laadstroom van de batterijen. Vermits het vermogen van de controller ook ingesteld kan worden, kan er experimenteel gekeken worden wat de beste instelling is, om toch een hoge bedrijfszekerheid te hebben, maar wel genoeg energie van de windmolen te kunnen benutten.

Een mogelijkheid zou zijn om de controller op 2 kW in te stellen en de laadstroom van de inverter op 15 A. Bij deze instellingen is de totale maximale laadstroom:

$$I_{max,laadstroom} = \frac{2000 \text{ W}}{48\text{V}} + 15 \text{ A} = 56.7 \text{ A} \quad (130)$$

Verschillende andere combinaties zijn echter ook mogelijk.

5.5.1.3 Type batterij

Vermits ieder type batterij een andere laadspanning heeft, is het belangrijk dat de inverter weet welk type batterij er geïnstalleerd is. Er zijn 8 mogelijke instellingen, deze worden weergegeven in Tabel 19.

TABEL 19: MOGELIJKE INSTELLINGEN TYPE BATTERIJ WHC-SOLAR 3048

Instelling	Type batterij	Spanning [V]
U0	Gel USA	13.7 V
U1	A.G.M. 1	13.4 V
U2	A.G.M. 2	13.7 V
U3	Sealed lead Acid	13.6 V
U4	Europese Gel	13.8 V
U5	Open lead Acid	13.8 V
U6	Calcium (open)	13.6 V
U7	Sulphation cycle 15.5 V voor 4 uur	

Aangezien de gebruikte batterijen een stand-by spanning hebben van 13.6 - 13.8 V, en van het type gel zijn, wordt de inverter ingesteld op instelling U0.

5.6 Kabelberekeningen

De verschillende onderdelen van de elektrische installatie worden d.m.v. kabels met elkaar verbonden. In dit subhoofdstuk wordt berekend welke kabels en beveiligingen er gebruikt zullen worden. Daarnaast wordt er ook een bliksemafleider geïnstalleerd vanboven op de windmolen. Hiervoor wordt een aarding van maximaal 10 Ω gebruikt [144].

5.6.1 Kabelberekening driefasige kabel tussen windmolen en controller

De stroom die de generator opwekt hangt af van de rotatiesnelheid van de as, en dus van de windsnelheid.

In Tabel 20 wordt het vermogen, de spanning en de stroom van de WindPMG1000 generator weergegeven bij het nominale werkpunt en bij maximale belasting. Het punt van maximale belasting is het vermogen dat bij hoge windsnelheid voor een langere tijd kan opgewekt worden. Volgens de producent is de maximaal mogelijke uitgangsspanning van de generator 468 V [86].

TABEL 20: VERMOGENS VAN DE WINDPMG1000 GENERATOR [86]

Werkingspunt	Vermogen (W)	Spanning (V)	Stroom (A)
Nominaal	1000 W	48 V	12 A
Maximale belasting	5000 W	137.5 V	21 A

Hieronder worden de stappen voor de kabelberekening uitgevoerd. Voor onderstaande berekening wordt gewerkt volgens de methodologie en tabellen van de Gids voor laagspanningsverdeling van Schneider [145].

Bepaling kaliber

Voor het bepalen van het kaliber van de lossers geldt dat de I_n (de nominale stroom waaronder de beveiliging niet reageert) groter moet zijn dan de I_b (bedrijfsstroom van de installatie). Vermits de maximale $I_b = 21$ A wordt er gekozen voor een kaliber met $I_n = 25$ A.

Bepaling sectie kabel

Voor het bepalen van de sectie van de kabel moet de bedrijfsstroom vermenigvuldigd worden met correctiefactoren (ook wel de K-coëfficiënt genoemd). Vermits de kabel onder de grond loopt (installatiewijze D2) moet er rekening gehouden worden met correctiefactoren K_4 , K_5 , K_6 , K_7 , K_n en K_s [145]. De correctiefactoren worden weergegeven in Tabel 21. Volgens United States Departement of Agriculture is de bodem in Senegal *isohyperthermisch* [146]. Dit betekent dat de bodem een hoge temperatuur heeft met weinig variatie, daarom kan er met één temperatuur gerekend worden. De grondtemperatuur in Senegal is gemiddeld boven de 22°C en de variatie tussen de zomer en winter is ≤ 5 °C [88]. Vermits er geen preciezere data aanwezig is over de grondtemperatuur in Le Coquetier Social, wordt er gerekend met een bodemtemperatuur van 30 °C. De maximale bedrijfsstroom is $i_b = 21$ A. Er wordt verder gewerkt met de eerstvolgende genormaliseerde waarde: $i_n = 26$ A (voor PVC).

TABEL 21: CORRECTIEFACTOREN DRIEFASIGE KABEL TUSSEN WINDMOLEN EN CONTROLLER

Type correctiefactor	Nummer	Waarde	Uitleg
Plaatsingswijze	K_4	1	Eén kring
Wederzijdse invloed	K_5	1	Eén kring
Aard van bodem	K_6	0.86	Erg droog
Bodemtemperatuur	K_7	0.89	30°C
Nulleider	K_n	1	Geen nulleider
Symmetrie	K_s	1	Symmetrisch
Totaal	K	0.77	Product

De in de leiding toelaatbare stroom $I_z = 26$ A. De fictieve stroomsterkte $I_z' = I_z / K = 26$ A / 0.77 A = 34 A. De minimale kopersectie die 34 A kan weerstaan is 2.5 mm².

Bepaling van de spanningsval

De volgende stap in de kabelberekening is het bepalen van de spanningsval. De maximaal toegelaten afwijking van de nominale spanning in Senegal is 11 % [147]. Toch wordt er gekozen om de maximale spanningsval op 8 % te houden, om energieverliezen te beperken, en een goede werking van de inverter te garanderen. Vermits het exacte gedrag van de generator niet gekend is, omdat zowel de spanning, stroom als frequentie variabel zijn afhankelijk van de windsnelheid en de interne werking van de MPP-tracker in de controller, wordt de berekening eerst gedaan bij de maximale bedrijfsstroom, daarna bij de nominale stroom. Zo kan gekeken worden bij welk werkingpunt de spanningsval het grootste is.

Bepaling van de spanningsval bij maximale bedrijfsstroom

De maximale bedrijfsstroom $i_b = 21$ A. Eerst wordt de spanning op dit werkingpunt berekend:

$$P = \sqrt{3} * U * I \quad (131)$$

$$\Leftrightarrow U = \frac{P}{\sqrt{3} * I} = \frac{5000 \text{ W}}{\sqrt{3} * 21 \text{ A}} = 137.5 \text{ V} \quad (132)$$

Een driefasige spanningsval wordt berekend met [145]:

$$\Delta U = \sqrt{3} * I_b * L * (R * \cos \varphi + X * \sin \varphi) \quad (133)$$

met:

- I_b [A]: de bedrijfsstroom,
- L [m]: de lengte van de kabel,
- R [Ω /m]: de lineaire weerstand van de kabel,
- X [Ω /m]: de lineaire reactantie van de kabel,
- Φ [$^\circ$]: de faseverschuiving tussen spanning en stroom.

In het geval van de maximale bedrijfsstroom geldt:

- $I_b = 21$ A,
- $L = 130$ m ($2 \cdot 65$ m),
- $R = 7 \cdot 10^{-3}$ Ω /m (De soortelijke weerstand van koper is $0.0175 \cdot 10^{-6}$ Ω m. Dus in dit geval $0.0175 \cdot 10^{-6}$ Ω m/ $2.5 \cdot 10^{-6}$ $m^2 = 7 \cdot 10^{-3}$ Ω /m),
- $X =$ verwaarloosbaar (Ω) bij doorsnedes < 50 mm^2 [145],
- $\Phi = 0^\circ$.

Hieruit blijkt dat de spanningsval $\Delta U = 33$ V. De procentuele spanningsval is 33 V/ 137.5 V = 24 %. Deze waarde is niet toelaatbaar.

Bepaling van de spanningsval bij nominale bedrijfsstroom

De nominale spanning is $U_{nom} = 48$ V. Het nominaal vermogen is $P_{nom} = 1000$ W. Eerst wordt de stroom op dit werkpunt berekend:

$$P = \sqrt{3} * U * I \quad (134)$$

$$\Leftrightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3} * U} = \frac{1000 \text{ W}}{\sqrt{3} * 48 \text{ V}} = 12 \text{ A} \quad (135)$$

Een driefasige spanningsval wordt berekend met:

$$\Delta U = \sqrt{3} * I_b * L * (R * \cos \varphi + X * \sin \varphi) \quad (136)$$

waarbij bij de nominale bedrijfsstroom:

- $I_b = 12$ A,
- $L = 130$ m,
- $R = 7 \cdot 10^{-3}$ Ω /m,
- $X =$ verwaarloosbaar (Ω),
- $\Phi = 0^\circ$.

Hieruit blijkt dat de spanningsval $\Delta U = 18.9$ V. De procentuele spanningsval is 18.9 V/ 48 V = 39.4 %. Dit is geen toelaatbare waarde.

Bepaling van de kabeldikte om de spanningsval tot een toelaatbare waarde te brengen

Bij het nominale werkpunt is de spanningsval het grootste. Hiervan wordt vertrokken om de minimale kabeldikte te bepalen zodat de spanningsval binnen de toelaatbare grens blijft.

De nominale spanning is 48 V. Indien de spanningsval onder de 8 % moet blijven mag ΔU niet groter zijn dan 3.84 V.

$$\Delta U = \sqrt{3} * I_b * L * (R * \cos \varphi + X * \sin \varphi) \quad (137)$$

Vermits X verwaarloosbaar is en $\Phi = 0^\circ$ kan deze vergelijking omgevormd worden tot:

$$R = \frac{\Delta U}{\sqrt{3} * I_b * L} = \frac{3.84 \text{ V}}{\sqrt{3} * 12 \text{ A} * 130 \text{ m}} = 0.00142 \text{ } \Omega/\text{m} \quad (138)$$

Hieruit blijkt dat de minimum kabeldoorsnede:

$$\frac{0.0175 * 10^{-6} \Omega m}{0.00142 \Omega/m} = 12.3 \text{ mm}^2 \quad (139)$$

Er wordt gekozen voor een kabel van 16 mm²

Berekening van de kortsluitstromen

Bij het berekenen van de kortsluitstroom zijn er twee waarden belangrijk. De kortsluiting aan de bron, deze bepaalt het vermogen dat onderbroken moet kunnen worden. Daarnaast is de kortsluitstroom op het einde van de kabel belangrijk, deze bepaalt de magnetische drempel van de vermogensschakelaar.

Kortsluiting aan de bron

Deze kortsluiting wordt bepaald door de generator. Om de kortsluitstroom te berekenen zijn er meerdere methodes, zoals de impedantiemethode, de compositiemethode en de conventionele methode [148]. Er wordt gewerkt m.b.v. de impedantiemethode, waarbij al de impedanties (inclusief de impedantie van de generator) tot aan het punt van de kortsluiting worden opgeteld [148]. De kortsluitstroom van een generator kan opgedeeld worden in een subtransiënte en een transiënte fase. In de subtransiënte fase is de kortsluitstroom het hoogst [149]. Daardoor wordt de subtransiënte overgangsreactantie gebruikt voor het berekenen van de maximale kortsluitstroom. Voor de subtransiënte overgangsreactantie van een synchrone generator met 8 - 14 polen wordt $X''_d = 0.2 \Omega$ genomen [150]. Voor deze berekening wordt er gewerkt met de hoogst mogelijk spanning van de generator, zoals vermeld in Tabel 13. De kortsluitstroom kan berekend worden volgens [145]:

$$I_{cc} = \frac{m * c * U}{\sqrt{3} * \sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \quad (140)$$

Met:

- m : de factor van de nulbelasting,
- c : de spanningsfactor,
- U [V]: de spanning,
- R_t [Ω]: de som van de weerstanden stroomopwaarts van dit punt,
- X_t [Ω]: de som van de reactanties stroomopwaarts van dit punt.

Vermits er bij deze berekening de grootst mogelijke kortsluitstroom berekend wordt, wordt er voor de nulbelastingsfactor en spanningsfactor 1.05 gekozen. Vermits de kortsluitstroom aan de klemmen van de generator berekend wordt, en er wordt aangenomen dat de generator zuiver inductief is, en geen Ohmse weerstand heeft, wordt er enkel gerekend met de (zuiver inductieve) impedantie van de generator.

In dit geval is:

- m = 1.05,
- c = 1.05,
- U = 468 V,
- $R_t = 0 \Omega$,
- $X_t = X''_d = 0.2 \Omega$.

Hieruit blijkt dat de maximale kortsluitstroom aan de generator $I_{cc} = 1.49 \text{ kA}$ is. Vermits generatoren een hogere interne impedantie hebben dan transformatoren met éénzelfde vermogen, waarmee ook het laagspanningsnet gevoed wordt, is de kortsluitstroom lager [151]. Hierdoor kan iedere beveiliging die voor een bepaald vermogen ontworpen is, zeker de maximale kortsluitstroom van de generator onderbreken.

Kortsluiting op het einde van de kabel.

Om te bepalen wat de minimale stroom is waarbij de beveiliging moet ingrijpen, moet er bepaald worden wat de kortsluitstroom op het einde van de kabel is. Zoals eerder vermeld is de exacte werking van de generator niet gekend (vermits zowel de spanning, stroom als frequentie veranderen bij een veranderende windsnelheid). Hierdoor wordt er een veiligheidsfactor ingecalculerd, zodat de kring zeker onderbroken wordt bij een kortsluiting.

De impedanties die beschouwd worden zijn de impedanties van de generator en van de geleiders. De impedantie van de generator is een zuivere reactantie, de impedantie van de geleiders hebben zowel een inductieve als een Ohmse component. Beide impedanties staan in serie. De kortsluitstroom kan berekend worden volgens [145]:

$$I_{cc} = \frac{m * c * U}{\sqrt{3} * \sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \quad (141)$$

Vermits er bij deze berekening de kleinst mogelijke kortsluitstroom berekend wordt, wordt er voor de nulbelastingsfactor en spanningsfactor 1 gekozen. Er wordt gerekend met de nominale spanning van $U = 48 \text{ V}$.

In dit geval is:

- $m = 1$,
- $c = 1$,
- $U = 48 \text{ V}$,
- $R_t = 0.142 \text{ } \Omega$. Deze wordt berekend volgens de wet van Pouillet: $R = \rho \frac{l}{A} = 0.0175 * 10^{-6} \text{ } \Omega \text{ m} * \frac{130 \text{ m}}{16 * 10^{-6} \text{ m}^2}$,
- $X_t = 0.2195 \text{ } \Omega$ Voor kabels wordt $X = 0.15 * 10^{-3} \text{ } \Omega / \text{m} * L(\text{m})$ genomen. Dit is bij deze kabel: $0.15 * 10^{-3} \text{ } \Omega / \text{m} * 130 \text{ m}$. Als reactantie van de generator wordt $X''_d = 0.2$ genomen.

Hieruit blijkt dat de kleinst mogelijke kortsluitstroom $I_{cc} = 106 \text{ A}$. Als veiligheidsfactor wordt er 1.5 genomen. De magnetische drempel van de vermogenschakelaar moet dus kleiner ingesteld worden dan 70.6 A .

Keuze van de beveiligingen

Nu de kabelsectie gekozen is, en de bedrijfs- en kortsluitstromen bepaald zijn, moet er bepaald worden aan welke voorwaarden de beveiligingen moeten voldoen.

Een eerste voorwaarde van de beveiliging is dat de nominale spanning van de vermogenschakelaar groter of gelijk moet zijn aan de nominale spanning tussen de fasen van het net. Vermits de nominale spanning van de generator 48 V is, kan er gewerkt worden met standaard beveiligingen voor laagspanning.

De frequentie van de vermogenschakelaar moet overeen komen met de frequentie van het net. Vermits de frequentie tussen de windmolen en de controller varieert afhankelijk van de rotatiesnelheid van de rotor (en dus varieert afhankelijk van de windsnelheid) is het niet mogelijk om een vaste frequentie te kiezen. Wel kan er aangenomen worden dat het signaal nooit hoogfrequent gaat zijn. Hierdoor wordt er gekozen voor een standaard beveiliging van 50 Hz .

Het kaliber van de lossers moet groter zijn dan de bedrijfsstroom. Hierdoor wordt voor $I_n = 25 \text{ A}$ gekozen zoals besproken in de eerste stap van de kabelberekening.

Het onderbrekingsvermogen van de vermogenschakelaar moet minstens gelijk zijn aan de maximale kortsluitstroom van de installatie. De vermogenschakelaar moet dus minstens een stroom $I_k = 1.49 \text{ kA}$ kunnen weerstaan.

Controle selectiviteit en filiatie

Vermits deze kabel door een generator gevoed wordt en maar één directe verbruiker heeft (de controller) is er geen controle van selectiviteit nodig.

Vermits deze kabel door een generator gevoed wordt en maar één verbruiker heeft (de controller) is er geen filiatie nodig.

Controle personenbeveiliging

De nominale spanning (48 V) van de generator ligt onder de veiligheidsspanning voor wisselspanning (50 V). Toch wordt er gekozen om een personenbeveiliging te installeren vermits de spanning bij hoge windsnelheden hoger kan liggen.

In een TT-net wordt de personenbeveiliging verzekerd door een differentieelschakelaar. Er wordt gekozen voor een differentieelschakelaar van 30 mA. In een TT-net moet er, in tegenstelling tot een TN-net, niet berekend worden of de foutstroom bij een isolatiefout groot genoeg is om de beveiliging te laten reageren, vermits de foutstroom onderbroken wordt door een differentieelschakelaar en niet door een automaat [145].

Het kaliber van de differentieelschakelaar moet minstens gelijk zijn aan het kaliber van de vermogenschakelaar. Hieruit volgt dat het kaliber van de differentieelschakelaar $\geq 25\text{A}$ moet zijn. De kortsluitvastheid van de differentieelschakelaar moet hoger zijn dan de maximaal mogelijke kortsluitstroom.

5.6.2 Kabelberekening eenfasige kabel tussen netaansluiting en inverter

De afstand tussen de netaansluiting en de inverter is 13 m. Om te bepalen welke kabeldikte er gebruikt moet worden, wordt er eerst bepaald welke stroom er loopt. De maximale laadstroom voor de batterijen die kan ingesteld worden op de WHC Solar 3048 inverter is 30 A. De inverter kan echter ook de gebruikers rechtstreeks via het net voeden. Vermits het maximale vermogen van de inverter gekend is kan de maximale stroom berekend worden:

$$I_{AC, \max, inverter} = \frac{P_{\max, inverter}}{U_{net}} = \frac{3000 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 13 \text{ A} \quad (142)$$

Indien de netspanning daalt of de last inductief is kan de stroom stijgen. Maar omdat er geen zware (inductieve) verbruikers zijn, zoals grote motoren, wordt er verder gerekend met deze stroom. Vermits deze stroom lager is dan de maximale stroom bij een verlichtingskring van een huisinstallatie (16 A), kan er een 1.5 mm^2 kabel gebruikt worden [152].

De aansluiting met het net is al beveiligd met een beveiliging van de netbeheerder. Dit is een smeltveiligheid van 40 A. Om een extra beveiliging te voorzien wordt achter deze smeltveiligheid nog een automaat van 16 A geplaatst.

5.6.3 Kabelberekening eenfasige kabel tussen inverter en gebruikers

De afstand tussen de inverter en de elektriciteitskast waar de verbruikers op aangesloten zijn, is 12 m. Vermits deze berekening identiek is als bij de kabel tussen de netaansluiting en de inverter, kan er eveneens een kabel van 1.5 mm^2 gekozen worden.

Voor de beveiliging wordt er eveneens gekozen voor een automaat van 16 A. Daarnaast wordt er een differentieelschakelaar van 30 mA geïnstalleerd.

5.6.4 Kabelberekening gelijkstroomkabel tussen controller en inverter

De kabel tussen de controller en inverter hangt op tegen de muur, dit is selectieletter E [145]. Vermits de kabel niet in een koker of goot bevestigd is, maar volledig door lucht omgeven is, er maar één kring is en er als omgevingstemperatuur 30 °C genomen wordt, zijn alle correctiefactoren gelijk aan 1 [145].

De controller hangt 2 m van de inverter, de totale kabellengte is dus 4 m. De verbinding tussen de controller en de inverter is een DC-spanning van 48 V. Het maximale vermogen van de controller is 3 kW. Vermits de spanning gekend is kan de maximale stroom tussen de controller en de inverter berekend worden:

$$I_{max,controller \rightarrow inverter} = \frac{3000 W}{48 V} = 62.5 A \quad (143)$$

Voor de kabeldikte wordt de eerstvolgende gestandaardiseerde dikte genomen. Voor een PVC kabel met 2 geleiders, die geïnstalleerd is volgens selectieletter E, is dit een doorsnede van 10 mm², deze kan 70 A aan [145]. Vermits de kabel zo kort is moet er geen berekening gemaakt worden om de spanningsval te controleren.

Vermits zowel de uitgang van de controller als de ingang van de inverter een inwendige automaat hebben, moet dit niet extra beveiligd worden.

5.6.5 Kabelberekening gelijkstroomkabel tussen batterijen

De kabels tussen de batterijen hangen vrij in de lucht, dit is eveneens selectieletter E [145]. Vermits de kabel niet in een koker of goot bevestigd is, maar volledig door lucht omgeven is, er maar één kring is en er als omgevingstemperatuur 30 °C genomen wordt, zijn alle correctiefactoren gelijk aan 1 [145].

De maximale laadstroom van de batterijen is niet gekend. Uit datafiches van batterijen van hetzelfde type (loodzuurbatterijen, 12 V, 200 Ah) blijkt dat dit type batterij een maximale laadstroom van 60A en een kortsluitstroom tussen 1.8 kA en 3.5 kA heeft [153], [154], [155]. De kortsluitstroom I_{cc} wordt hieronder met een benaderende formule berekend, als controle. Hierbij is k een coëfficiënt, die kleiner of gelijk is aan 20, en C de capaciteit van de batterij (200Ah) [145]:

$$I_{cc} = kC \quad (144)$$

$$I_{cc} \leq 20 \frac{1}{h} * 200 Ah = 4 kA \quad (145)$$

Om zeker te zijn dat de beveiliging de kortsluitstroom kan onderbreken wordt er gekeken naar de grootste kortsluitstroom, in dit geval 4 kA.

Er wordt ook een kabel van 10 mm² gekozen, zoals tussen de controller en de inverter. De kabel wordt beveiligd met een smeltzekering (bv. type ANL) van 63 A, die 4 kA kan onderbreken.

5.7 Conclusie elektrisch ontwerp

De mechanische energie van de bewegende rotor wordt d.m.v. een axiale flux generator met permanente magneten omgezet in elektrische energie. Het voordeel van deze generator is dat er een hoog rendement wordt gehaald, en toch gewicht kan bespaard worden t.o.v. een radiale flux generator. De generator bevindt zich op ieder moment op zijn optimale werkpunt, door de keuze van een controller die constant het Maximum Power Point (MPP) zoekt.

Bij de vergelijking tussen de energiebronnen, in hoofdstuk 3, kwamen zowel een PV-installatie als een windmolen naar voren als mogelijkheid. Er is toen gekozen voor een windmolen, vermits deze iets beter scoorde bij de vergelijking. Deze keuze neemt echter niet weg dat zonnepanelen eveneens een zeer nuttige energiebron zouden zijn in Le Coquetier Social. Daarom is er gekozen om een controller te installeren, die zowel met een windmolen als met zonnepanelen kan werken. Op deze manier is de opbouw zo flexibel mogelijk, en kan de installatie in de toekomst met zonnepanelen uitgebreid worden, zonder nieuwe elektronica te moeten kopen.

Om de bedrijfszekerheid te verhogen, is er een inverter geïnstalleerd die een automatische netkoppeling kan uitvoeren. Hierdoor worden de batterijen opgeladen met het elektriciteitsnet, en wordt er automatisch overgeschakeld op de batterijen, als er een stroompanne optreedt. Wegens financiële redenen is de doelstelling op het vlak van energieopslag niet gehaald. In de toekomst kan er echter eenvoudig een extra reeks batterijen in parallel geplaatst worden met de huidige batterijen, om op deze manier de opslagcapaciteit te verhogen.

In '1.3 Doelstellingen' is vermeld dat er getracht wordt zoveel mogelijk gebruik te maken van lokale materialen. In tegenstelling tot het mechanisch deel, kan het elektrisch deel niet volledig opgebouwd worden met materialen die in Senegal te verkrijgen zijn. Het type generator dat gekozen is voor de windmolen, een axiale flux generator met permanente magneten en externe rotor, is een weinig voorkomend type, dat niet eenvoudig te verkrijgen is. Om de generator optimaal te laten werken wordt er een controller gekocht bij dezelfde producent, deze twee toestellen worden geïmporteerd. De inverter, batterijen, kabels en beveiligingen worden wel lokaal aangekocht.

6 Kostenanalyse

6.1 Kosten

Voor het bouwen van de windmolen en de elektrische installatie zijn er verschillende soorten uitgaven gedaan. Een overzicht van de kosten staat in Tabel 22. Om de uitgaven overzichtelijk te houden worden de kosten opgedeeld per categorie. De uitgaven worden ingedeeld afhankelijk van waarvoor ze gebruikt zijn. De categorieën zijn: fundering, toren, elektrische installatie, hulpmiddel en overige uitgaven.

Voor het omrekenen van de bedragen van CFA (Communauté Financière Africaine) naar euro wordt gebruik gemaakt van de officiële wisselkoers: 1 euro is gelijk aan 655,9570 CFA [156].

Vermits de volledige installatie nog niet geïnstalleerd is, door de COVID-19-crisis van 2020, zijn nog niet alle componenten aangekocht. Om toch een kostenanalyse te kunnen maken, en een idee te krijgen van de terugverdientijd, wordt er een schatting gemaakt voor de kosten die nog niet gemaakt zijn. De geschatte kosten worden in het vetgedrukt aangeduid.

TABEL 22: OVERZICHT VAN DE GEMAAKTE KOSTEN

Omschrijving	Prijs (CFA)	Prijs (Euro)
Fundering		
Cement	240 900	367.25
Zand	45 000	68.60
Grind	365 000	556.44
Funderingsijzer	342 500	522.14
Werkuren installatie	265 000	403.99
Subtotaal fundering	1 258 400	1 918.42
Toren		
Draadstangen + moeren	131 600	200.63
Platen op fundering	309 000	471.07
Gegalvaniseerde buizen toren	155 040	236.36
Materiaal schuine balken, scharnier en kantelmechanisme	150 000	228.67
Materiaal schuine balken, scharnier en kantelmechanisme	635 000	968.05
Materiaal kabels	159 000	242.39
Takel	100 000	152.45
Verf	9 0000	13.72
Werkuren installatie	150 000	228.67
Subtotaal Toren	1 798 640	2 742.01
Rotor mechanisch (wieken en windvaan)		
Wieken: materiaal, zagen en lijmen	240 750	367.02
Wieken: schaven en afwerken	100 000	152.45
Windvaan en naaf	70 000	106.71
Werkuren installatie	50 000	76.22
Subtotaal rotor mechanisch	460 750	702.40
Elektrische installatie		
Invertor	400 000	609.80
Baterijen	340 000	518.33
Generator en controller	997265	1 520.32
Beveiligingen	150 000	228.67
Kabels	200 000	304.90
Werkuren installatie	0	0
Subtotaal elektrische installatie	2 087 265	3 182.02

Hulpmiddelen		
Materiaal houten kruizen	52 500	80.04
Werkuren installatie	0	0
Subtotaal hulpmiddel	52 500	80.04
Overig		
Stift	425	0.65
Schuifmaat	3790	5.78
Betonschaar	25 000	38.11
Boormachine + boren	28 700	43.75
Verfborstels	1 300	1.98
Taxi naar winkels	123 000	187.51
Subtotaal overig	182 215	277.78
Totaal aangekocht	4 969 770	7576.38
Totaal schatting	870 000	1326.29
Totaal	5 839 770	8902.67

6.2 Terugverdiëntijd

Om te bepalen op hoeveel tijd de installatie terugverdiend is, wordt er gekeken na hoeveel tijd de windmolen genoeg energie heeft opgewekt om zijn investering terug te verdienen. Hiervoor moet er bepaald worden hoeveel energie de windmolen opwekt. Om dit te bepalen zijn er verschillende methoden. De meest eenvoudige methode is de gemiddelde windsnelheid en een berekende vermogenscoëfficiënt (of opgezochte waarde van een vergelijkbaar type windmolen) in te vullen in de formule om het vermogen van een windmolen te berekenen. Deze techniek is uitgevoerd in ‘3.1.2 Dimensionering van een windturbine’. Deze techniek is een goede manier om een schatting te maken van de terugverdiëntijd, maar deze techniek houdt ten eerste geen rekening met de kansverdeling van de windsnelheid (maar enkel met de gemiddelde windsnelheid), en houdt ten tweede geen rekening met de niet-lineaire vermogenscurve van een windmolen. Een tweede, en betere, manier is de vermogenscurve van de windmolen te integreren over de kansverdeling van de windsnelheid. Deze kan vermenigvuldigd worden met het aantal uren in een jaar om de jaarlijkse opbrengst te bekomen [24]:

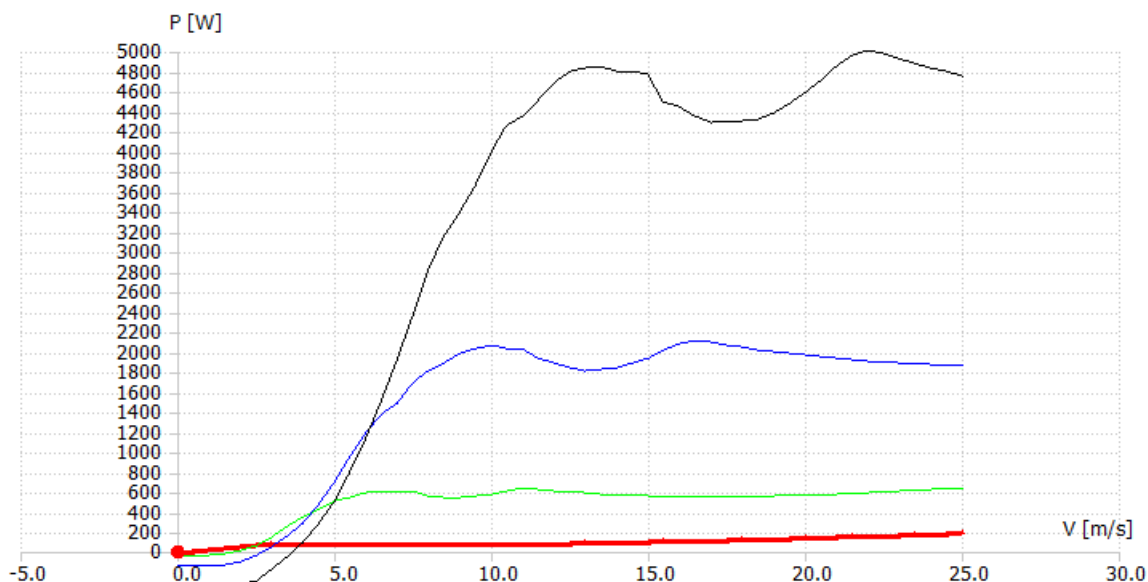
$$E_{\text{jaar}} = 8760 \int_0^{\infty} P(v) * f(v) dv \quad (146)$$

met:

- E_{jaar} [Wh]: de opgewekte energie in een jaar,
- 8760 [uur]: het aantal uur in een jaar,
- $P(v)$ [W]: het opgewekte vermogen van de windturbine bij een windsnelheid v ,
- $f(v)$ [%]: de kansverdeling van de windsnelheid,
- v [m/s]: de windsnelheid.

Hierin kunnen zowel $P(v)$ als $f(v)$ opgesteld worden d.m.v. experimentele waarden. Vermits de windmolen nog niet opgebouwd is, en er geen windmeting ter plaatse is uitgevoerd, kunnen er geen experimentele data gebruikt worden. Hierdoor wordt er voor de vermogenscurve van de windmolen gebruik gemaakt van het simulatiemodel, en voor de kansverdeling van de windsnelheid gebruik gemaakt van een Weibull-verdeling uit experimentele data uit de literatuur [23].

Zoals uitgelegd in ‘4.8.2 Simulatiemodel’ kunnen er m.b.v. het simulatiemodel van de windmolen in QBlade, vermogenscurves van de windmolen worden gegenereerd. Deze gegenereerde curves zijn te zien in Figuur 69.



FIGUUR 69: HET OPGEWEEKTE VERMOGEN VAN DE WINDMOLEN IN FUNCTIE VAN DE WINDSNELHEID BIJ 50 RPM (ROOD), 100 RPM (GROEN), 150 RPM (BLAUW) EN 200 RPM (ZWART)

De berekende vermogens kunnen vanuit QBlade geëxporteerd worden naar een kommagescheiden bestand (Comma-separated value or CSV). Om deze curves te kunnen gebruiken moeten er nog enkele aanpassingen gebeuren. De windmolen heeft bij een bepaalde windsnelheid maar één toerental. Van de vier curves in Figuur 69 moet er dus één curve gemaakt worden. Voor waarden kleiner dan 1 m/s zijn de berekeningen negatief. Vermits dit niet mogelijk is in de realiteit, wordt er hier dus een waarde gelijk aan 0 W genomen. Voor de waarden waarbij de windsnelheid tussen 1 en 2 m/s is, ligt enkel de curve van 50 RPM boven nul. In dit interval wordt dus enkel deze curve beschouwd. Bij een windsnelheid tussen 2 en 2.5 m/s draait de windmolen nog onder het nominale toerental. Hier wordt dus het rekenkundig gemiddelde genomen van de vermogens bij 50 en 100 RPM. Op basis van de berekeningen in ‘4.8 Wieken’, kan er, voor de waarden waarbij de windsnelheid rond de gemiddelde windsnelheid ligt, bepaald worden wat het toerental van de rotor is. Zo is de windmolen ontworpen om bij de gemiddelde windsnelheid (3.56 m/s) de rotor bij hetzelfde toerental te laten draaien als het nominaal toerental van de generator (100 RPM). Hierdoor wordt er voor de windsnelheden tussen 2.5 en 4 m/s gekozen voor de curve van 100 RPM. Voor de hogere windsnelheden wordt er gekeken wat de rotatiesnelheid is aan de hand van de TSR waarvoor de wieken ontworpen zijn (TSR = 7.353), zoals uitgelegd in ‘4.8 Wieken’:

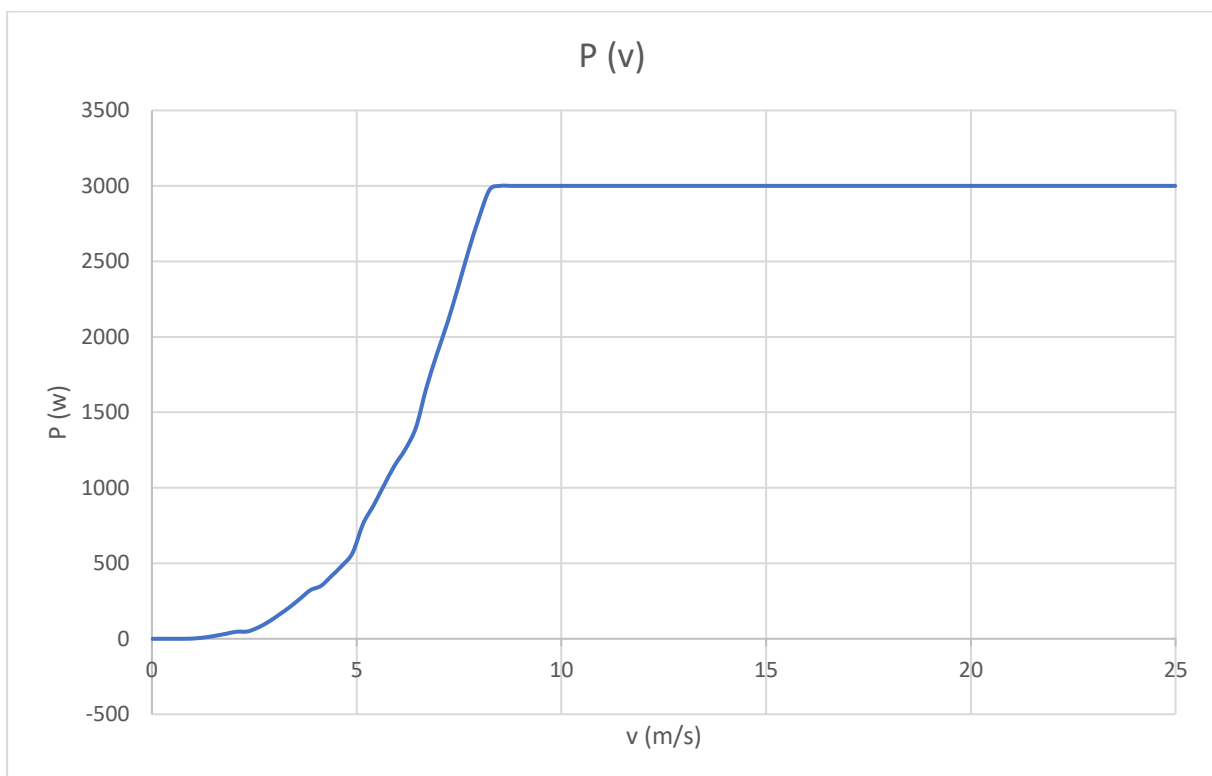
$$n_{ontwerp} = \frac{\left(\frac{TSR * v}{r}\right) * 60 \frac{s}{min}}{2\pi} = \frac{\left(\frac{7.353 * v}{2.50m}\right) * 60 \frac{s}{min}}{2\pi} \quad (147)$$

Hiermee kan bepaald worden dat het ontwerp toerental bij een windsnelheid $v = 4.5$ m/s gelijk is aan $n_{ontwerp} = 126$ RPM. Bij een windsnelheid tussen 4 en 5 m/s wordt het gemiddelde genomen van de curves van 100 en 150 RPM. Bij een windsnelheid tussen 5 en 6 m/s wordt de curve van 150 RPM beschouwd. Bij een windsnelheid $v = 6$ m/s is $n_{ontwerp} = 169$ RPM. Tussen 6 en 6.5 m/s wordt het gemiddelde genomen van de curves van 150 en 200 RPM. Bij hogere windsnelheden (tot de maximale gebruikswindsnelheid 25 m/s) wordt de curve van 200 RPM genomen. Op het moment dat deze boven de 3 kW gaat wordt deze echter begrensd, vermits de controller een maximaal vermogen van 3 kW heeft. In Tabel 23 is een overzicht gegeven.

TABEL 23: DE BESCHOUWDE CURVES BIJ IEDERE WINDSNELHEID

Windsnelheid (m/s)	Beschouwde curve
$0 \text{ m/s} \leq v < 1 \text{ m/s}$	/
$1 \text{ m/s} \leq v < 2 \text{ m/s}$	50 RPM
$2 \text{ m/s} \leq v < 2.5 \text{ m/s}$	\bar{x} (50 RPM, 100 RPM)
$2.5 \text{ m/s} \leq v < 4 \text{ m/s}$	100 RPM
$4 \text{ m/s} \leq v < 5 \text{ m/s}$	\bar{x} (100RPM, 150 RPM)
$5 \text{ m/s} \leq v < 6 \text{ m/s}$	150 RPM
$6 \text{ m/s} \leq v < 6.5 \text{ m/s}$	\bar{x} (150 RPM, 200 RPM)
$6.5 \text{ m/s} \leq v < 25 \text{ m/s}$	200 RPM (max. 3000 W)
$v \geq 25 \text{ m/s}$	/

Nu voor ieder windsnelheidsinterval bepaald is uit welke curve de dataset genomen wordt, kan de vermogenscurve opgesteld worden. In Figuur 70 is de vermogenscurve weergegeven. Desondanks het feit dat het maximale toerental van de gekozen generator op 850 RPM ligt, is er voor het opstellen van de vermogenscurve enkel gewerkt met de datasets van 0 t.e.m. 200 RPM, om de berekeningen overzichtelijk te houden. Dit maakt echter geen groot verschil, vermits er uit de berekening van het nominale toerental bij een bepaalde windsnelheid blijkt dat er pas vanaf 7.5 m/s toerentallen $n_{ontwerp} > 200 \text{ RPM}$ gehaald worden. Bij deze windsnelheid komt de curve van 200 RPM al (bijna) op het punt van het maximale vermogen van de generator (3000 W).



FIGUUR 70: VERMOGENSCURVE VAN DE WINDMOLEN

Dankzij de vermogenscurve kan er (benaderend) bepaald worden hoeveel vermogen er wordt opgewekt bij iedere windsnelheid. Nu moet er bepaald worden wat de kans is dat een bepaald windsnelheidsinterval voorkomt op de locatie van de windmolen. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van de Weibull-verdeling die werd uitgelegd in de literatuurstudie [23]. Uit experimentele data van twee onderzoeksgroepen uit Senegal en Mauritanië blijkt dat in Kayar, een gemeente op 10 km van 'Le Coquetier Social', de vormparameter $k = 2.77$ en de schaalparameter $A = 4.85 \text{ m/s}$ zijn op een hoogte van 20 m [23]:

$$f(v, c, k) = \begin{cases} \frac{2.77}{4.85} \left(\frac{v}{4.85}\right)^{2.77-1} e^{\left(\frac{-v}{4.85}\right)^{2.77}} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (148)$$

Om deze Weibull-verdeling om te rekenen naar een Weibull-verdeling op de hoogte van de windmolen, moet de schaalparameter opnieuw bepaald worden. Er wordt aangenomen dat de vormparameter k gelijk blijft. In dit geval kan de schaalparameter A met een empirische formule bepaald worden m.b.v. de gemiddelde windsnelheid ($\bar{U} = 3.56$ m/s) [157]:

$$\bar{U} \approx A \left(0.568 + \frac{0.434}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (149)$$

Deze formule kan omgevormd worden om de schaalparameter A te bepalen:

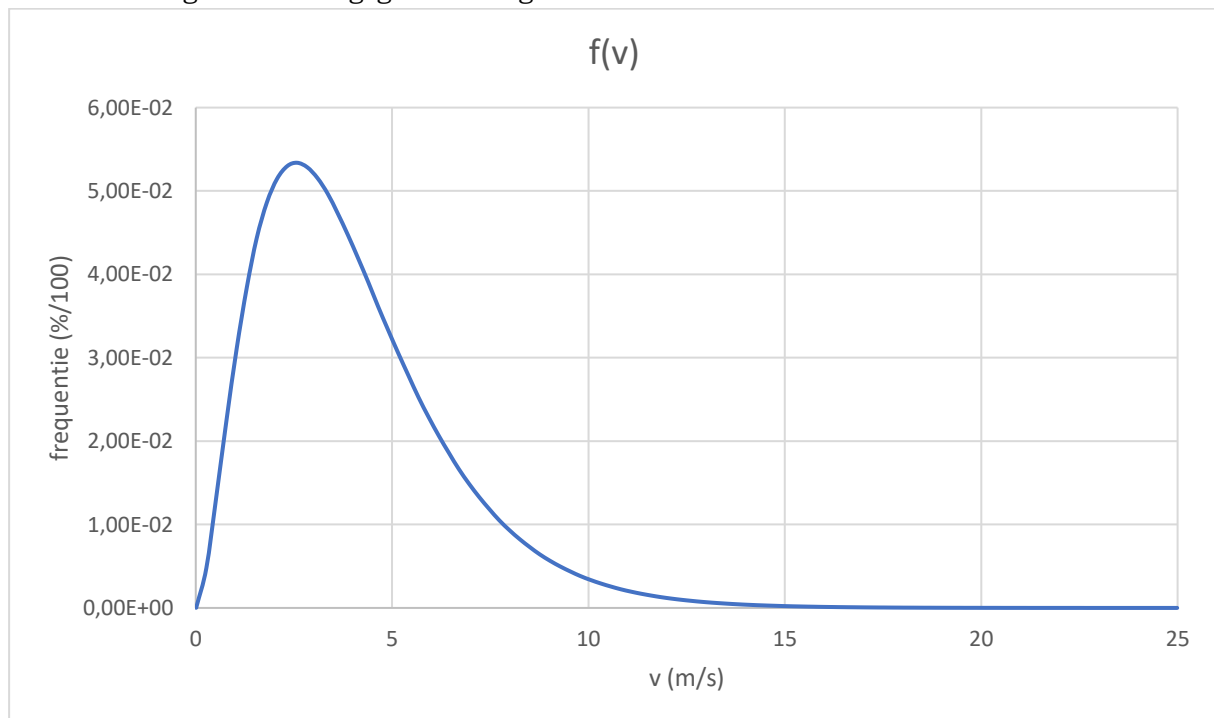
$$A \approx \frac{\bar{U}}{\left(0.568 + \frac{0.434}{k}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (150)$$

$$A \approx \frac{3.56 \text{ m/s}}{\left(0.568 + \frac{0.434}{2.77}\right)^{\frac{1}{2.77}}} = 4.00 \text{ m/s} \quad (151)$$

De Weibull-verdeling op 13 m is dan:

$$f(v, c, k) = \begin{cases} \frac{2.77}{4.00} \left(\frac{v}{4.00}\right)^{2.77-1} e^{\left(\frac{-v}{4.00}\right)^{2.77}} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (152)$$

Deze verdeling wordt weergegeven in Figuur 71.



FIGUUR 71: WEIBULLVERDELING VAN DE WINDSNELHEID OP EEN HOOGTE VAN 13M IN KAYAR. MET A = 4.00 M/S EN K = 2.77

Indien de vermogenscurve en de Weibull-verdeling over elkaar geplotted worden, en geïntegreerd worden van $v = 0$ m/s tot $v = \infty$ m/s, blijkt dat de gemiddelde mechanische uuropbrengst van de windmolen 646 Wh is. Indien er gerekend wordt met een totale (mechanische en elektrische) efficiëntie van 0.683, zoals uitgelegd in '3.1.2 Dimensionering van een windturbine', is de gemiddelde (bruikbare) uuropbrengst 441 Wh. Dit is veel groter dan de minimaal vereiste opbrengst van 252.5 Wh per uur, zoals bepaald in de doelstellingen. Hieruit

kan geconcludeerd worden dat de vereenvoudigde rekenwijze, zoals toegepast in ‘3.1.2 Dimensionering van een windturbine’, sterk afwijkt van de methode die in dit subhoofdstuk is toegepast. Eenmaal de installatie volledig opgebouwd is, kan er gemeten worden wat het effectieve elektrische vermogen van de windmolen is bij iedere windsnelheid volgens de voorgeschreven IEC 61400-12-1 norm [158]. Daarnaast kan ook de windsnelheid gemeten worden over een langere tijd, en kunnen er ook metingen gebeuren om nauwkeurig de rendementen van de verschillende componenten te bepalen. Desondanks dat vorige berekening nog steeds zijn beperkingen heeft, geeft deze wel een goede indicatie. In Bijlage V staan de volledige datasets, alsook de samengestelde dataset, de discrete functiewaarden van de Weibull-verdeling en het product van beide functies.

Indien de uuropbrengst vermenigvuldigd wordt met het aantal uur in een jaar, wordt de jaaropbrengst bekomen:

$$E_{jaar} = E_{uur} * 8760 \frac{uur}{jaar} = 441 Wh * 8760 \frac{uur}{jaar} = 3.863 MWh \quad (153)$$

De prijs voor 1 kWh elektrische energie is voor huishoudens in Senegal zo’n €0.152 [159]. Per jaar wordt er dus €587.18 aan elektrische energie opgewekt. De terugverdiendtijd van de installatie kan berekend worden volgens:

$$t = \frac{P_{investering}}{E_{jaar} * P_{kWh}} = \frac{€8902.67}{3863 kWh * 0.152 \frac{€}{kWh}} = 15.16 jaar \quad (154)$$

Volgens deze berekening is de installatie na 15 jaar en 2 maanden terugverdiend. Hierbij wordt er echter geen rekening gehouden met momenten dat de windmolen stil ligt voor onderhoud en rendementsverlies door slijtage van de componenten.

6.3 Conclusie kostenanalyse

Om te kunnen concluderen of de windmolen een goede investering was, wordt er eerst een vergelijking gemaakt met commercieel beschikbare windmolens. De geschatte kost voor de totale installatie is zo’n €8 900. De Fortis Montana, een horizontale as windturbine (HAWT) met een rotordiameter van 5 m en een vermogen van 5 kW, kost voor de volledige installatie tussen €10 350 en €17 975, afhankelijk van de gekozen uitgangsspanning en extra opties [160]. De Turby, een verticale as windturbine (VAWT) met een rotordiameter van 2 m en een vermogen van 2.5 kW kost €21 350 [161]. De Bergey Windpower Excel 6, een HAWT met een rotordiameter van 6.2 m en een vermogen van 5.5 kW kost €19 500 [162]. Hieruit blijkt dat de kost van de installatie per kW geïnstalleerd vermogen in de buurt, of lager, ligt dan vergelijkbaar types windmolens.

De vergelijking gaat echter verder dan enkel de investeringskost. Vermits deze windmolen zelf ontworpen is, kon er optimaal worden ingespeeld op de noden van Le Coquetier Social. Zo is de hoogte van de toren gebaseerd op de omgeving rond de windmolen, zijn de wieken ontworpen om optimaal te werken op de gemiddelde windsnelheid op de locatie van de windmolen, en is uitgangsspanning van de generator gekozen met de rest van de installatie in het achterhoofd. Bij een commercieel beschikbare windmolen moet er een afweging gemaakt worden tussen de parameters, en kan er dus geen windmolen gekozen worden die op alle vlakken optimaal gedimensioneerd is.

Als laatste punt is de onderhoudsvriendelijkheid van een zelf ontworpen windmolen groter dan bij een commercieel aangekochte windmolen. Op de generator en controller na zijn alle onderdelen in Senegal te verkrijgen of produceren. Hierdoor kan een technisch defect worden opgelost door de lokale bevolking. Dit speelt een grote rol in de bedrijfszekerheid van de installatie.

7 Conclusie

Om de energieproblemen van Le Coquetier Social op te lossen, werd er begonnen met een lijst van doelstelling op te stellen. Hieruit bleek dat er een vermogen van 252.5 W moet kunnen overbrugd worden tijdens stroompannes die maximaal 48 uur duren. Eén van de doelstellingen is, dat er zo veel mogelijk gebruik wordt gemaakt van lokale materialen.

Uit de voorstudie kwamen drie mogelijke energiebronnen (zonne-energie, windenergie en biomassa), en twee energieopslagmethoden (batterijen en waterstofgas) naar voren als mogelijkheden om het energieprobleem op te lossen. Nadat de verschillende technologieën gedimensioneerd en vergeleken werden met elkaar, kwam een windmolen in combinatie met batterijen naar voren als de beste oplossing. Nadat de keuze gevallen was op een windmolen, moest er nog gekozen worden tussen verschillende types windmolens. Er is gekozen voor een tilt-up windturbine. Dit type biedt als voordeel dat het op de grond kan opgebouwd worden, en kan platgelegd worden bij hoge windsnelheden en onderhoud. Hierdoor kan zowel de opbouw als het onderhoud veilig gebeuren, en moeten de componenten op minder grote krachten berekend worden.

In het volgende hoofdstuk is een ontwerp gemaakt van de mechanische installatie. In Diamonds is een model gemaakt van de windmolen. Aan de hand van dit model kan er snel gekeken worden welke invloed de verschillende parameters hebben op de sterkte en stabiliteit van de windmolen. Met behulp van de Blade Element Momentum theorie zijn de wieken ontworpen. Ook hiervan werd een simulatiemodel opgesteld, in QBlade. Op deze manier kan de werking van de windmolen gesimuleerd worden bij verschillende windsnelheden en toerentallen. Ook kan er a.d.h.v. het simulatiemodel gekeken worden welke ongewenste effecten er optreden rond de wieken, bij hogere windsnelheden. Dit zijn verschijnselen die niet exact te bepalen zijn met manuele berekeningen.

Voor de elektrische installatie is er gekozen voor een axiale flux generator met permanente magneten en een externe rotor. Met dit type generator kan er een hoger rendement gehaald worden dan bij een, meer voorkomende, radiale flux generator. Daarboven zijn er minder onderdelen, vermits een axiale flux generator bij lage toerentallen al een nuttig vermogen kan opwekken, waardoor er geen tandwielkast nodig is. Ook is de massa lager dan bij een radiale flux generator met een vergelijkbaar vermogen. Om te garanderen dat de windmolen steeds op zijn optimale werkingpunt werkt, wordt er gekozen voor een maximum power point controller. Energieopslag gebeurt m.b.v. vier gelbatterijen van 2.40 kWh die in serie staan. Deze kunnen zowel opgeladen worden door de windmolen als door de inverter, via het elektriciteitsnet.

De eerste stap in het oplossen van het energieprobleem is het installeren van de inverter en de batterijen. Hiermee kunnen er al stroompannes overbrugd worden m.b.v. de energie op de batterijen. Op dit moment zijn er vier batterijen aangekocht met een totale capaciteit van 9.60 kWh. Dit is lager dan de doelstelling van 12.12 kWh. De capaciteit kan in de toekomst echter uitgebreid worden door het bijplaatsen van batterijen. Er is gekozen voor een inverter die een automatische netkoppeling kan uitvoeren. Hierdoor kunnen de batterijen automatisch worden opgeladen als het elektriciteitsnet werkt, en wordt er automatisch energie van de batterijen gebruikt als het elektriciteitsnet wegvalt. Op dit moment zijn de inverter en batterijen geïnstalleerd. Nog niet alle kabels en beveiligingen zijn aangekocht, wegens de COVID-19-crisis. Indien de maatregelen in Senegal afnemen, kunnen deze van op afstand aangekocht worden, en geïnstalleerd worden door een lokale elektricien. De elektricien wordt hiervoor via het internet ondersteund vanuit België.

De tweede stap in het oplossen van het energiesysteem is het opbouwen van de windmolen. Hiermee kunnen de batterijen ook opgeladen worden als het elektriciteitsnet niet werkt, waardoor er nog langere stroompannes overbrugd kunnen worden. Dankzij de COVID-19-crisis is het niet mogelijk om de windmolen volledig op te bouwen. Wel is de fundering gelegd, en is een groot deel van de materialen aangekocht. In de toekomst gaat de windmolen afgewerkt worden, om de volledige installatie te kunnen benutten.

Uit het simulatiemodel van de windmolen, in QBlade, blijkt dat de windmolen meer energie kan opbrengen dan uit manuele berekeningen werd gedacht. De gekozen MPP-controller kan zowel energie van een windmolen, als van zonnepanelen verwerken. Hierdoor kan de installatie in de toekomst eenvoudig uitgebreid worden met zonnepanelen. In de toekomst kan er geëxperimenteerd worden of het mogelijk is om volledig afhankelijk van het elektriciteitsnet te werken.

Vermits nog niet alle onderdelen aangekocht zijn, zijn ook nog niet alle kosten gekend. Er is een schatting gemaakt van de kosten die nog niet gemaakt zijn. Hierdoor is er een idee van de totaalkost. Aan de hand van het simulatiemodel is er berekend dat de investering van de windmolen op 15 jaar en 2 maanden terugverdiend is (zonder rekening te houden met slijtage van de onderdelen of momenten van onderhoud). Indien er in de toekomst ook zonnepanelen zouden geïnstalleerd worden kan de terugverdientijd dalen. Dit komt doordat het grootste deel van de elektrische installatie voor beide energiebronnen hetzelfde is. Zo kan dezelfde controller en inverter gebruikt worden, bij zowel de windmolen als bij zonnepanelen.

Bibliografie

- [1] Student for Energy in Africa, „Missie,” [Online]. Available: <https://studentsforenergyinafrica.com/nl/missie/>. [Geopend 22 september 2019].
- [2] „Le Coquetier Social,” Afractie VZW, [Online]. Available: http://afractie.be/new/?page_id=1025. [Geopend 24 Juni 2019].
- [3] „Over ons,” Afractie, [Online]. Available: www.afractie.be/new/?page_id=40. [Geopend 21 Juni 2019].
- [4] climate-data.org, „DAKAR CLIMATE,” climate-data.org, [Online]. Available: <https://en.climate-data.org/africa/senegal/dakar/dakar-521/>. [Geopend 16 april 2020].
- [5] K. Bollen en S. Michiels, „KU Leuven scientists crack the code for affordable, eco-friendly hydrogen gas,” 26 Februari 2019. [Online]. Available: <https://nieuws.kuleuven.be/en/content/2019/belgian-scientists-crack-the-code-for-affordable-eco-friendly-hydrogen-gas>. [Geopend 24 Juni 2019].
- [6] J. Ouwehand, T. Papa, W. Gilijalse en J. de Geus, Toegepaste Energietechniek Deel 2: Duurzame Energie, Den Haag: Academic Service , 2009.
- [7] Solargis, „Solar resource maps of Senegal,” 16 januari 2017. [Online]. Available: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/senegal>. [Geopend 20 februari 2019].
- [8] Global Solar Atlas, „Global Solar Atlas,” 2019. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/?c=14.81412,-16.947782,11&s=14.859054,-17.079212>. [Geopend 2019 september 20].
- [9] Solar Radiation Data, „MONTHLY MEANS OF SOLAR IRRADIANCE, TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY,” Solar Radiation Data, november 2016. [Online]. Available: <http://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/monthly-means-solar-irradiance-temperature-relative-humidity>. [Geopend 20 september 2019].
- [10] J. Souza en N. d. Sousa, „SciELO,” 18 februari 2019. [Online]. Available: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000300417&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt. [Geopend 27 augustus 2019].
- [11] R. Ehrlich, Renewable energy: A first course, Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [12] J. A. Kadhem Alanbary, „Design and Construction of a Tracking Device for Solar Electrical Systems,” januari 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Current-voltage-characteristic-of-a-typical-solar-panel-The-above-curves-shows-the_fig2_326878893. [Geopend 24 juni 2019].
- [13] J. Rakovec, K. Zaksek, K. Brecl, D. Kastelec en M. Topic, „Orientation and Tilt Dependence of a Fixed PV Array Energy Yield Based on Measurements of Solar Energy and Ground Albedo – a Case Study of Slovenia,” in *Energy management systems*, IntechOpen, 2011, pp. 145-160.
- [14] M. Z. Jacobson en V. Jadhav, „World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels,” *Solar Energy*, nr. 169, pp. 55-66, 2018.
- [15] Latlong, „Get Latitude and Longitude,” [Online]. Available: <https://www.latlong.net/>. [Geopend 2019 12 16].
- [16] S. Ekici en M. Ali Kopru, „Investigation of PV System Cable Losses,” *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, vol. 7, nr. 2, p. 811, 2017.

- [17] P. Mohanty, T. Muneer en M. Kolhe, „Performance of solar PV-systems,” in *Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for Off-Grid Electrification*, Switzerland, Springer, 2016, p. 115.
- [18] R. Glazema, „Windenergie,” in *cursus Duurzame Energie in ontwikkelingslanden*, Twente, studievereniging MONSOON; Werkgroep OntwikkelingsTechnieken, Universiteit Twente, 2003, pp. 3.1-3.27.
- [19] M. Lenzen en O. Baboulet, „Wind Energy,” in *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, Sydney, Springer International Publishing, 2017, pp. 1975-2005.
- [20] Technical University of Denmark, „Global Wind Atlas,” [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/area/Senegal/Dakar>. [Geopend 25 September 2019].
- [21] V. Sohoni, S. Gupta en R. Nema, „A comparative analysis of wind speed probability distributions for wind power assessment of four sites,” *Turkish journal of electrical engineering and computer science*, vol. 24, p. 4724 – 4735, 2016.
- [22] E. C. Morgan, M. Lackner, R. M. Vogel en L. G. Baise, „Probability distributions for offshore wind speeds,” *Energy conversion and management*, vol. 52, nr. 1, pp. 15-26, 2011.
- [23] B. Ould Bilal, M. Ndong, C. M. F. Kebe, V. Sambou en P. A. Ndiaye, „TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment,” in *Feasibility study of wind energy potential for electricity generation in the northwestern coast of Senegal*, Beirut, Libanon, 2013.
- [24] ABB, Technical Application Papers No.13: Wind power plants, Bergamo: ABB, 2011.
- [25] A. Kalmikov, K. Dykes en K. Araujo, „Wind power fundamentals,” MIT Wind Energy Group & Renewable Energy Projects in Action.
- [26] C. A. Badurek, „wind turbine,” *Britannica academic*, [Online]. Available: <https://academic-eb-com.kuleuven.ezproxy.kuleuven.be/levels/collegiate/article/wind-turbine/605457>. [Geopend 16 December 2019].
- [27] M. Ebrahimpour, R. Shafaghat, R. Alamian, S. Shadloo en Mostafa, „Numerical Investigation of the Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of the Overlap Parameter in Both Horizontal and Vertical Directions on Its Performance,” *Symmetry*, vol. 11, nr. 6, pp. 1-16, 2019.
- [28] J. Melkebeek, *Electrical Machines and Drives: Fundamentals and Advanced Modelling*, Zwijnaarde: Springer International Publishing, 2018.
- [29] G. Vandensande, *Elektrische machines [cursus]*, KULeuven, 2017.
- [30] M. Recep Minaz en M. Çelebi, „Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators,” *Results in Physics*, vol. 7, pp. 183-188, 2017.
- [31] R. Syahputra en I. Soesanti, „Performance Improvement for Small-Scale Wind Turbine System Based on Maximum Power Point Tracking Control,” *Energies*, vol. 12, pp. 1-18, 2019.
- [32] J. Ness en B. Moghtaderi, „Biomass and Bioenergy,” in *Coal-Biomass Cofiring Handbook*, Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development, 2007, pp. 1-36.
- [33] S. R. Decker, J. Sheehan, D. C. Dayton, J. J. Bozell, W. S. Adney, B. Hames, S. R. Thomas, R. L. Bain, S. Czernik, M. Zhang en M. E. Himmel, „Biomass Conversion,” in *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*, New York, Springer Science+Business Media, 2012, pp. 1249-1322.
- [34] V. P. Soudham, *Biochemical conversion of biomass to biofuels [eindwerk]*, Umeå, Sweden: Department of Chemistry Umeå University, 2015.

- [35] International renewable energy agency, „Biomass for power generation,” *Renewable energy technologies: cost analysis series*, nr. 1, 2012.
- [36] E. Dimpl, „Part I: Biomass Gasification,” in *Small-scale Electricity Generation from Biomass*, Eschborn, GIZ HERA – Poverty-oriented Basic Energy Service, 2011.
- [37] A. Singh, K. s. Rawat, O. nautiyal en T. V. Chavdal, „Biomass to fuel: conversion techniques,” in *Energy resources: Development, Harvesting and Management*, Dehra Dun, Abhimanyu Gahlot, 2016, pp. 155-194.
- [38] F. Lettner, H. Timmerer en P. Haselbacher, „Biomass gasification – State of the art description,” Intelligent Energy – Europe (IEE), Graz, Austria, 2007.
- [39] N. Singh, N. Maurya en M. Singh, „Biochemical Conversion of Biomass and Status of Biomass Energy in India,” *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, nr. 10, pp. 900-904, 2014.
- [40] E. Dimpl, „Part II: Biogas,” in *Small-scale Electricity Generation from Biomass*, GTZ-HERA – Poverty-oriented Basic Energy Service, 2010.
- [41] Irena, „Biogas for domestic cooking,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [42] Electrabel, „biomassa,” [Online]. Available: <https://corporate.engie-electrabel.be/nl/lokaal-producent/biomassa/>. [Geopend 25 Juni 2019].
- [43] Y. Van den Broeck, „Waterstof als energie-opslagmedium: wat, status en perspectieven,” WaterstofNet, Diepenbeek, 2019.
- [44] W. Martinez en C. Suarez, *Electric Vehicles and High Power Chargers* [cursus], Diepenbeek: KULeuven, 2019.
- [45] M. Safari, „Slides Fundamentals of battery engineering course 1-3,” UHasselt, Diepenbeek, 2019.
- [46] M. Bates, „How does a battery work?,” MIT School of Engineering, 1 Mei 2012. [Online]. Available: <http://engineering.mit.edu/engage/ask-an-engineer/how-does-a-battery-work/>. [Geopend 29 Augustus 2019].
- [47] D. Linden en T. B. Reddy, *Linden's Handbook of Batteries*, McGraw-Hill, 2011.
- [48] D.-M. Duong, „Volumetric and Gravimetric energy density of different types of battery technology.” 2014.
- [49] J. B. Calvert, „Lead+,” 10 November 2002. [Online]. Available: <http://mysite.du.edu/~jcalvert/phys/lead.htm>. [Geopend 29 augustus 2019].
- [50] Victron Energy, „Gel and AGM Batteries,” Almere.
- [51] E. Ogunniyi en H. Pienaar, „Overview of Battery Energy Storage System Advancement for Renewable (Photovoltaic) Energy Applications,” 2017.
- [52] J. Tarabay en N. Karami, „International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering,” in *Nickel Metal Hydride Battery: Structure, Chemical Reaction, and Circuit Model*, International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2015.
- [53] N. Narayan, T. Papakosta, V. Vega-Garita, Z. Qin, J. Popovic-Gerber, P. Bauer en M. Zeman, „Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology,” *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1629-1639, 2018.
- [54] R. A. Huggins, „Hydrogen Storage,” in *Energy Storage*, New York, Springer Science&Business Media, LLC, 2010, pp. 95-117.
- [55] Y. Van den Broeck, Interviewee, *Studiedag UCLL "Storage Day", spreker waterstofnet*. [Interview]. 28 November 2019.
- [56] IEC, „White paper: Electrical Energy Storage,” IEC, Geneva, 2011.

- [57] College of the desert, „Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies.,” in *Module 1: Hydrogen Properties*, Palm Desert, US Departement of Energy, 2001, pp. 1-47.
- [58] F. Schüth, „Challenges in hydrogen storage,” *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 176, pp. 155-166, 2009.
- [59] R.-A. Felseghi, E. Carcadea, M. S. Raboaca, C. N. Trufin en C. Filote, „Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications,” *Energies*, vol. 12, nr. 4593, pp. 1-28, 2019.
- [60] S. Dharmalingam, V. Kugarajah en M. Sugumar, „Chapter 1.7 - Membranes for Microbial Fuel Cells,” in *Biomass, Biofuels, Biochemicals*, Elsevier, 2019, pp. 143-194.
- [61] Mattuci, „Diagram of a PEM fuel cell,” 1 september 2015. [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Proton_Exchange_Fuel_Cell_Diagram.svg. [Geopend 2 mei 2020].
- [62] E. de Vries, „Small wind turbines: Driving performance,” *Renewable energy world*, vol. 3, nr. 11, 2008.
- [63] Hotel Energy Solutions, „Renewable Energy Solutions: Small wind energy system,” [Online]. Available: http://www.hes-unwto.org/HES/files/HES_Key_EE_Technology_30_EN.pdf. [Geopend 6 mei 2020].
- [64] R. Beckers, „Small Wind Turbine Site Selection,” Solacity Inc., [Online]. Available: <https://www.solacity.com/small-wind-turbine-site-selection/>. [Geopend 5 mei 2020].
- [65] A. C. Way en G. van Zijl, „A study on the design and material costs of tall wind turbine towers in South Africa,” *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, vol. 57, pp. 45-54, 2015.
- [66] B. A. Harper, J. D. Kepert en J. D. Ginger, „Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions,” World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2008.
- [67] The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, „Basic wind speed in various countries,” [Online]. Available: http://ifrc-sru.org/wp-content/uploads/2017/07/Annex_4.pdf. [Geopend 3 december 2019].
- [68] T. J. Pedley, „Introduction to Fluid Dynamics,” *Scientia Marina*, vol. 61, pp. 7-24, 1997.
- [69] Y. A. Çengel en J. M. Cimbala, „Chapter 11 external flow: drag and lift,” in *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2013, p. 573.
- [70] Centre Tecnològic de Transferència de Calor (CTTC), „Flow past a circular cylinder from critical to trans-critical Reynolds numbers”. *Solar Energy and Thermal Systems. Development Aerodynamics and CFD&HT*.
- [71] M. A. Pellow, C. J. M. Emmott, C. J. Barnhart en S. M. Benson, „Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis,” *Energy & Environmental Science*, vol. 7, 2015.
- [72] Electropedia, „Battery Performance Characteristics,” Electropedia, [Online]. Available: <https://www.mpoweruk.com/performance.htm>. [Geopend 7 mei 2020].
- [73] E. Wertheimer, „Hydrogen Fuel Cells vs Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles,” 20 juni 2018. [Online]. Available: <https://www.furosystems.com/news/hydrogen-fuel-cells-vs-lithium-ion-batteries-in-electric-vehicles/>. [Geopend 7 mei 2020].
- [74] B. Sunden, „Tubes, Crossflow over,” 2 februari 2011. [Online]. Available: <http://thermopedia.com/content/1216/>. [Geopend 10 april 2020].
- [75] Climates To Travel, „Climate - Senegal,” [Online]. Available: <https://www.climatestotravel.com/climate/senegal>. [Geopend 10 april 2020].

- [76] engineers edge, „Viscosity of Air, Dynamic and Kinematic,” engineersedge, [Online]. Available: https://www.engineersedge.com/physics/viscosity_of_air_dynamic_and_kinematic_14483.htm. [Geopend 10 april 2020].
- [77] J. J. Lienhard, Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders, Washington: Technical extension service, 1966.
- [78] Z. Lin, Numerical Study of the Interaction between Fluid and Multiple Cylinders [thesis], Cambridge: University of Cambridge, 2016.
- [79] C.-K. Choi en D. K. Kwon, „Determination of the Strouhal Number Based on the Aerodynamic Behavior of Rectangular Cylinders,” *Wind and Structures An International Journal*, vol. 3, nr. 3, pp. 209-220, 2000.
- [80] M. Arshad en B. C. O'Kelly, „Analysis and design of monopile foundations for offshore wind-turbine structures,” *Marine Georesources and Geotechnology*, vol. 4, nr. 166, pp. 139-152, 2015.
- [81] R. Hibbeler, Sterkteleer: negende editie, Amsterdam: Pearson, 2017.
- [82] M. K. Chaudhary en A. Roy, „Design & Optimization of a Small Wind Turbine Blade for Operation at Low wind speed,” *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE)*, vol. 2, nr. 3, pp. 62-73, 2015.
- [83] L. A. Viterna en R. D. Corrigan, „DOE/NASA Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines,” in *Fixed pitch rotor performance of large horizontal axis wind turbines*, Ohio, US, 1984.
- [84] B. Montgomerie, DRAG COEFFICIENT DISTRIBUTION ON A WING AT 90 DEGREES TO THE WIND, Netherlands Energy Research Foundation ECN, 1996.
- [85] W. D. Musial en C. S. Butterfield, „Windworks '97,” in *Using Partial Safety Factors in Wind Turbine Design and Testing*, Austin, Texas, 1997.
- [86] WindPMG, „Axial Flux PM Generator 12V/24V/48V/110V 1000W 100RPM Alternator,” WIndPMG, 2 Oktober 2019. [Online]. Available: http://www.windpmg.com/index.php?main_page=product_info&cPath=10&product_s_id=11. [Geopend 26 april 2020].
- [87] Nature Bois Concept, „Essence de bois,” Nature Bois Concept, [Online]. Available: <https://www.nature-bois-concept.com/fr/terrasse-bois/conseils/essences-de-bois/>. [Geopend 5 mei 2020].
- [88] European Commission, Soil atlas of Africa, Luxembourg, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [89] G. Verstraeten, Fysische geografie [cursus], Leuven: KULeuven, 2018.
- [90] United States Department of Agriculture, „Global Soil Regions Map,” United States Department of Agriculture, november 2005. [Online]. Available: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/?cid=nrcs142p2_054013. [Geopend 26 april 2020].
- [91] Det Norske Veritas; Wind Energy Department, Guidelines for Design of Wind Turbines, Denmark: Jydsk Centraltrykkeri, 2002.
- [92] V. Schaefer en J. C. Ashlock, Foundations for wind turbines [cursus], Iowa: Iowa State University, 2011.
- [93] I. Ickiewicz, „Soil freezing and the depth of spread foundations,” *Solina*, vol. 49, pp. 1-7, 2018.
- [94] P. J. Lang, Sensivity of shallow wind turbine foundation design and soil response to geotechnical variance with construction cost implications, Wisconsin: University of Wisconsin-Madison, 2012.

- [95] Texas A&M University, Foundation Design [cursus], Texas: Texas A&M University, 2012.
- [96] N. López-Acosta, E. Martínez-Hernández, A. Espinosa-Santiago, J. Mendoza-Promotor en A. Ossa López, „XVI Pan-american Conference on Soil Mechanics,” in *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, Cancun, Mexico, 2019.
- [97] Ahmed en Al-Agha, Basics of Foundation Engineering with Solved Problems, Gaza: Islamic University of Gaza, 2015.
- [98] J. D. Sorensen en J. N. Sorensen, Wind energy systems: Optimising design and construction for safe and reliable operation, Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.
- [99] U. C. Kalita, Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi: PHI Learning private limited, 2011.
- [100] B. M. Das, Principles of Foundation Engineering, Stamford: Cengage Learning, 2011.
- [101] D. P. Coduto, Foundation design: principles and practices, Upper Sadle River, N.J.: Prentice Hall, 2001.
- [102] L. Davison, „Basic Mechanics of Soils,” University of West England, mei 2000. [Online]. Available: <http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/basic/soilbasi.htm>. [Geopend 27 april 2020].
- [103] O. Blaker, T. Lunne, T. Vestgarden, L. Krogh, N. V. Thomsen, J. J. M. Powell en C. F. Wallace, „Method dependency for determining maximum and minimum dry unit weights of sands,” *Canadian geotechnical journal*, vol. 56, nr. 4, pp. 536-553, 2019.
- [104] S. Narayanan, „Introduction to reinforced concrete,” in *Design of RC Structures*, Oxford University Press, 2013, pp. 1-44.
- [105] NPTEL, „Lesson 29: Design of foundations,” in *Foundations - Theory and Design*, Kharagpur, National Programme on Technology Enhanced Learning, pp. 1-41.
- [106] D. Jenkins, Renewable Energy Systems: The Earthscan Expert Guide to Renewable Energy Technologies for Home and Business, Routledge, 2013.
- [107] McGraw Hill, McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology, McGraw-Hill Professional, 2012.
- [108] EngineeringToolbox, „Wire rope - Strength,” EngineeringToolbox, 2009. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/wire-rope-strength-d_1518.html. [Geopend 25 april 2020].
- [109] A. E. P. Veldman en A. Velická, Stromingsleer [cursus], Groningen: Rijksuniversiteit Groningen, 2010.
- [110] M. O. L. Hansen, „Aerodynamics and Design of Horizontal-Axis Wind Turbines,” in *Wind Energy Engineering*, 2017, pp. 161-183.
- [111] H. Ren, X. Zhang, S. Kang en S. Liang, „Actuator Disc Approach of Wind Turbine Wake Simulation Considering Balance of Turbulence Kinetic Energy,” *Energies*, vol. 12, nr. 1, 2019.
- [112] University of Notre Dame, „Aerodynamic Performance,” in *Windturbine Course*, University of Notre Dame, pp. 1 - 45.
- [113] J. P. T. Mo, S. C. P. Cheung en R. Das, „Wind Power and Aerodynamics Systems,” in *Demystifying numerical models: step-by-step modeling of engineering systems*, Oxford, Elsevier, 2019, pp. 33-60.
- [114] M. Ragheb en A. M. Ragheb, „Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio,” in *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, InTechOpen, 2011.

- [115] H. Gitano-Briggs, „Low Speed Wind Turbine Design,” in *Advances in Wind Power*, 2012, pp. 267-283.
- [116] S. F. Ramdin, Prandtl tip loss factor assessed [thesis], Delft: TU Delft, 2017.
- [117] Y. El khchine en M. Sriti, „2nd International Conference on Advances on Clean Energy Research, ICACER 2017,” in *Tip Loss Factor Effects on Aerodynamic Performances of Horizontal Axis Wind Turbine*, Berlin, Germany, 2017.
- [118] P. J. Schubel en R. J. Crossley, „Wind turbine blade design,” *Energies*, vol. 5, p. 3431, 2012.
- [119] R. Kumar en P. Baredar, „Solidity Study and its Effects on the Performance of A Small Scale Horizontal Axis Wind Turbine,” in *Impending Power Demand and Innovative Energy Paths*, New Delhi, Excellent Publishing house, 2014, pp. 290-297.
- [120] Airfoiltools, „Airfoil plotter (sd7032-il),” 2020. [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/plotter/index>. [Geopend 17 mei 2020].
- [121] O. Ceyhan, „50th AIAA ASM Conference,” in *Towards 20MW Wind Turbine: High Reynolds Number Effects on Rotor Design*, Nashville, Tennessee, 2012.
- [122] H. Bredmose, „Flow and forces around a wind turbine blade,” Danmarks Tekniske Universitet: Wind Energy, 24 februari 2016. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wOkm1oqpRhk>. [Geopend 17 april 2020].
- [123] D. Kreider en D. Lahr, Trapezoid Rule and Simpson’s Rule, Dartmouth: Dartmouth College: department of Mathematics, 2010.
- [124] „QBlade: Wind turbine design and simulation,” TU Berlin, [Online]. Available: <http://www.q-blade.org/#welcome>. [Geopend 17 mei 2020].
- [125] D. Marten, QBlade v0.9: guidelines, Berlin: TU Berlin, 2015.
- [126] J. Biggar, „Build A DIY 3 kW Wind Turbine ,” New Brunswick, 2019.
- [127] C. B. Vick, „Adhesive bonding of wood materials,” in *Wood handbook : wood as an engineering material*, Madison, USDA Forest Service, 1999, pp. 9.1-9.24.
- [128] MatWeb, „Tropical Niangon Wood,” [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9feee843d18d4b4db31293d98b05b8a0&ckck=1>. [Geopend 12 april 2020].
- [129] M. Ragheb, Wind power systems: harvesting the wind, Illinois, 2018.
- [130] N. C. Raikar en S. A. Kale, „Effect of Tail Shapes on Yawing Performance of Micro Wind Turbine,” *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 4, nr. 5-1, pp. 38-42, 2015.
- [131] K. Kwan, T. Leung, P. Mireault, P. Newman, M. M. Rahman, N. Truong en D. H. Wood, A catalogue of tail fin shapes for small wind turbines, Calgary, Canada: Schulich School of Engineering, University of Calgary, 2011.
- [132] D. Bartmann en D. Fink, Homebrew Wind Power: A Hands-on Guide to Harnessing the Wind, Masonville, Colorado, VS: Buckville Publications LLC, 2009.
- [133] University of Wisconsin – Madison, Wind Competition 2017 Technical Report, Wisconsin: University of Wisconsin – Madison, 2017.
- [134] T. Wizelius, Developing Wind Power Projects: Theory and Practice, UK: Earthscan, 2007.
- [135] A. D. en A. A., „An optimal design of coreless direct-drive axial flux permanent magnet generator for wind turbine,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 439, nr. 012039, pp. 1-17, 2013.
- [136] Daan Moreels, „This New Generation of Direct-Drive Electric Machines will Power our Future,” Magnax, 14 juni 2017. [Online]. Available: <https://www.magnax.com/magnax-blog/axial-flux-vs-radial-flux-for-direct-drive-generators>. [Geopend 23 mei 2020].

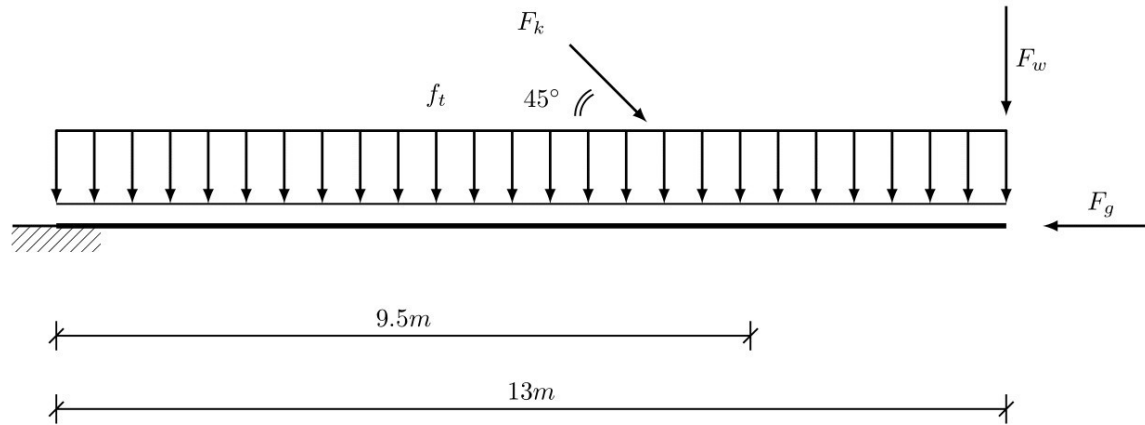
- [137] R. L. Jaffe en W. Taylor, *The Physics of Energy*, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2018.
- [138] EneDrive, „MPPT vs PWM Solar Controllers,” EneDrive, 2014. [Online]. Available: <https://enerdrive.com.au/2014/01/15/mppt-vs-pwm-solar-controllers/>. [Geopend 23 mei 2020].
- [139] WindPMG, „MPPT 12/24/48/110/220V 3KW Wind Solar Controller for Wind PMG,” WindPMG, 21 november 2018. [Online]. Available: http://www.windpmg.com/index.php?main_page=product_info&cPath=4&products_id=5. [Geopend 5 mei 2020].
- [140] M. Mobbs, „Lead acid vs. lithium-ion battery comparison,” Sustainable projects, [Online]. Available: https://static1.squarespace.com/static/55d039b5e4b061baebe46d36/t/56284a92e4b0629aedbb0874/1445481106401/Fact+sheet_Lead+acid+vs+lithium+ion.pdf. [Geopend 23 mei 2020].
- [141] S. Anuphappharadorn, S. Sukchai, C. Sirisamphanwong en N. Ketjoy, „Comparison the Economic Analysis of the Battery between Lithium-ion and Lead-acid in PV Stand-alone Application,” *Energy Procedia*, vol. 56, pp. 352-358, 2014.
- [142] D. Vutetakis, „Applications - Transportation | Aviation: Battery,” in *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, VS, 2013, pp. 174-185.
- [143] Concordia University, „Lead Acid Batteries,” december 2016. [Online]. Available: https://www.concordia.ca/content/dam/concordia/services/safety/docs/EHS-DOC-146_LeadAcidBatteries.pdf. [Geopend 23 mei 2020].
- [144] M. Ragheb, „Safety of wind systems,” in *Wind power systems [cursus]*, Illinois, University of Illinois, 2019, pp. 1-41.
- [145] Schneider Electric, *Gids voor laagspanningsverdeling*, 2012.
- [146] United States Departement of Agriculture, „Soil Temperature Regimes Map,” 8 september 2003. [Online]. Available: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/?cid=nrcs142p2_054019. [Geopend 24 april 2020].
- [147] Compagnie Marocco-Sénégalaise d'Electricité, „Reglément de service du contrat de concession d'électrification rurale de la region de Louga,” Republique du Sénégal, 2017.
- [148] M. F. Alam, S. Saif en H. Ali, *Short circuit current calculation and prevention in high voltage power nets [thesis]*, Blekinge, Sweden: Blekinge Institute of Technology, 2014.
- [149] Schneider Electric, „Generator protection,” Schneider Electric, 20 december 2019. [Online]. Available: https://www.electrical-installation.org/enwiki/Generator_protection. [Geopend 24 mei 2020].
- [150] D. McKeown, „Simple Methods for Calculating Short Circuit Current,” GE Industrial.
- [151] Legrand, „Sizing conductors and selecting protection devices,” Legrand, 2009.
- [152] ACA vzw, *Leidraad voor huishoudelijke installaties*, Roeselare: ACA vzw, 2013.
- [153] FUJIAN YAHENG POWER TECHNOLOGY GROUP CO.,LTD, „6GFM200 12V200Ah,” [Online]. Available: <http://www.yahengpower.com/data/upload/file/201907/01267d10ab9db05d23101b25cad63db5.pdf>. [Geopend 25 april 2020].
- [154] Ultracell, „UCG200-12 12V 200Ah Deep Cycle Gel,” 6 mei 2015. [Online]. Available: <https://www.mobasolar.com/wp-content/uploads/2018/04/Battery-UCG200-12-min.pdf>. [Geopend 25 april 2020].

- [155] Yigitakü, „12V 200Ah Gel Battery,” [Online]. Available: <https://www.yigitaku.com/wp-content/uploads/2016/12/12V-200Ah-Gel-Eng.pdf>. [Geopend 25 april 2020].
- [156] Wisselkoers.be, „cfa_frank,” [Online]. Available: https://www.wisselkoers.be/cfa_frank. [Geopend 24 Maart 2020].
- [157] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, UK: WIT press, 2010.
- [158] Q. Loic, C. Joulain en C. E. Casillas, „1st international e-Conference on Energies,” in *Measuring the Power Curve of a Small-Scale Wind Turbine: A Practical Example*, 2014.
- [159] Global Petrol Prices, „Senegal electricity prices,” Global Petrol Prices, maart 2020. [Online]. Available: https://www.globalpetrolprices.com/Senegal/electricity_prices/. [Geopend 22 mei 2020].
- [160] Fortis Wind Energy, „Fortis Wind Energy Systems Market List Price 2018,” 2018. [Online]. Available: https://www.fortiswindenergy.com/wp-content/uploads/2018/03/Fortis_Wind_Energy_Market_Pricelist_2018_SV.pdf. [Geopend 29 mei 2020].
- [161] S. O. Ani, H. Polinder en J. A. Ferreira, „3rd IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology,” in *Energy Yield of Small Wind Turbines In Low Wind Speed Area*, United States, 2011.
- [162] P. Leppänen, *Small-scale wind power in the arctic region* [thesis], Oulu, Finland: Oulu University of Applied Sciences, 2016.
- [163] K. Henriouille, *Sterkteleer 1* [cursus], Diepenbeek: KULeuven, 2017.
- [164] Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique, „Working group on “Wind Turbine Foundations” Recommendations for the design, calculation, installation and inspection of windturbine foundations,” Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique, Frankrijk, 2011.
- [165] Engineers Edge, „Circular Flat Disk Drag Coefficient and Drag Equation,” Engineers Edge, [Online]. Available: https://www.engineersedge.com/fluid_flow/circular_flat_disk_drag_coefficient_14035.htm. [Geopend 8 mei 2020].

Bijlagen

Bijlage A: Sterkteberekening windmolen	139
Bijlage B: Rapport berekening Diamonds	145
Bijlage C: Technische tekening lat fundering.....	173
Bijlage D: Rapport stabiliteitscontrole toren [0 - 2.186m].....	175
Bijlage E: Technische tekening grote onderplaat.....	181
Bijlage F: Technische tekening driehoeken toren	183
Bijlage G: Technische tekening schuine balk.....	185
Bijlage H: Technische tekening assembly bus schuine balken	187
Bijlage I: Technische tekening onderplaat schuine balken	189
Bijlage J: Technische tekening assembly plaat schuine balken	191
Bijlage K: Sterkteberekening pen voor schuine balk	193
Bijlage L: Technische tekening bevestiging kabels	197
Bijlage M: Sterkteberekening as voor het scharnier	199
Bijlage N: Technische tekening horizontale balk rechttrek	203
Bijlage O: Sterkteberekening schuine balk rechttrek	205
Bijlage P: Technische tekening schuine balk rechttrek	211
Bijlage Q: Iteratieve berekening wieken	213
Bijlage R: Sterkteberekening wieken	215
Bijlage S: Elektrisch schema.....	217
Bijlage T: Handleiding controller	219
Bijlage U: Handleiding invertor	225
Bijlage V: Opbrengst windmolen	233

BIJLAGE A: STERKTEBEREKENING WINDMOLEN



FIGUUR 72: VRIJLICHAASSCHEMA WINDMOLEN ZONDER SCHUINE BALKEN

Zoals vermeld in '4.2 Sterkteberekening' wordt het computationele model van de windmolen vergeleken met een manuele, vereenvoudigde, berekening. Deze berekening gebeurt a.d.h.v. het vrijlichaamsschema in Figuur 72. Het ontwerp van de windmolen is in dit schema 90° gedraaid om plaats te besparen. Er wordt gerekend met de windkracht die volgens de richting van een kabel komt. Als vereenvoudiging wordt er zonder schuine balken gerekend, en wordt er gerekend alsof de inklemming beneden een scharnier is. In de realiteit komt dit geval effectief voor, als de windmolen net rechtgetrokken is, de moeren rond het scharnier nog niet aangedraaid zijn en de schuine balken nog niet geïnstalleerd zijn. De inwerkende krachten zijn berekend in '4.1 Inwerkende krachten'. De kracht f_t is de verdeelde belasting van de wind op de toren ($f_t = 38.6 \text{ N/m}$). De kracht F_w is de kracht op de wieken ($F_w = 970 \text{ N}$). De kracht F_k is de kracht op de kabel. De kracht F_g is gewicht van de windmolen verticaal op de toren (een verdeelde belasting van 156 N/m plus 981 N). In de realiteit is het gewicht van de windmolen een verdeelde belasting, hier wordt het echter afgebeeld alsof het volledige gewicht op de rotor staan. Er wordt begonnen met het krachtenevenwicht uit te rekenen

$$\begin{cases} F_x: F_x + F_k \cdot \cos(45^\circ) - 156 \text{ N/m} \cdot 13\text{m} - 981 \text{ N} = 0 \\ F_y: F_y - F_k \cdot \sin(45^\circ) - 38.6 \text{ N/m} \cdot 13\text{m} - 970 \text{ N} = 0 \\ M_o: 38.6 \text{ N} \cdot \frac{13 \text{ m}^2}{2} + F_k \cdot \sin(45^\circ) \cdot 9.5\text{m} + 970 \text{ N} \cdot 13\text{m} = 0 \end{cases} \quad (155)$$

Dit stelsel uitwerken geeft:

$$\begin{cases} F_x = 4.70 \text{ kN} \\ F_y = -0.20 \text{ kN} \\ F_k = -2.36 \text{ kN} \end{cases} \quad (156)$$

Nu alle krachten op de toren gekend zijn, kan de toren opgedeeld worden in twee snedes (van links naar rechts).

Snede 1 (van het scharnierpunt tot de kabel):

$$N = -F_x + f_{\text{gewicht toren}} \cdot x = -4.70 \text{ kN} + 156 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot x \quad (157)$$

$$V = F_y - f_t \cdot x = -0.20 \text{ kN} - 38.6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot x \quad (158)$$

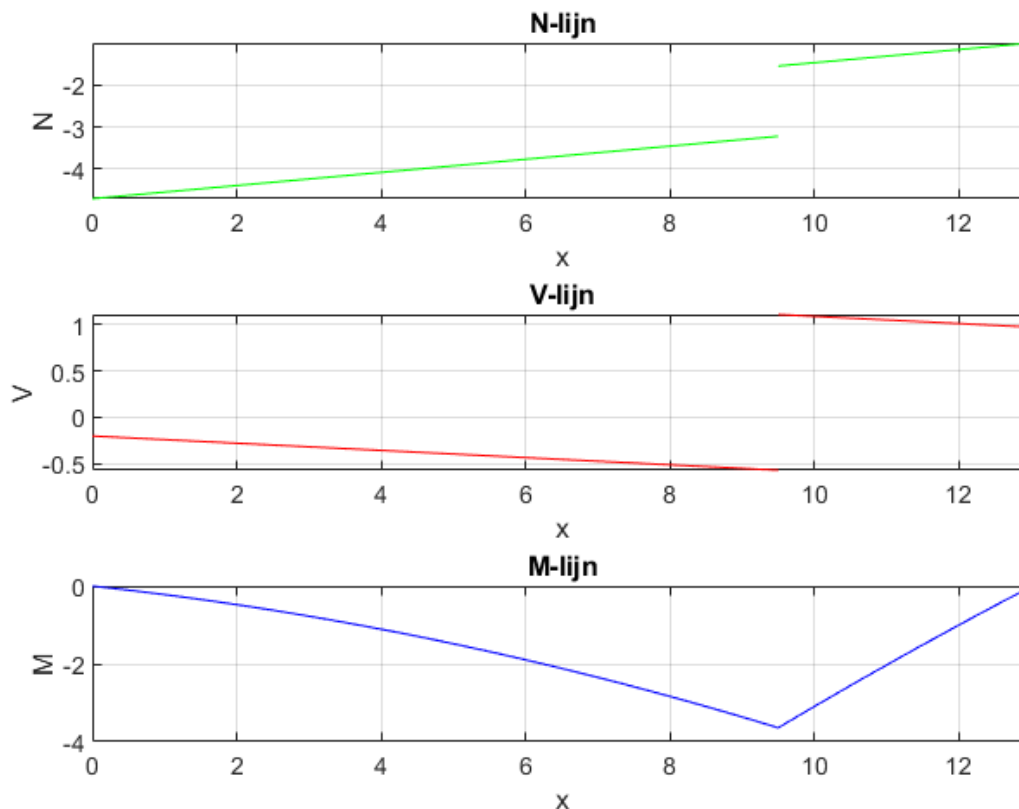
$$M = F_y \cdot x - \frac{f_t \cdot x^2}{2} = -0.20 \text{ kN} \cdot x - \frac{38.6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \cdot x^2}{2} \quad (159)$$

Snede 2 (van de kabel tot de top van de toren):

$$\begin{aligned}
 N &= -F_x + f_{\text{gewicht toren}} * x - F_k * \cos(45^\circ) \\
 &= -4.70 \text{ kN} + 156 \frac{\text{N}}{\text{m}} * x + 2.36 \text{ kN} * \cos(45^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{160}$$

$$V = F_y - f_t * x - F_k * \sin(45^\circ) = -0.20 \text{ kN} - 38.6 \frac{\text{N}}{\text{m}} * x + 2.36 \text{ kN} * \sin(45^\circ)
 \tag{161}$$

$$\begin{aligned}
 M &= F_y * x - \frac{f_t * x^2}{2} - F_k * \sin(45^\circ) * (x - 9.5) \\
 &= -0.20 \text{ kN} * x - \frac{38.6 \frac{\text{N}}{\text{m}} * x^2}{2} + 2.36 \text{ kN} * \sin(45^\circ) * (x - 9.5)
 \end{aligned}
 \tag{162}$$



FIGUUR 73: DE SNEDEKRACHTEN VAN DE TOREN VAN DE INKLEMMING (x=0 M) TOT DE TOP (x=13 M)

Zoals te zien in Figuur 73 is de normaalkracht het grootste op de inklemming beneden. De dwarskracht en het moment zijn maximaal net boven de kabel. Daarom wordt de sterkteberekening op twee punten, op $x = 0 \text{ m}$ en $x = 9.5 \text{ m}$ uitgevoerd. Op de inklemming beneden treedt enkel druk en afschuiving op. Op het punt

Op beide punt treden drie belastingsgevallen op: druk afschuiving en buiging. De drukkracht is op elke plaats van de doorsnede even groot, de afschuifspanning is maximaal op de neutrale lijn en de buiging is het grootste zo ver mogelijk van de neutrale lijn. Daarom worden op beide punten eerst druk en afschuiving opgeteld (op de neutrale lijn), en erna druk en buiging (op de rand van de balk, zo ver mogelijk van de neutrale lijn). Hierna worden de spanningen opgeteld volgens een grensspanningshypothese.

Op de inklemming beneden:

Druk:

De formule voor drukspanning is [81]:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (163)$$

De oppervlakte van de doorsnede van de balk is:

$$A = \frac{\pi * D_{buiten}^2}{4} - \frac{\pi * D_{binnen}^2}{4} = 2.036 * 10^{-3} m^2 \quad (164)$$

De normaalkracht $N = -4.70$ kN. Hieruit volgt dat de drukspanning $\sigma = 2.31$ MPa

Afschuiving:

De formule voor afschuiving is [81]:

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} \quad (165)$$

met:

- τ [Pa]: de schuifspanning,
- V [N]: de inwendige resulterende dwarskracht,
- $Q = \bar{y}' * A'$ [m^3]: waarin A' het bovenste deel van de dwarsdoorsnede is boven de snede waar t wordt gemeten en \bar{y}' de afstand van het zwaartepunt tot de neutrale lijn van A' ,
- I [m^4] het buigtraagheidsmoment van de gehele doorsnede,
- t [m]: de breedte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede.

Vermits de toren een holle buis is kan het buigtraagheidsmoment I geschreven worden als:

$$I = \frac{\pi * D_{buiten}^4}{64} - \frac{\pi * D_{binnen}^4}{64} = 2.98 * 10^{-6} m^4 \quad (166)$$

De breedte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede t is in het geval van een holle cilinder:

$$t = 0.114 m - 0.102 m = 0.012 m \quad (167)$$

Het statisch oppervlaktetraagheidsmoment Q van een holle cilinder kan berekend worden door de doorsnede in twee coaxiale cirkels op te delen, en deze volgens het superpositieverschijnsel van elkaar af te trekken [81]:

De afstand van het zwaartepunt tot de neutrale lijn van A' , \bar{y}' is bij een halve cirkel gelijk aan:

$$\bar{y}' = \frac{4 * r}{3 * \pi} \quad (168)$$

De oppervlakte van het bovenste deel van de dwarsdoorsnede boven de snede waar t wordt gemeten is gelijk aan:

$$A' = \frac{\pi * r^2}{2} \quad (169)$$

Het totale statisch oppervlaktetraagheidsmoment is:

$$Q = \Sigma \bar{y}' A' = \frac{4 * r_{buiten}}{3 * \pi} * \frac{\pi * r_{buiten}^2}{2} - \frac{4 * r_{binnen}}{3 * \pi} * \frac{\pi * r_{binnen}^2}{2} \quad (170)$$

Met $r_{\text{buiten}} = 0.057 \text{ m}$ en $r_{\text{binnen}} = 0.051 \text{ m}$ Kan berekend worden dat het statisch oppervlaktetraagheidsmoment $Q = 3.50 * 10^{-5} \text{ m}^3$. Deze variabelen kunnen ingevuld worden in de formule voor afschuifspanning:

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} = \frac{0.2 * 10^3 \text{ N} * 3.50 * 10^{-5} \text{ m}^3}{2.98 * 10^{-6} \text{ m}^4 * 0.012 \text{ m}} = 0.20 \text{ MPa} \quad (171)$$

Nu de drukspanning en afschuifspanning op de rand van de buis gekend zijn, kunnen deze spanningen opgeteld worden om de totale spanning te kennen. Deze worden opgeteld m.b.v. de grensspanningshypothese van Hüber, Hencky en Von Mises. Volgens deze hypothese kunnen de spanningen opgeteld worden naar een ideale spanning σ_i [163]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = \sqrt{(2.31 \text{ MPa})^2 + 3 * (0.2 \text{ MPa})^2} = 2.34 \text{ MPa} \quad (172)$$

Deze spanning is veel lager dan de toelaatbare spanning van S235: 235 MPa. Aan de inklemming kan de toren dus al de krachten opvangen.

Ter hoogte van de kabel treden zowel drukspanning, afschuifspanning en buiging op. Eerst wordt de spanning in het midden van de doorsnede, ter hoogte van de neutrale lijn, bepaald (druk en afschuifspanning). Hierna wordt de spanning op de rand van de doorsnede, zo ver mogelijk van de neutrale lijn, bepaald (druk en buiging). Deze beide berekeningen worden zowel net onder- als net boven de kabel uitgevoerd.

Net onder de kabel:

Druk:

$$\sigma = \frac{-3.22 \text{ kN}}{2.036 * 10^{-3} \text{ m}^2} = -1.58 \text{ MPa} \quad (173)$$

Afschuiving

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} = \frac{0.57 * 10^3 \text{ N} * 3.50 * 10^{-5} \text{ m}^3}{2.98 * 10^{-6} \text{ m}^4 * 0.012 \text{ m}} = 0.067 \text{ MPa} \quad (174)$$

Buiging

De formule voor buiging is [81]:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (175)$$

met:

- σ [Pa]: de normaalspanning,
- M [Nm]: het resulterende inwendige moment,
- y [m]: de loodrechte afstand van de neutrale lijn tot het punt waar de buigspanning bepaald wordt,
- I [m^4]: het buigtraagheidsmoment.

De maximale waarde van $y = 0.057 \text{ m}$. Het buigtraagheidsmoment $I = 2.98 * 10^{-6} \text{ m}^4$, zoals berekend bij schuifspanning.

De buigspanning is gelijk aan:

$$\sigma = \frac{-3.64 * 10^3 \text{ Nm} * 0.057 \text{ m}}{2.98 * 10^{-6} \text{ m}^4} = -69.6 \text{ MPa} \quad (176)$$

Op de rand van de doorsnede is de totale spanning:

$$\sigma_{\text{totaal}} = \sigma_{\text{druk}} + \sigma_{\text{buiging}} = -1.58 \text{ MPa} - 69.6 \text{ MPa} = -71.18 \text{ MPa} \quad (177)$$

In het midden van de doorsnede is de totale spanning:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = \sqrt{(1.58 \text{ MPa})^2 + 3 * (0.067 \text{ MPa})^2} = 1.58 \text{ MPa} \quad (178)$$

Deze spanningen blijven allemaal ver onder de maximum toegelaten spanning.

Net boven de kabel:

Druk:

$$\sigma = \frac{-1.55 \text{ kN}}{2.036 * 10^{-3} \text{ m}^2} = -1.58 \text{ MPa} \quad (179)$$

Afschuiving

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} = \frac{1.10 * 10^3 \text{ N} * 3.50 * 10^{-5} \text{ m}^3}{2.98 * 10^{-6} \text{ m}^4 * 0.012 \text{ m}} = 1.07 \text{ MPa} \quad (180)$$

Buiging

De formule voor buiging is [81]:

$$\sigma = \frac{-3.64 * 10^3 \text{ Nm} * 0.057 \text{ m}}{2.98 * 10^{-6} \text{ m}^4} = -69.6 \text{ MPa} \quad (181)$$

Op de rand van de doorsnede is de totale spanning:

$$\sigma_{\text{totaal}} = \sigma_{\text{druk}} + \sigma_{\text{buiging}} = -1.58 \text{ MPa} - 69.6 \text{ MPa} = -71.18 \text{ MPa} \quad (182)$$

In het midden van de doorsnede is de totale spanning:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = \sqrt{(1.58 \text{ MPa})^2 + 3 * (1.07 \text{ MPa})^2} = 2.44 \text{ MPa} \quad (183)$$

Deze spanningen blijven allemaal ver onder de maximum toegelaten spanning.

Op het tegenovergestelde deel van de balk is de spanning even groot maar negatief. Nu de spanningen bij de drie belastingsgevallen berekend zijn, kunnen deze spanningen opgeteld worden om de totale spanning te kennen. Eerst worden druk en afschuiving opgeteld m.b.v. de grensspanningshypothese van Hüber, Hencky en Von Mises. Volgens deze hypothese kunnen de spanningen opgeteld worden naar een ideële spanning σ_i [163]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = \sqrt{(11.7 \text{ MPa})^2 + 3 * (2.0 \text{ MPa})^2} = 12.2 \text{ MPa} \quad (184)$$

De spanningen van veroorzaakt door druk en buiging kunnen algebraïsch opgeteld worden. Hiervoor wordt de negatieve buigspanning gebruikt (vermits drukspanning ook negatief is, en zo de grootste spanning kan bepaald worden):

$$\sigma_{\text{totaal}} = \sigma_{\text{druk}} + \sigma_{\text{buiging}} = -11.7 \text{ MPa} - 67.0 \text{ MPa} = -78.7 \text{ MPa} \quad (185)$$

De eerste totale spanning is véél kleiner dan de vloeigrens van S235 staal: 235 MPa. De tweede spanning is bijna 3 keer kleiner dan deze vloeigrens. Het kantelmechanisme kan alle inwerkende krachten dus weerstaan.

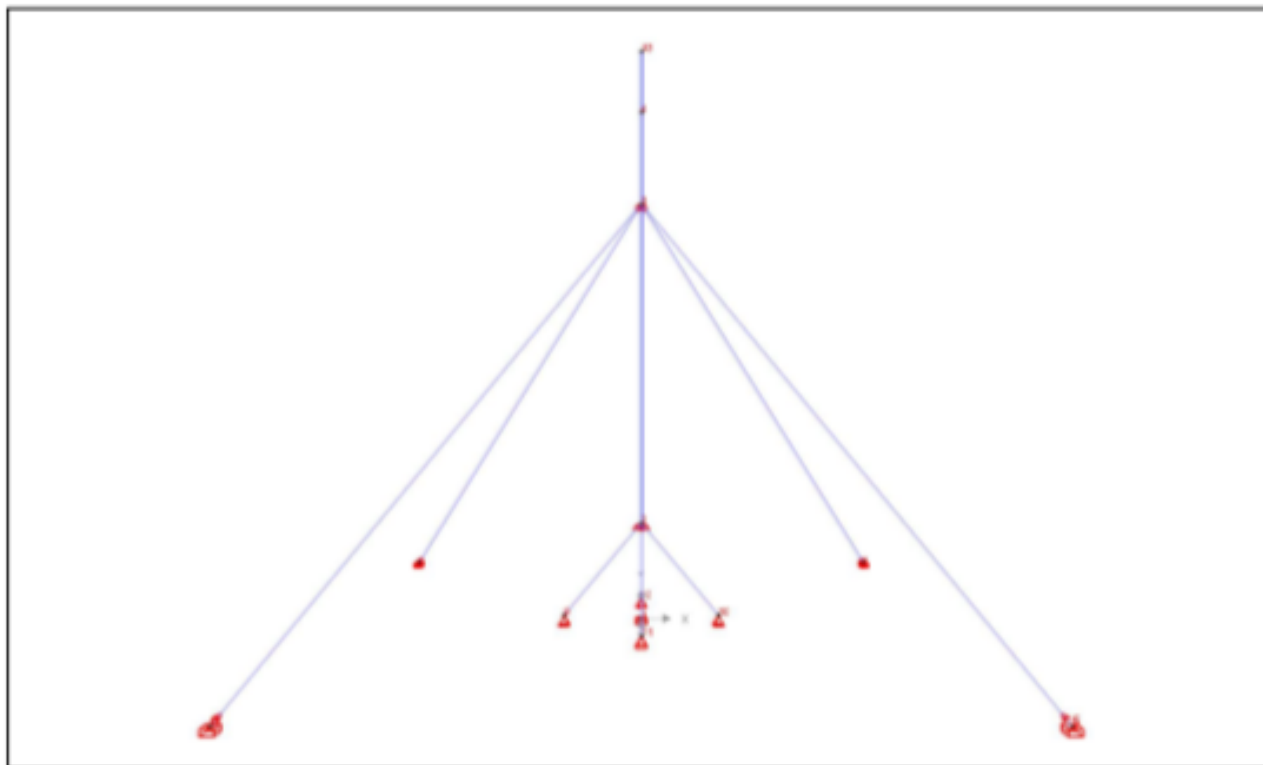
1 Software informatie

Structuur gemodelleerd met Diamonds Versie 2019.3.0.0

Structuur berekend met Buildsoft Server Versie 1.0.0.0

Berekeningsnota afgeprint met Diamonds Versie 2019.3.0.0

2 Geometrie voorstelling (m)



3 Geometrie gegevens

3.1 Punten

punt	Label	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ondersteuning (kN/m,kNm/Rad)	Naam van de verbinding	Commentaar
1	-	0,000	0,000	0,000	lx;ly;lz Rlx;Rly;Rlz	-	-
2	-	0,000	2,188	0,000	vrij	-	-
3	-	0,000	9,500	0,000	vrij	-	-
4	-	0,000	11,800	0,000	vrij	-	-
5	-	6,720	0,000	6,720	lx;ly;lz Rlx;Rly;Rlz	-	-
6	-	-6,720	0,000	6,720	lx;ly;lz Rlx;Rly;Rlz	-	-
7	-	-6,720	0,000	-6,720	lx;ly;lz Rlx;Rly;Rlz	-	-
8	-	6,720	0,000	-6,720	lx;ly;lz Rlx;Rly;Rlz	-	-
9	-	-1,768	0,075	0,000	lx;ly;lz	-	-
10	-	1,768	0,075	0,000	lx;ly;lz	-	-

11	-	0,000	0,075	1,768	kx;ky;kz	-	-
12	-	0,000	0,075	-1,768	kx;ky;kz	-	-
13	-	0,000	13,000	0,000	vrij	-	-

3.2 Staven

staaf	Label	begin knoop	einde knoop	doorsnede	begin doorsnede knoop	einde doorsnede knoop	materiaal	lengte (m)	volume (m ³)
1	-	1	2	PIPE 100x4,5 [M]	2	1	Staal S235	2,186	0,0045
2	-	2	3	PIPE 100x4,5 [M]	3	2	Staal S235	7,314	0,0149
3	-	3	4	PIPE 100x4,5 [M]	4	3	Staal S235	2,100	0,0043
4	-	3	5	Stalen kabel	5	3	Staal S235	13,438	0,0007
5	-	6	3	Stalen kabel	3	6	Staal S235	13,438	0,0007
6	-	7	3	Stalen kabel	3	7	Staal S235	13,438	0,0007
7	-	3	8	Stalen kabel	8	3	Staal S235	13,438	0,0007
8	-	9	2	SHS 80x80x3	2	9	Staal S235	2,754	0,0025
9	-	2	10	SHS 80x80x3	10	2	Staal S235	2,754	0,0025
10	-	11	2	SHS 80x80x3	2	11	Staal S235	2,754	0,0025
11	-	12	2	SHS 80x80x3	2	12	Staal S235	2,754	0,0025
12	-	4	13	PIPE 100x3,6	13	4	Staal S235	1,400	0,0018
totaal								77,764	0,0380

staaf	orientatie (°)	stijfheid begin (kN/m,kNm/Rad)	stijfheid einde (kN/m,kNm/Rad)	gewicht / lengte (kg/m)	gewicht (kg)	gewicht praktische wapening (kg)	schilder oppervlak (m ²)
1	0,0	stijf	stijf	16,0	34,9	-	0,785
2	0,0	stijf	stijf	16,0	116,9	-	2,626
3	0,0	stijf	stijf	16,0	33,6	-	0,754
4	0,0	trekstaaf	trekstaaf	0,4	5,3	-	0,337
5	0,0	trekstaaf	trekstaaf	0,4	5,3	-	0,337
6	0,0	trekstaaf	trekstaaf	0,4	5,3	-	0,337
7	0,0	trekstaaf	trekstaaf	0,4	5,3	-	0,337
8	0,0	stijf	Rky' = 0,0 Rkz' = 0,0 Rkx' = 0,0 kx' = 0,0	7,1	19,5	-	0,853

9	0,0	Rky' = 0,0 Rkz' = 0,0 Rkx' = 0,0 kx' = 0,0	stijf	7,1	19,5	-	0,853
10	0,0	stijf	Rky' = 0,0 Rkz' = 0,0 Rkx' = 0,0 kx' = 0,0	7,1	19,5	-	0,853
11	0,0	stijf	Rky' = 0,0 Rkz' = 0,0 Rkx' = 0,0 kx' = 0,0	7,1	19,5	-	0,853
12	0,0	stijf	stijf	9,8	13,8	-	0,503
totaal					298,2	0,0	9,429

staaf	ondersteuning (kN/m/m, kNm/rad/m)	Kniklengte		Kiplengte	
		om y' (u) (m)	om z' (v) (m)	z>0 (m)	z<0 (m)
1	-	26,015	26,015	[0,000m - 2,186m]	[0,000m - 2,186m]
2	-	26,015	26,015	[0,000m - 7,314m]	[0,000m - 7,314m]
3	-	26,015	26,015	[0,000m]	[0,000m]
4	-	13,438	13,438	[0,000m - 13,438m]	[0,000m - 13,438m]
5	-	13,438	13,438	[0,000m - 13,438m]	[0,000m - 13,438m]
6	-	13,438	13,438	[0,000m - 13,438m]	[0,000m - 13,438m]
7	-	13,438	13,438	[0,000m - 13,438m]	[0,000m - 13,438m]
8	-	59,887	59,887	[0,000m - 2,754m]	[0,000m - 2,754m]
9	-	59,887	59,887	[0,000m - 2,754m]	[0,000m - 2,754m]
10	-	59,887	59,887	[0,000m - 2,754m]	[0,000m - 2,754m]
11	-	59,887	59,887	[0,000m - 2,754m]	[0,000m - 2,754m]
12	-	20,881	20,881	*	*
totaal					

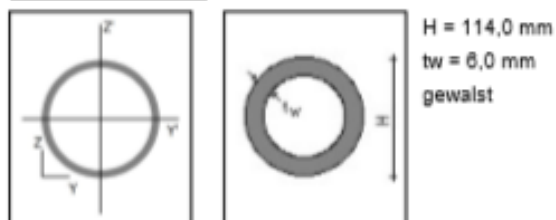
staaf	Brandcurve	Vereiste brandweerstand (min)	Beschermmateriaal	Dikte bescherming (mm)	Toevallige excentriciteit (mm)	Commentaar
1	-	30,000	-	-	-	-
2	-	30,000	-	-	-	-
3	-	30,000	-	-	-	-

4	-	30,000	-	-	-	-
5	-	30,000	-	-	-	-
6	-	30,000	-	-	-	-
7	-	30,000	-	-	-	-
8	-	30,000	-	-	-	-
9	-	30,000	-	-	-	-
10	-	30,000	-	-	-	-
11	-	30,000	-	-	-	-
12	-	30,000	-	-	-	-
totaal						

4 Doorsnede gegevens

4.1 PIPE (INDIA) - PIPE 100x4,5 [MODIFIED]

4.1.1 Dimensies



4.1.2 Eigenschappen

ALGEMEEN

	default
Oppervlakte (mm ²)	2035,8
COG y (mm)	56,8
COG z (mm)	56,8
SC y (mm)	56,8
SC z (mm)	56,8
λ_u (-)	1,995
λ_v (-)	1,995

ELASTISCH

	default
--	---------

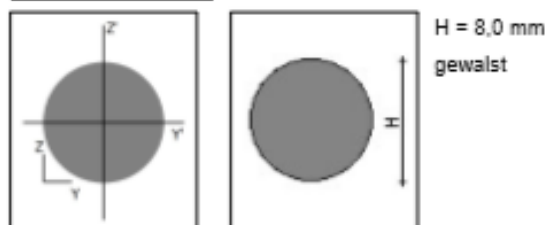
Sy (mm ²)	115623
Sz (mm ²)	115623
Iy (mm ⁴)	2977287
Iz (mm ⁴)	2977287
Iyz (mm ⁴)	0
iy (mm)	38,2
iz (mm)	38,2
It (mm ⁴)	5954575
Iw (mm ⁴)	0
Twm (mm ²)	104466
Wel,y,t (mm ²)	52421
Wel,y,b (mm ²)	52421
Wel,z,l (mm ²)	52421
Wel,z,r (mm ²)	52421

PLASTISCH

	default
Avy (mm ²)	1296,0
Avz (mm ²)	1296,0
Wpl,y (mm ²)	70056
Wpl,u (mm ²)	70056
Wpl,v (mm ²)	70056

4.2 Stalen kabel

4.2.1 Dimensies



4.2.2 Eigenschappen

ALGEMEEN

	default
Oppervlakte (mm ²)	50,3
COG y (mm)	4,0
COG z (mm)	4,0
SC y (mm)	4,0
SC z (mm)	4,0
λ_u (-)	1,333
λ_v (-)	1,333

ELASTISCH

	default
--	---------

Sy (mm ⁴)	200
Sz (mm ⁴)	200
Iy (mm ⁴)	201
Iz (mm ⁴)	201
Iyz (mm ⁴)	0
iy (mm)	2,0
iz (mm)	2,0
It (mm ⁴)	402
Iw (mm ⁴)	0
Twm (mm ⁴)	101
Wel.y,t (mm ⁴)	50
Wel.y,b (mm ⁴)	50
Wel.z,l (mm ⁴)	50
Wel.z,r (mm ⁴)	50

PLASTISCH

	default
Avy (mm ²)	50,3
Avz (mm ²)	50,3
Wpl.y (mm ²)	85
Wpl.u (mm ²)	85
Wpl.v (mm ²)	85

4.3 Stalen kabel

4.3.1 Dimensies



4.3.2 Eigenschappen

ALGEMEEN

	default
Oppervlakte (mm ²)	50,3
COG y (mm)	4,0
COG z (mm)	4,0
SC y (mm)	4,0
SC z (mm)	4,0
λ_u (-)	1,333
λ_v (-)	1,333

ELASTISCH

	default
--	---------

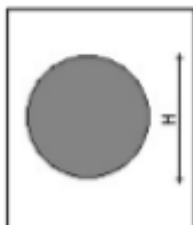
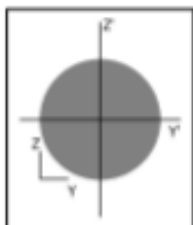
Sy (mm ⁴)	200
Sz (mm ⁴)	200
Iy (mm ⁴)	201
Iz (mm ⁴)	201
Iyz (mm ⁴)	0
iy (mm)	2,0
iz (mm)	2,0
It (mm ⁴)	402
Iw (mm ⁴)	0
Twm (mm ⁴)	101
Wel,y,t (mm ⁴)	50
Wel,y,b (mm ⁴)	50
Wel,z,l (mm ⁴)	50
Wel,z,r (mm ⁴)	50

PLASTISCH

	default
Avy (mm ²)	50,3
Avz (mm ²)	50,3
Wpl,y (mm ³)	85
Wpl,u (mm ³)	85
Wpl,v (mm ³)	85

4.4 Stalen kabel

4.4.1 Dimensies



H = 8,0 mm
gewalst

4.4.2 Eigenschappen

ALGEMEEN

	default
Oppervlakte (mm ²)	50,3
COG y (mm)	4,0
COG z (mm)	4,0
SC y (mm)	4,0
SC z (mm)	4,0
λ_u (-)	1,333
λ_v (-)	1,333

ELASTISCH

	default
--	---------

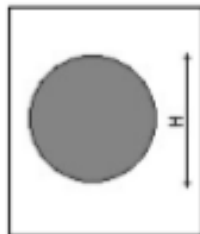
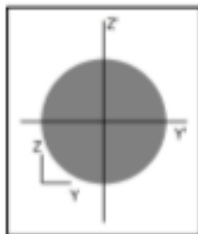
Sy (mm ²)	200
Sz (mm ²)	200
Iy (mm ⁴)	201
Iz (mm ⁴)	201
Iyz (mm ⁴)	0
iy (mm)	2,0
iz (mm)	2,0
It (mm ⁴)	402
Iw (mm ⁴)	0
Twm (mm ²)	101
Wel,y,t (mm ²)	50
Wel,y,b (mm ²)	50
Wel,z,l (mm ²)	50
Wel,z,r (mm ²)	50

PLASTISCH

	default
Avy (mm ²)	50,3
Avz (mm ²)	50,3
Wpl,y (mm ²)	85
Wpl,u (mm ²)	85
Wpl,v (mm ²)	85

4.5 Stalen kabel

4.5.1 Dimensies



H = 8,0 mm
gewalst

4.5.2 Eigenschappen

ALGEMEEN

	default
Oppervlakte (mm ²)	50,3
COG y (mm)	4,0
COG z (mm)	4,0
SC y (mm)	4,0
SC z (mm)	4,0
λ_u (-)	1,333
λ_v (-)	1,333

ELASTISCH

	default
--	---------

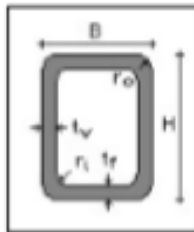
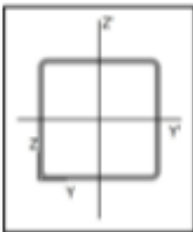
Sy (mm ⁴)	200
Sz (mm ⁴)	200
Iy (mm ⁴)	201
Iz (mm ⁴)	201
Iyz (mm ⁴)	0
iy (mm)	2,0
iz (mm)	2,0
It (mm ⁴)	402
Iw (mm ⁴)	0
Twm (mm ⁴)	101
Wel.y,t (mm ⁴)	50
Wel.y,b (mm ⁴)	50
Wel.z,l (mm ⁴)	50
Wel.z,r (mm ⁴)	50

PLASTISCH

	default
Avy (mm ³)	50,3
Avz (mm ³)	50,3
Wpl.y (mm ³)	85
Wpl.u (mm ³)	85
Wpl.v (mm ³)	85

4.6 SHS (EU) - SHS 80x80x3

4.6.1 Dimensies



B = 80,0 mm
H = 80,0 mm
tf = 3,0 mm
tw = 3,0 mm
ri = 3,0 mm
ro = 6,0 mm
gewalst

4.6.2 Eigenschappen

ALGEMEEN

	default
Oppervlakte (mm ²)	900,8
COG y (mm)	40,0
COG z (mm)	40,0
SC y (mm)	40,0
SC z (mm)	40,0
λu (-)	2,203
λv (-)	2,203

ELASTISCH

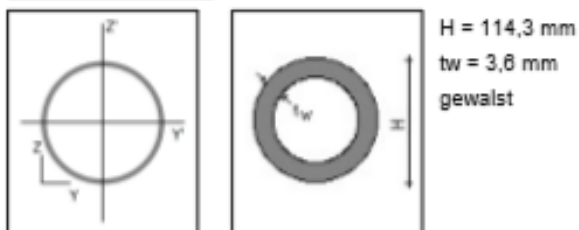
	default
Sy (mm ⁴)	36031
Sz (mm ⁴)	36031
Iy (mm ⁴)	878368
Iz (mm ⁴)	878368
Iyz (mm ⁴)	0
iy (mm)	31,2
iz (mm)	31,2
It (mm ⁴)	1396612
Iw (mm ⁴)	0
Twm (mm ³)	35470
Wel.y,t (mm ³)	21959
Wel.y,b (mm ³)	21959
Wel.z,l (mm ³)	21959
Wel.z,r (mm ³)	21959

PLASTISCH

	default
Avy (mm ²)	450,4
Avz (mm ²)	450,4
Wpl.y (mm ³)	25778
Wpl,u (mm ³)	25778
Wpl,v (mm ³)	25778

4.7 PIPE (INDIA) - PIPE 100x3,6

4.7.1 Dimensies



4.7.2 Eigenschappen

ALGEMEEN

	default
Oppervlakte (mm ²)	1251,4
COG y (mm)	57,2
COG z (mm)	57,2
SC y (mm)	57,2
SC z (mm)	57,2
λ_u (-)	2,072
λ_v (-)	2,072

ELASTISCH

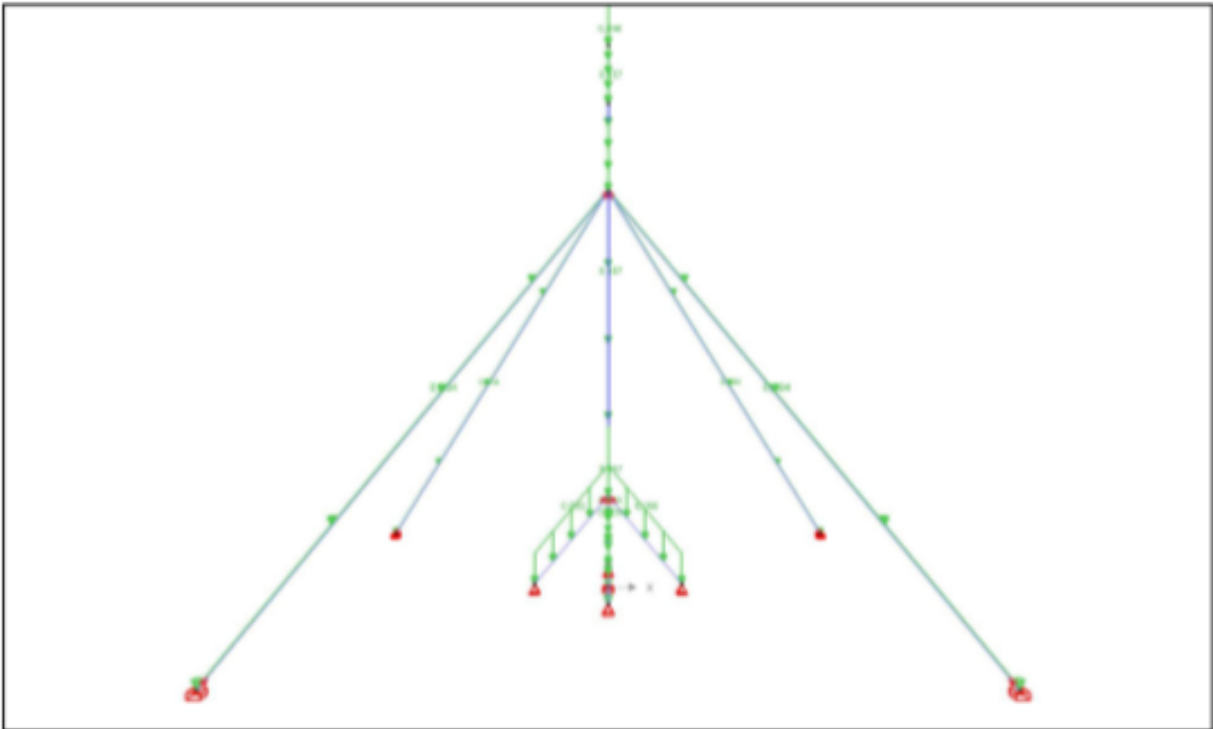
	default
Sy (mm ²)	71518
Sz (mm ²)	71518
Iy (mm ⁴)	1918083
Iz (mm ⁴)	1918083
Iyz (mm ⁴)	0
iy (mm)	39,2
iz (mm)	39,2
It (mm ⁴)	3839674
Iw (mm ⁴)	0
Twm (mm ²)	67186
Wel,y,t (mm ²)	33562
Wel,y,b (mm ²)	33562
Wel,z,l (mm ²)	33562
Wel,z,r (mm ²)	33562

PLASTISCH

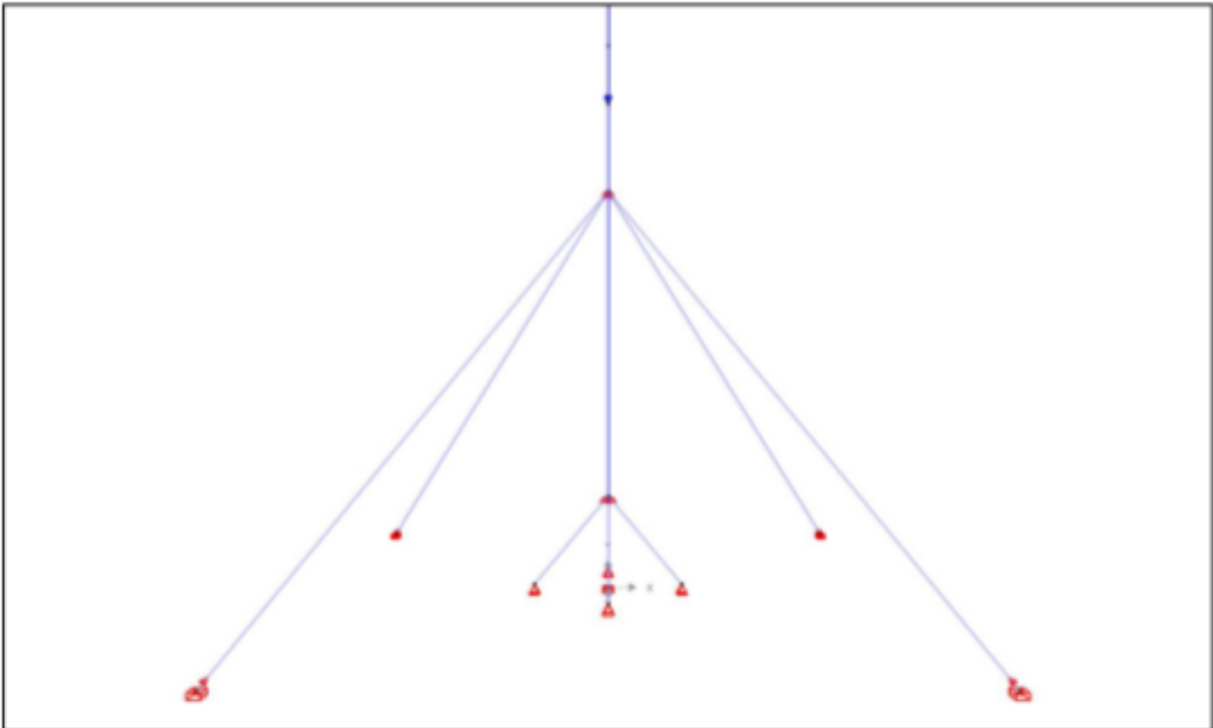
	default
Avy (mm ²)	796,7
Avz (mm ²)	796,7
Wpl,y (mm ²)	44101
Wpl,u (mm ²)	44101
Wpl,v (mm ²)	44101

5 Voorstelling lasten (kN, kNm, mm, kN/m, kNm/m, kN/m²)

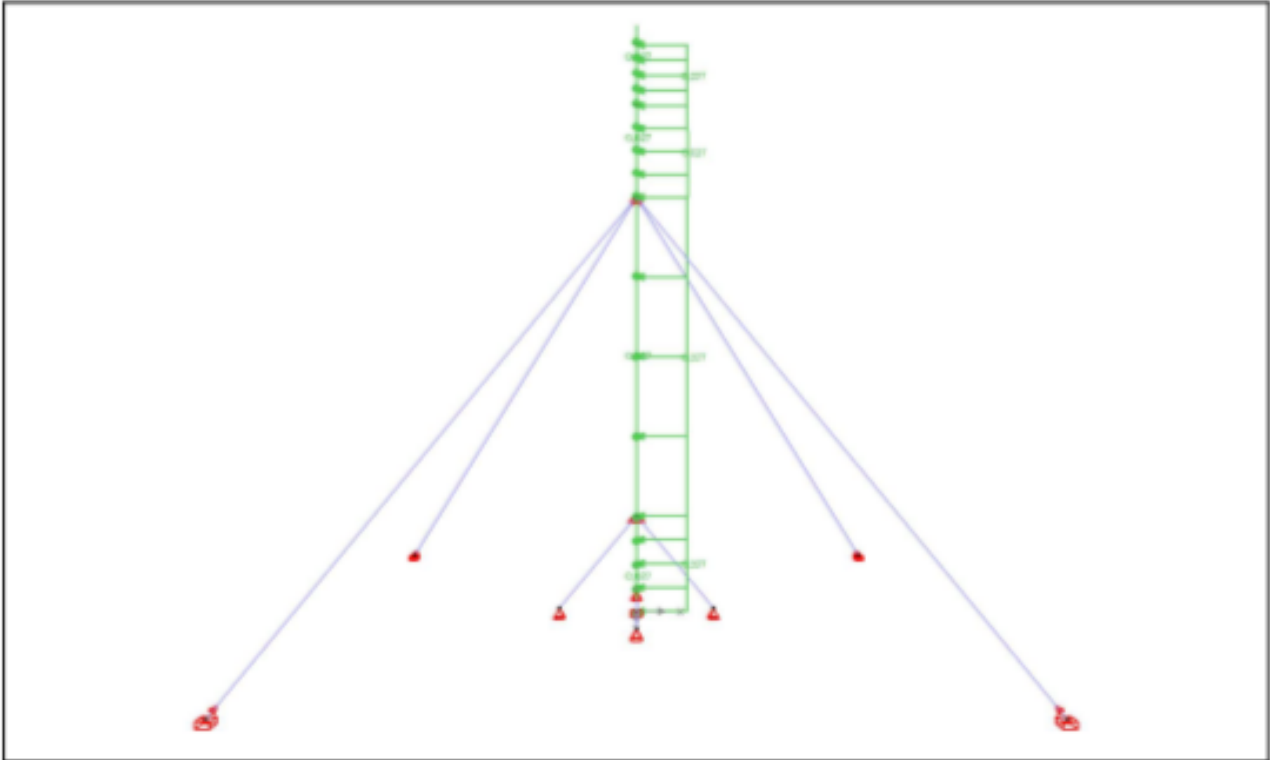
5.1 Eigengewicht



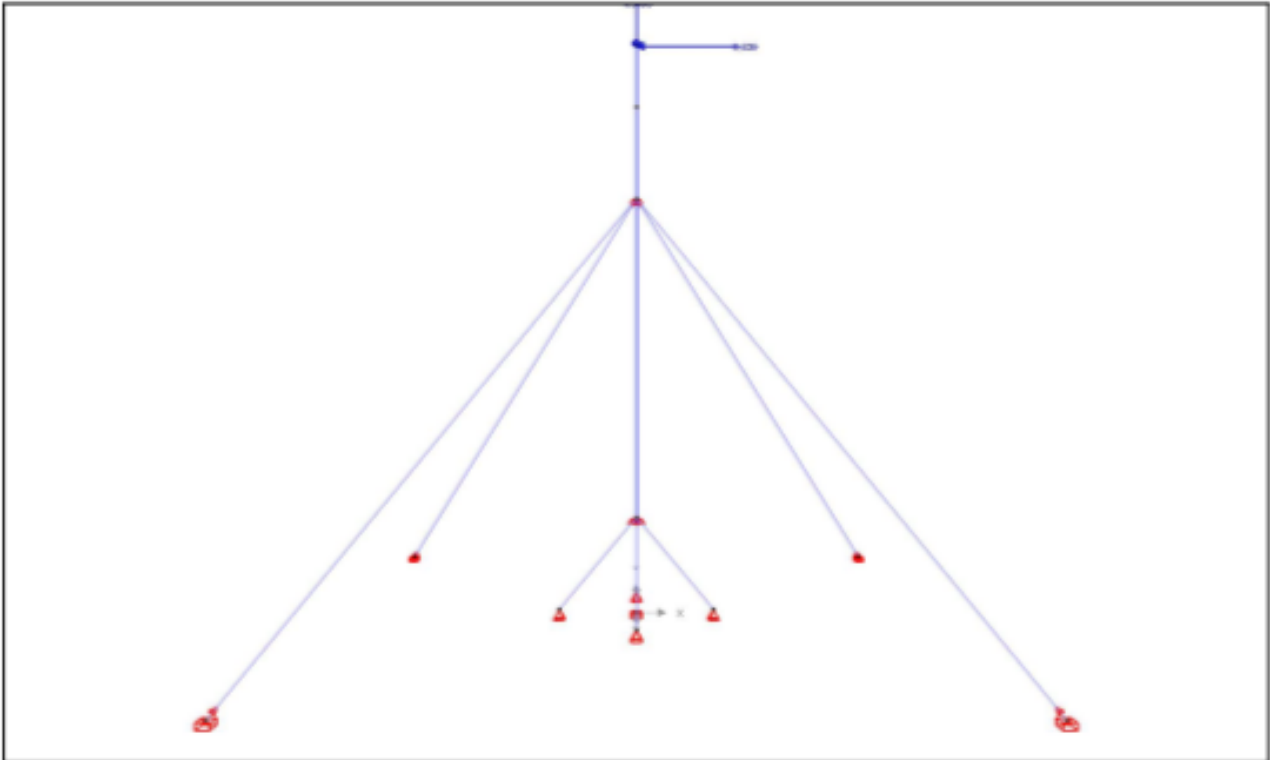
5.2 massa generator



5.3 Wind



5.4 windbelasting wieken



6 Gegevens lasten

6.1 Eigengewicht

6.1.1 Staven

staaf	Label	begin knoop last	einde knoop last	belastingstype	begin	einde	eenheid	afstand van het begin (m)	afstand van het einde (m)	orientatie
1	-	1	2	Verdeelde last	0,157	0,157	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
2	-	2	3	Verdeelde last	0,157	0,157	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
3	-	3	4	Verdeelde last	0,157	0,157	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
4	-	3	5	Verdeelde last	0,004	0,004	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
5	-	6	3	Verdeelde last	0,004	0,004	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
6	-	7	3	Verdeelde last	0,004	0,004	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
7	-	3	8	Verdeelde last	0,004	0,004	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
8	-	9	2	Verdeelde last	0,069	0,069	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
9	-	2	10	Verdeelde last	0,069	0,069	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
10	-	11	2	Verdeelde last	0,069	0,069	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
11	-	12	2	Verdeelde last	0,069	0,069	kN/m	0,000	0,000	globaal Y
12	-	4	13	Verdeelde last	0,096	0,096	kN/m	0,000	0,000	globaal Y

6.2 massa generator

6.2.1 Punten

knoop	Label	belastingstype	x waarde (mm,kN,kNm)	y waarde (mm,kN,kNm)	z waarde (mm,kN,kNm)
3	-	kracht	0,000	0,000	0,000
4	-	kracht	0,000	0,981	0,000

6.3 Wind

6.3.1 Staven

staaf	Label	begin knoop last	einde knoop last	belastingstype	begin	einde	eenheid	afstand van het begin (m)	afstand van het einde (m)	orientatie
1	-	1	2	Verdeelde last	0,027	0,027	kN/m	0,000	0,000	globaal X
1	-	1	2	Verdeelde last	0,027	0,027	kN/m	0,000	0,000	globaal Z
2	-	2	3	Verdeelde last	0,027	0,027	kN/m	0,000	0,000	globaal X
2	-	2	3	Verdeelde last	0,027	0,027	kN/m	0,000	0,000	globaal Z
3	-	3	4	Verdeelde last	0,027	0,027	kN/m	0,000	0,000	globaal X
3	-	3	4	Verdeelde last	0,027	0,027	kN/m	0,000	0,000	globaal Z
12	-	4	13	Verdeelde last	0,027	0,027	kN/m	0,000	0,000	globaal X
12	-	4	13	Verdeelde last	0,027	0,027	kN/m	0,000	0,000	globaal Z

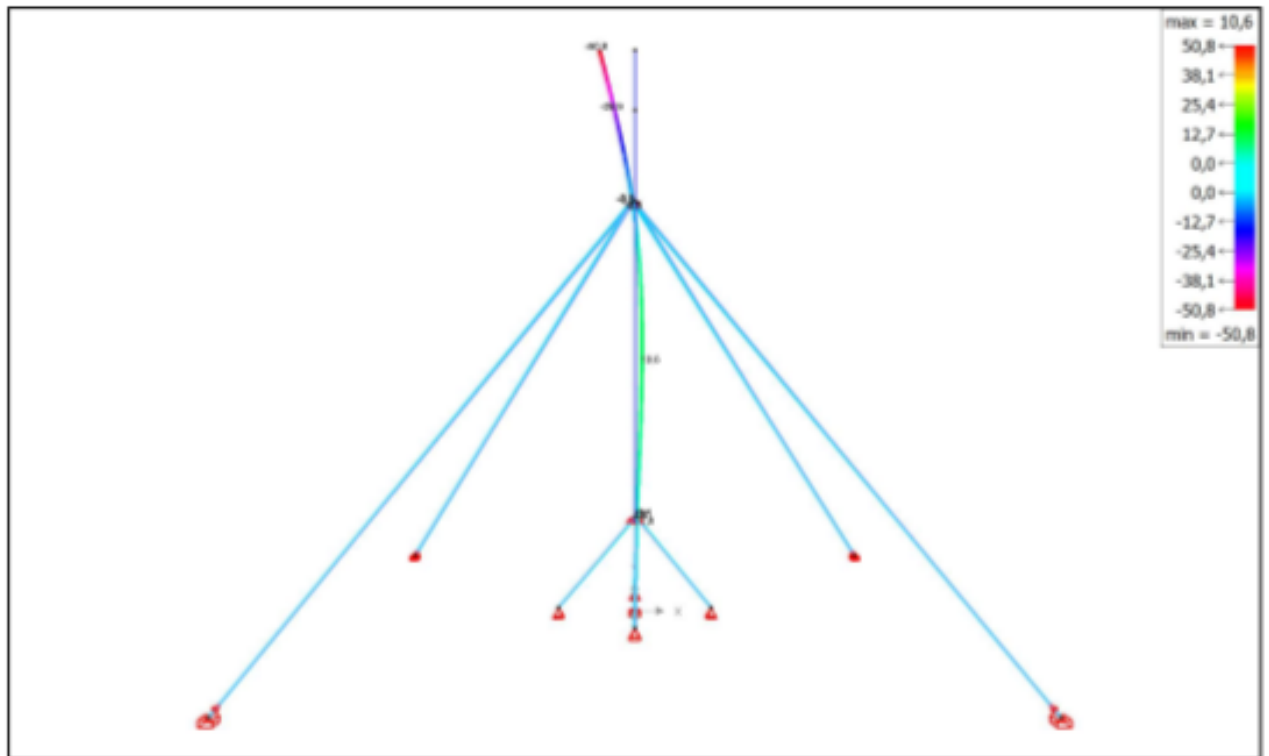
6.4 windbelasting wieken

6.4.1 Punten

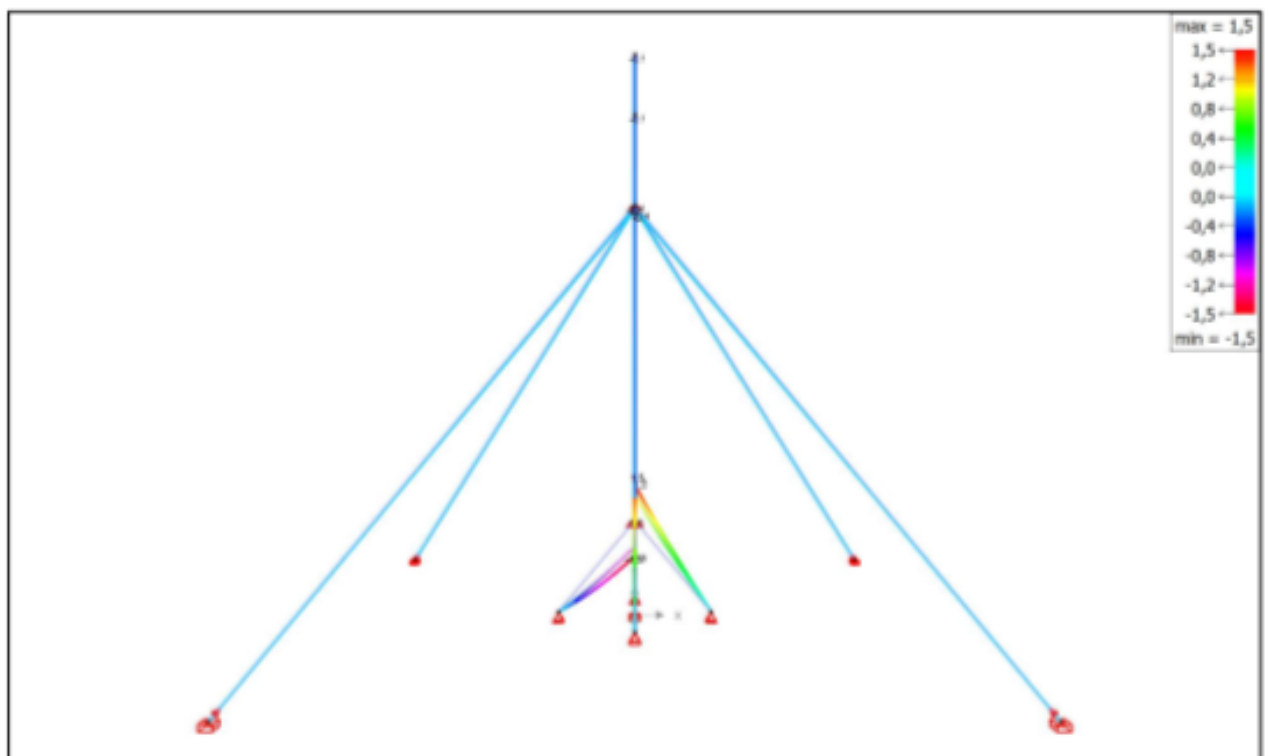
knoop	Label	belastingstype	x waarde (mm,kN,kNm)	y waarde (mm,kN,kNm)	z waarde (mm,kN,kNm)
3	-	kracht	0,000	0,000	0,000
4	-	kracht	0,000	0,000	0,000
13	-	kracht	0,639	0,000	0,639

7 Voorstelling algemene resultaten

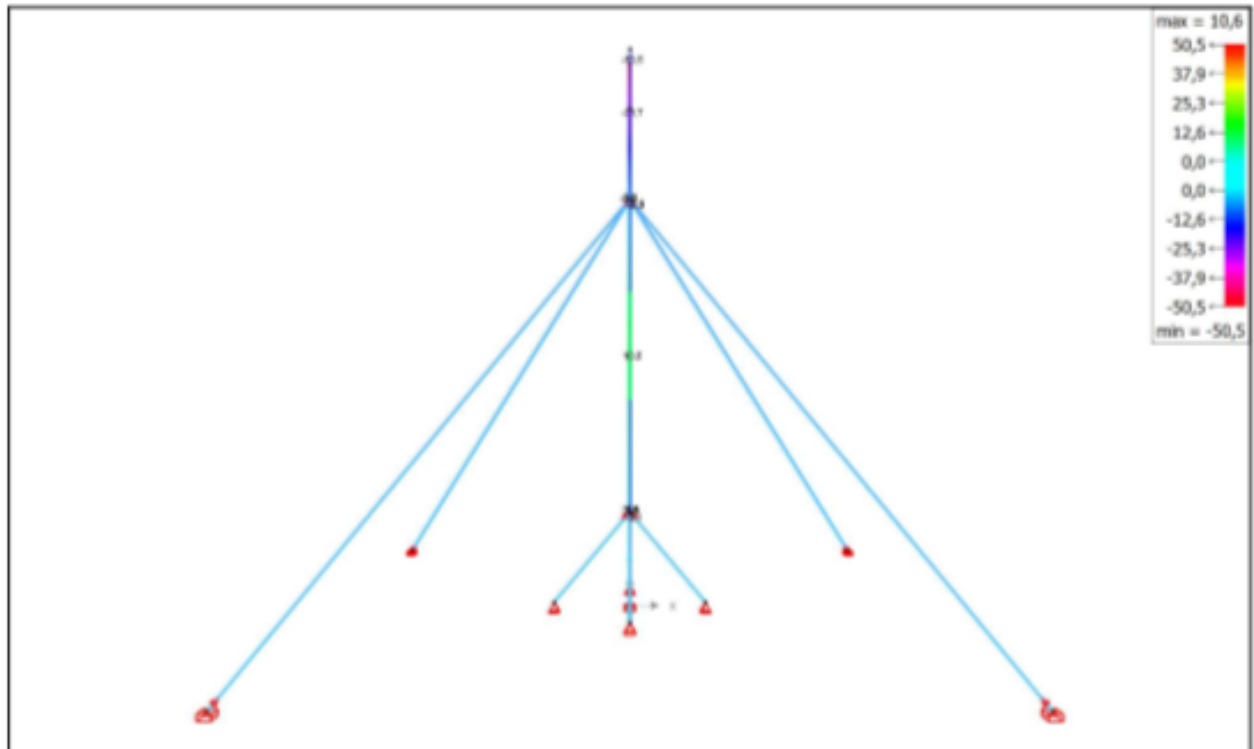
7.1 δx (mm) - UGT FC Omhullende



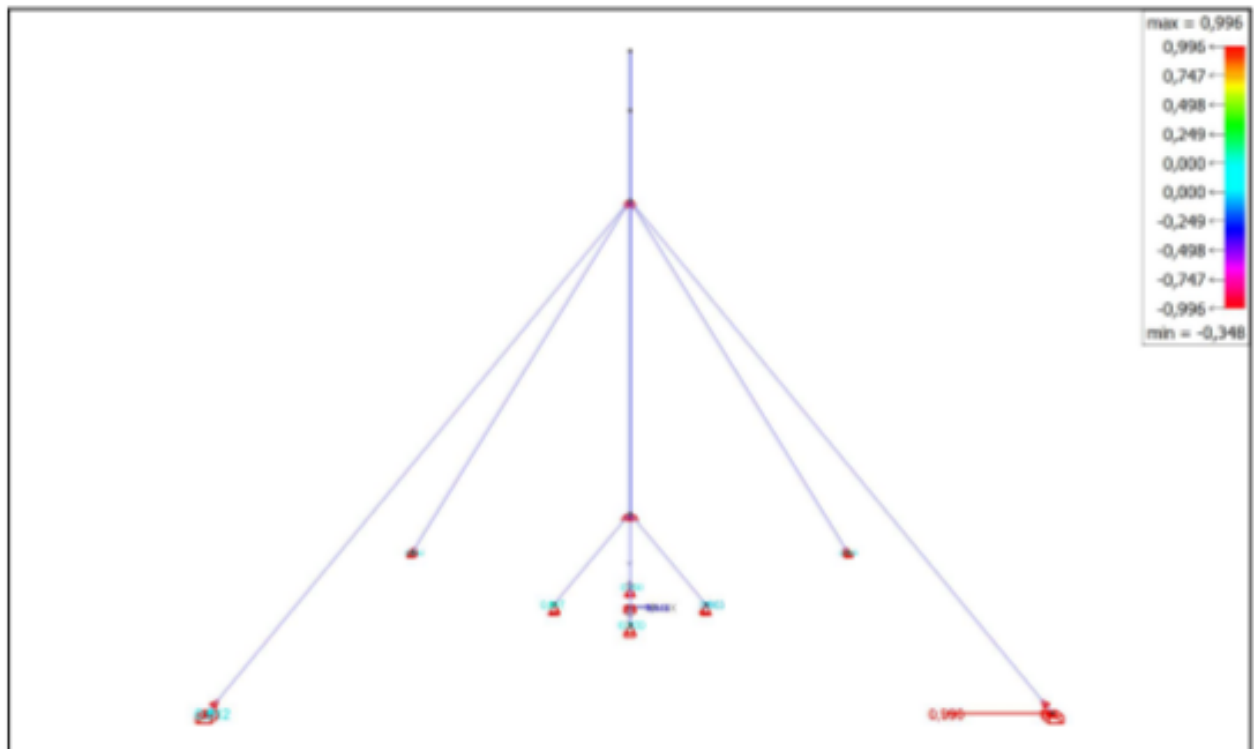
7.2 δy (mm) - UGT FC Omhullende



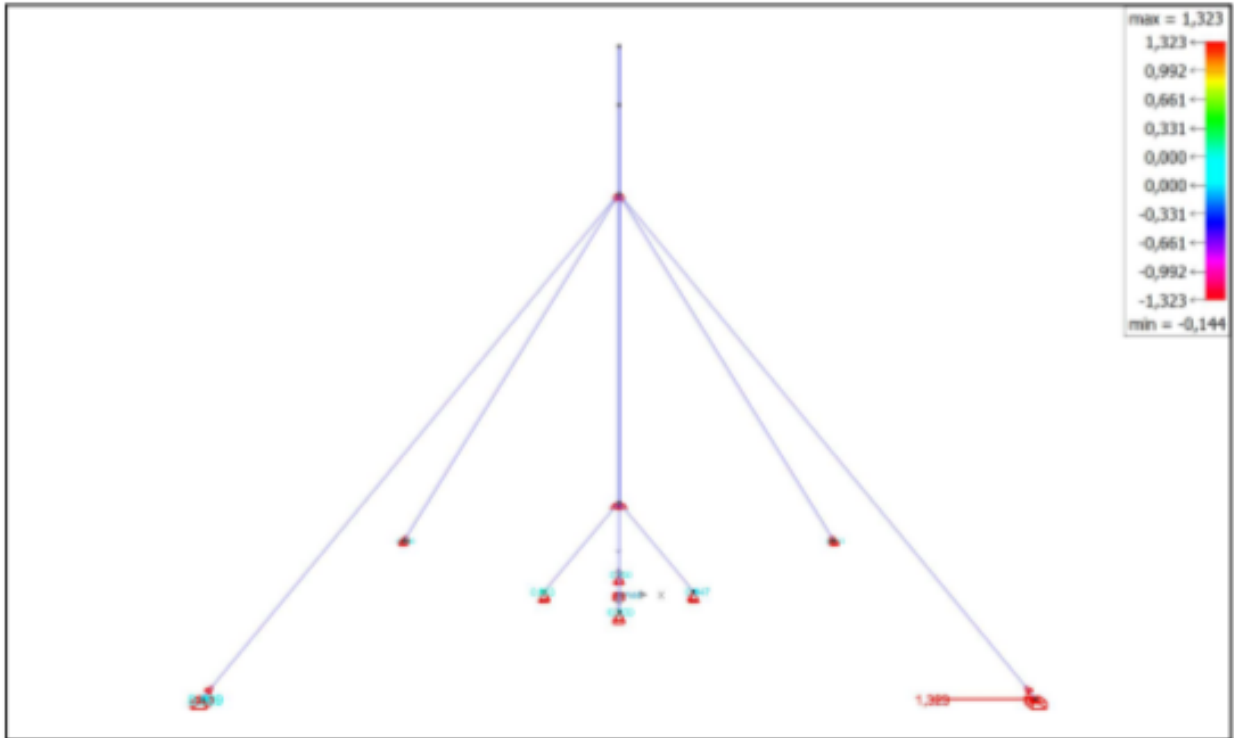
7.3 δz (mm) - UGT FC Omhullende



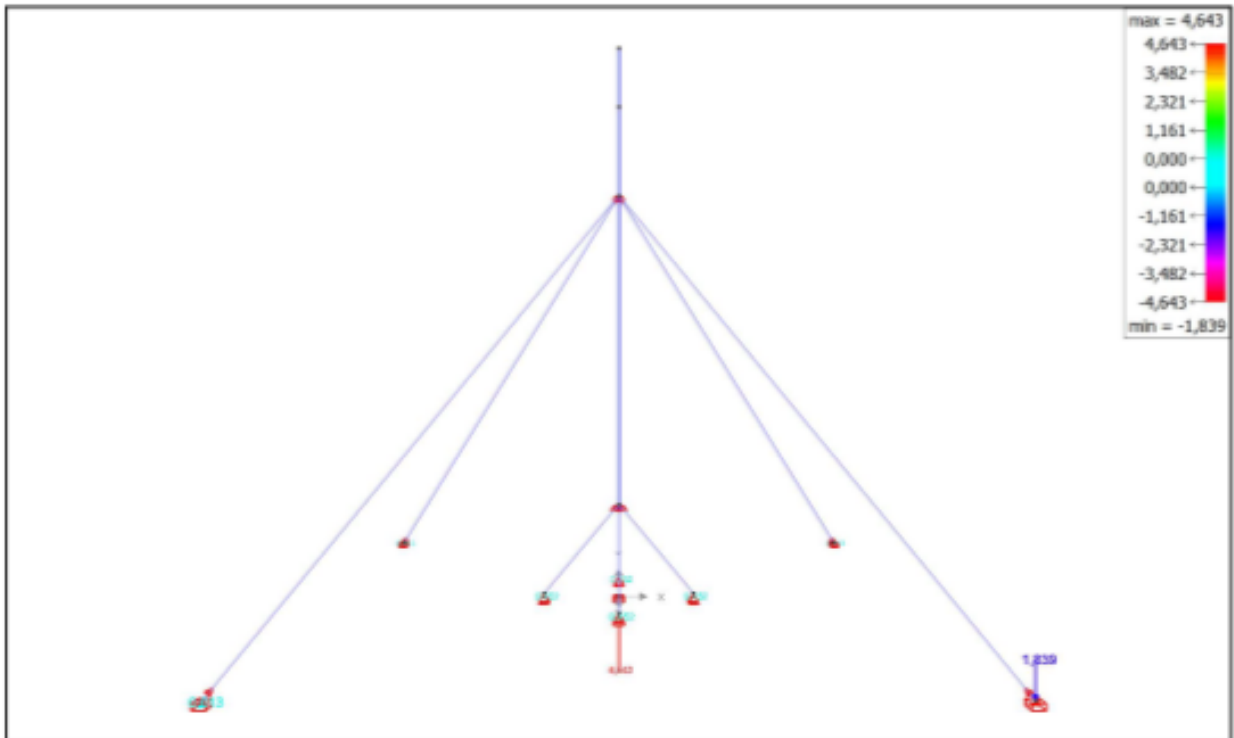
7.4 Reactie Rx op punt (kN) - UGT FC Omhullende min



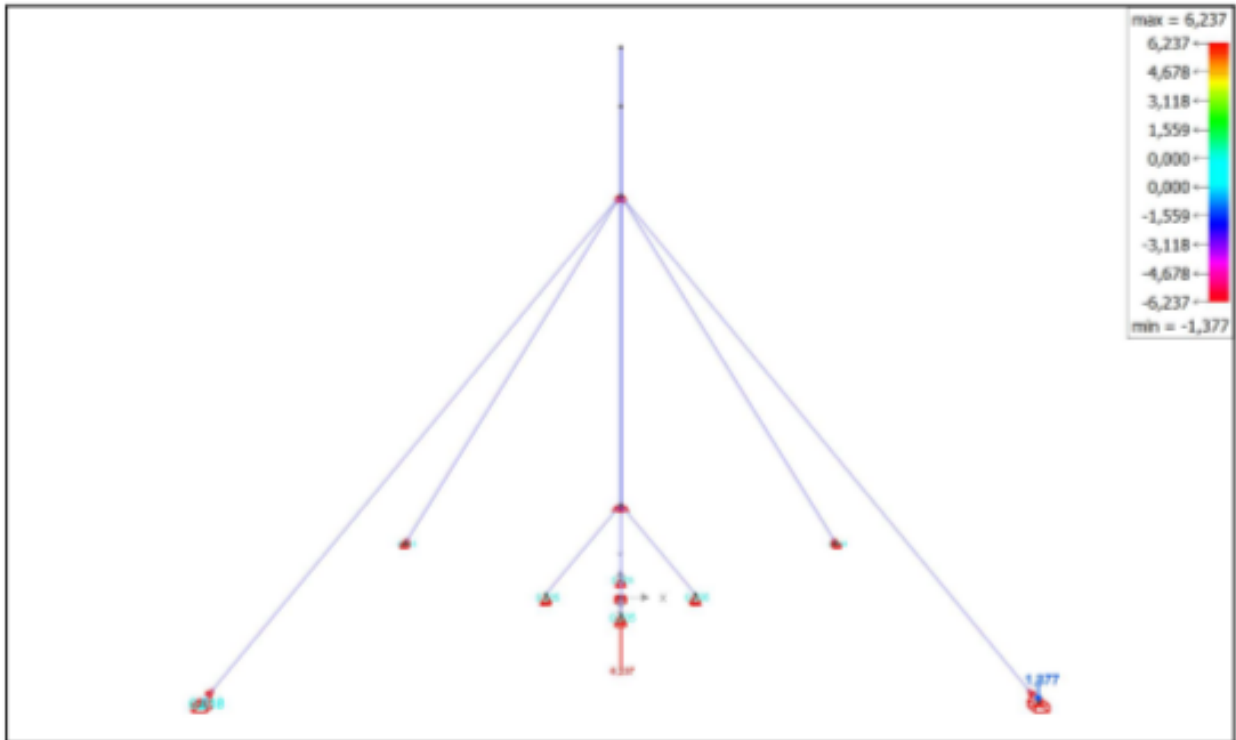
7.5 Reactie Rx op punt (kN) - UGT FC Omhullende max



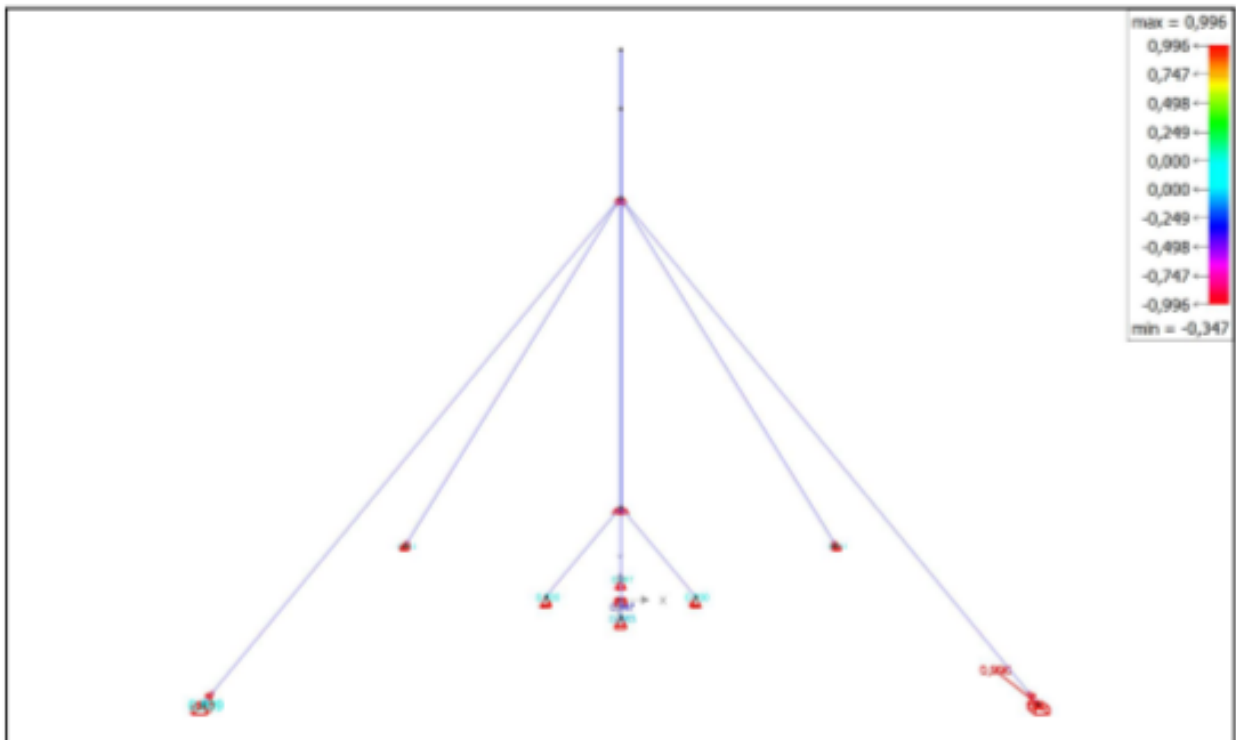
7.6 Reactie Ry op punt (kN) - UGT FC Omhullende min



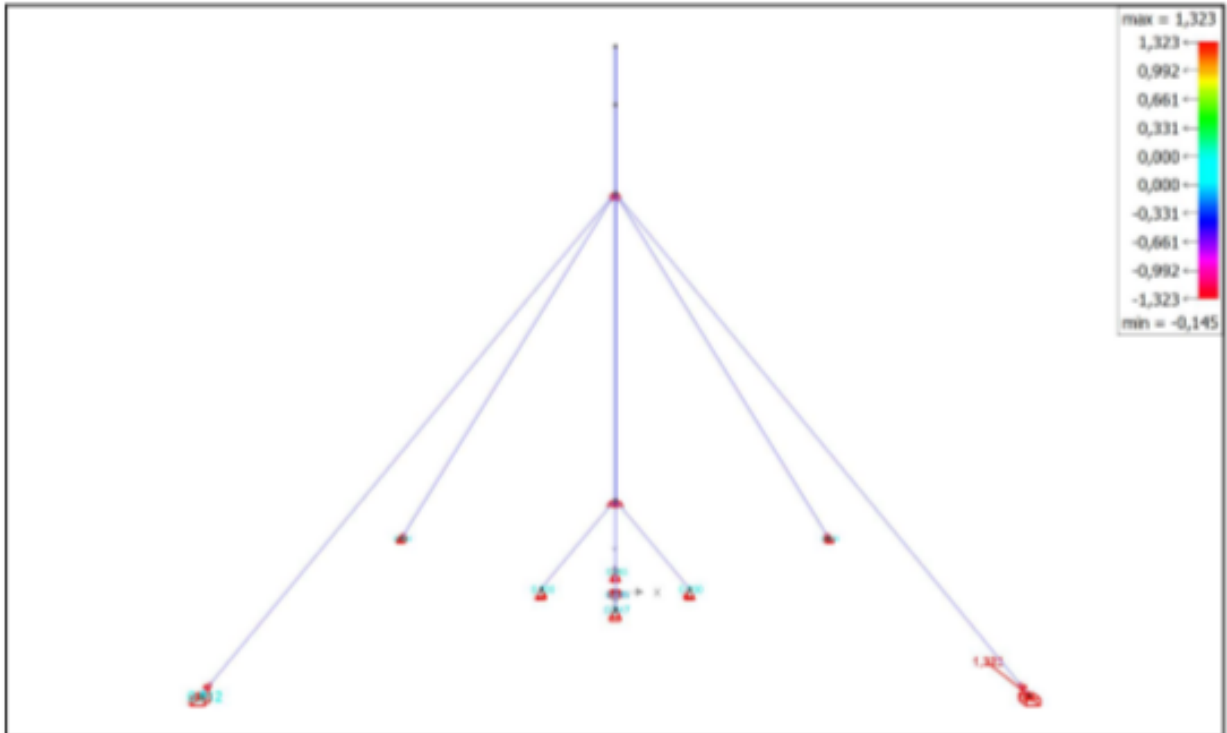
7.7 Reactie Ry op punt (kN) - UGT FC Omhullende max



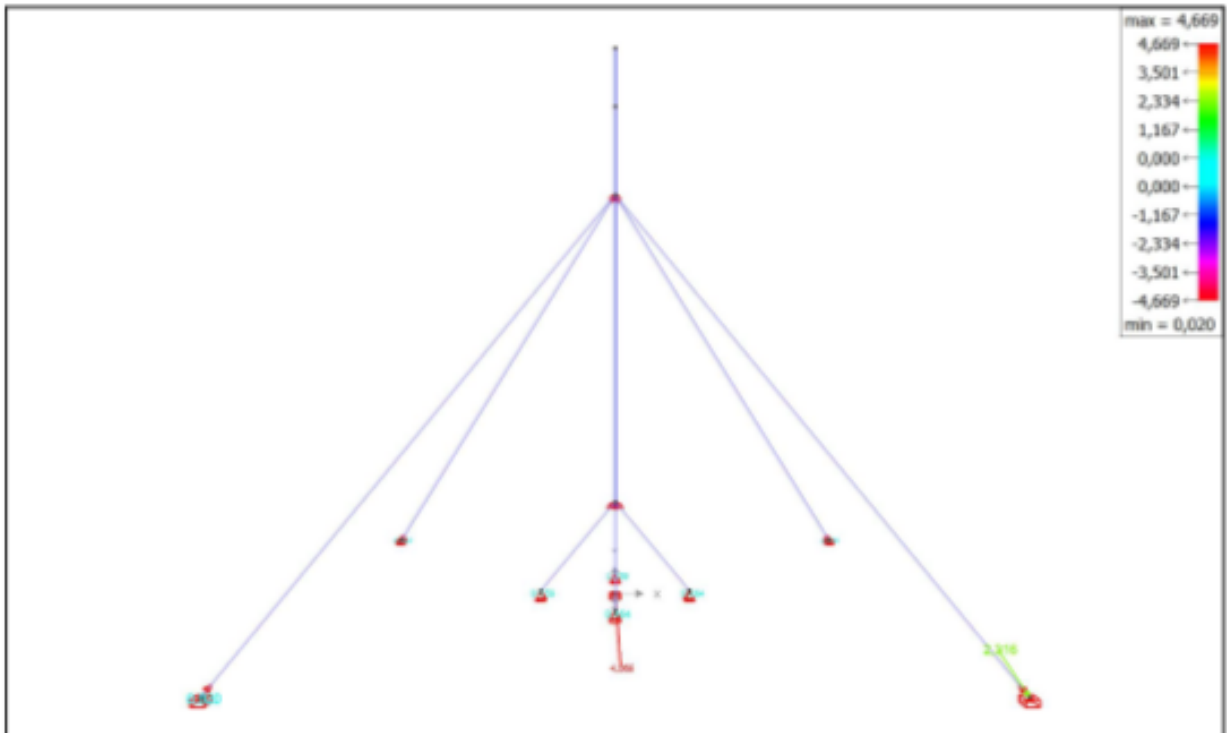
7.8 Reactie Rz op punt (kN) - UGT FC Omhullende min



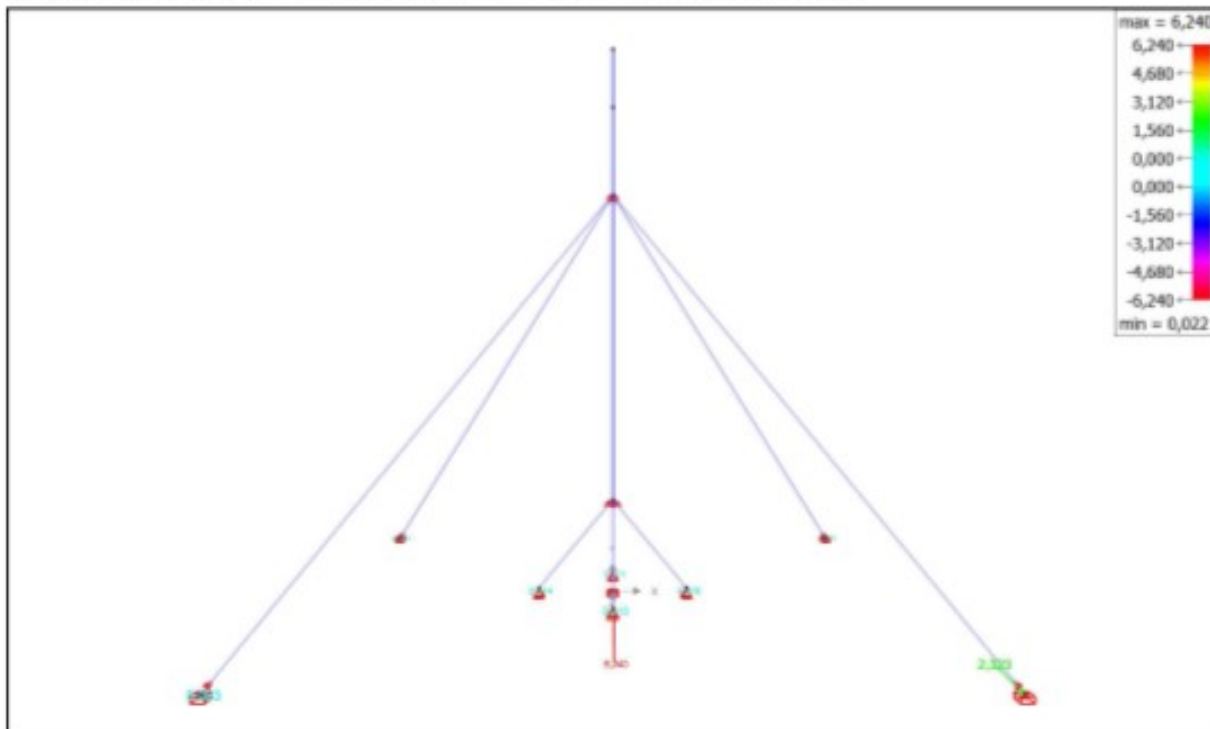
7.9 Reactie Rz op punt (kN) - UGT FC Omhullende max



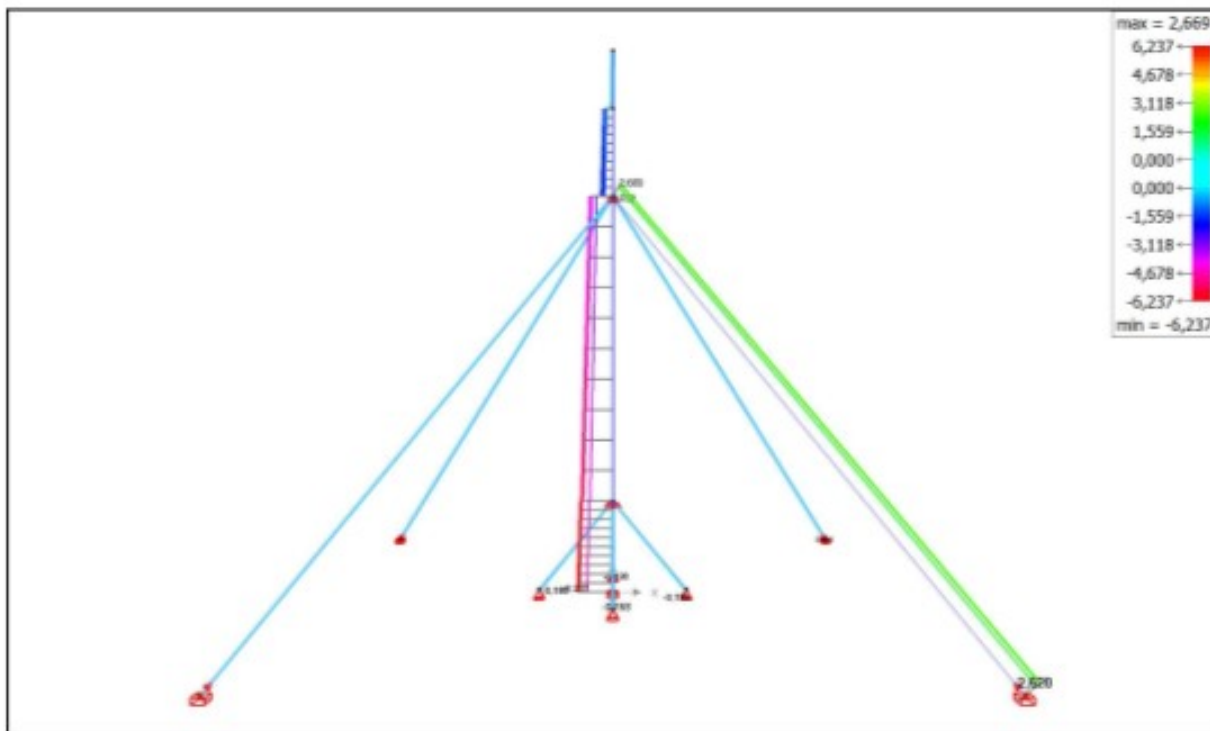
7.10 Reactie Rxyz op punt (kN) - UGT FC Omhullende min



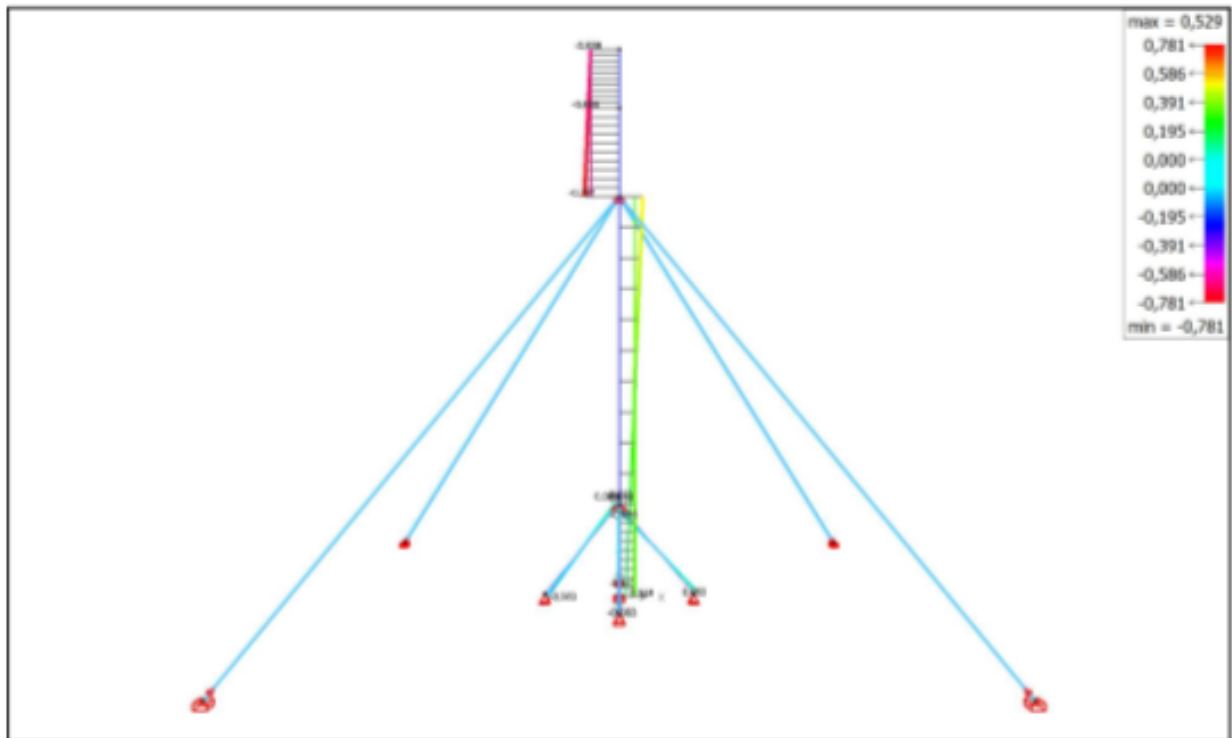
7.11 Reactie Rxyz op punt (kN) - UGT FC Omhullende max



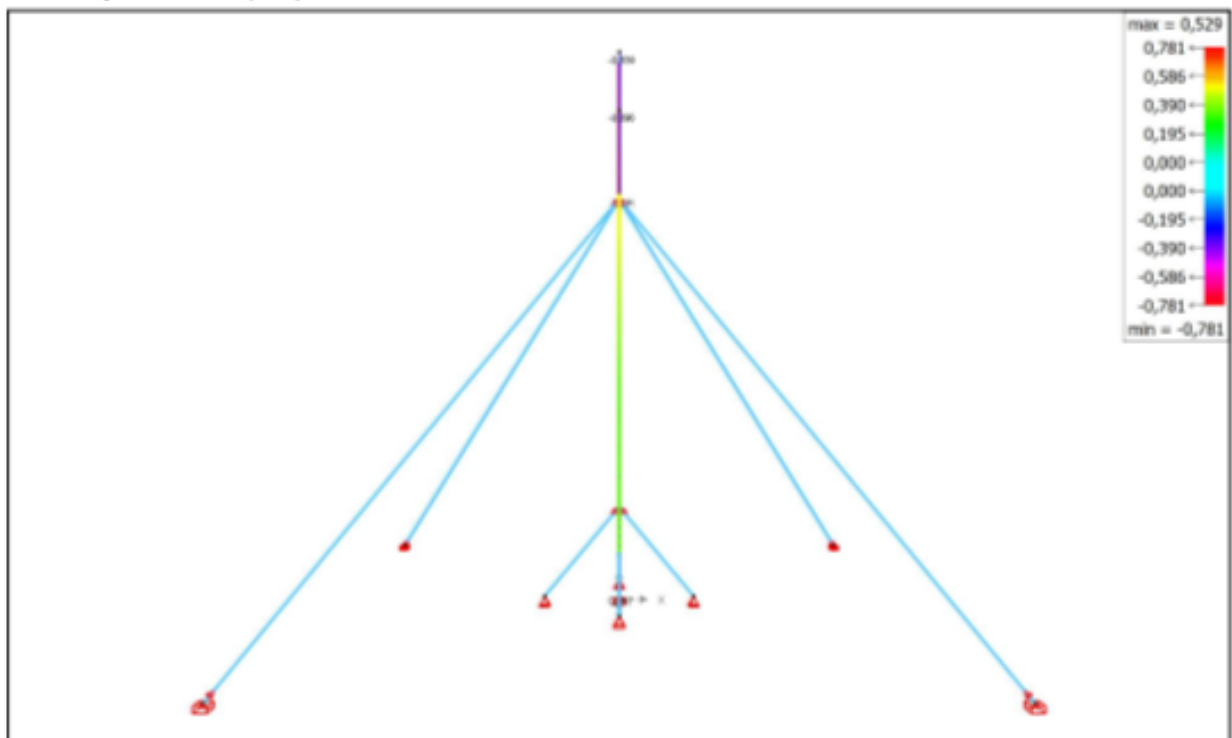
7.12 N in staaf (kN) - UGT FC Omhullende



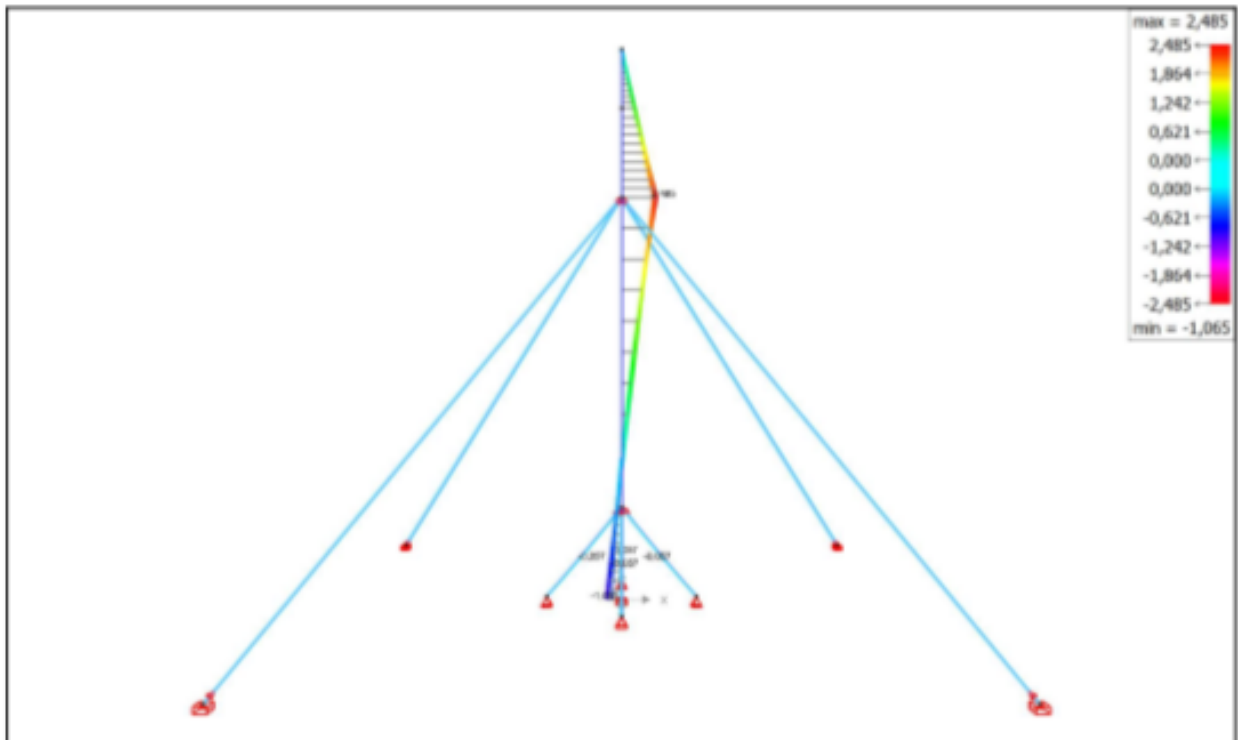
7.13 Vz in staaf (kN) - UGT FC Omhullende



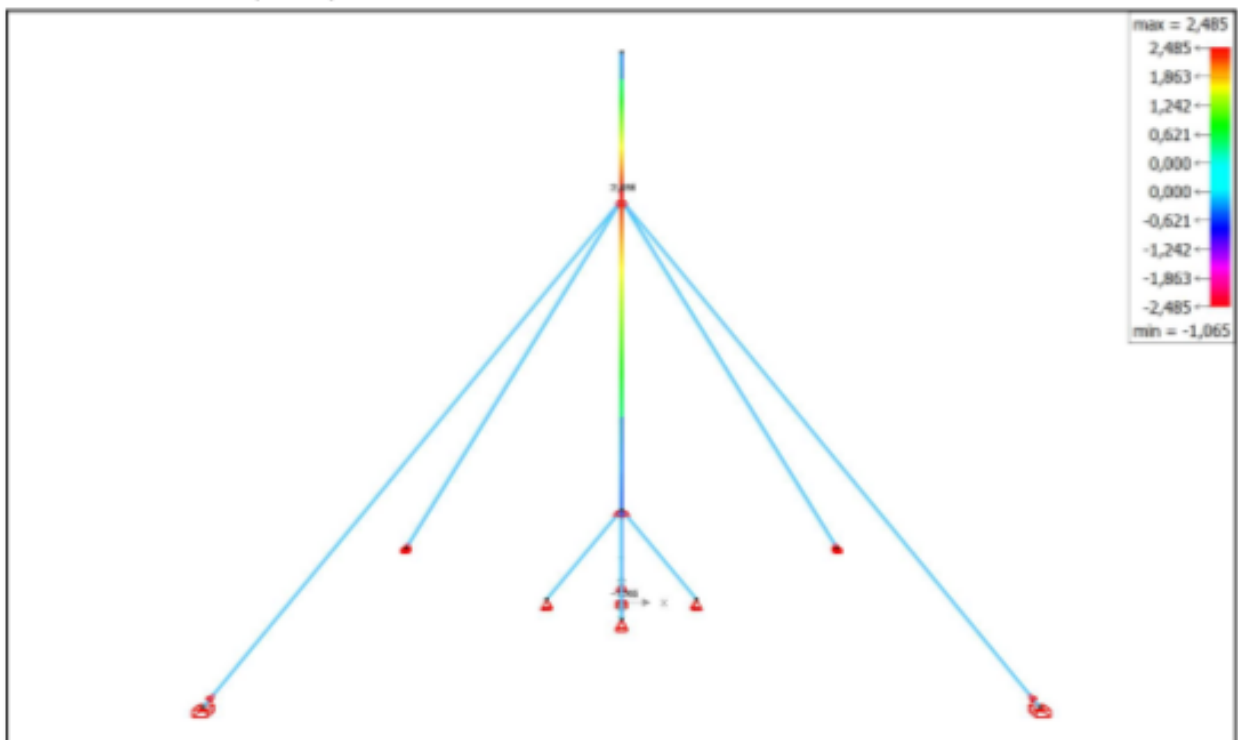
7.14 Vy in staaf (kN) - UGT FC Omhullende



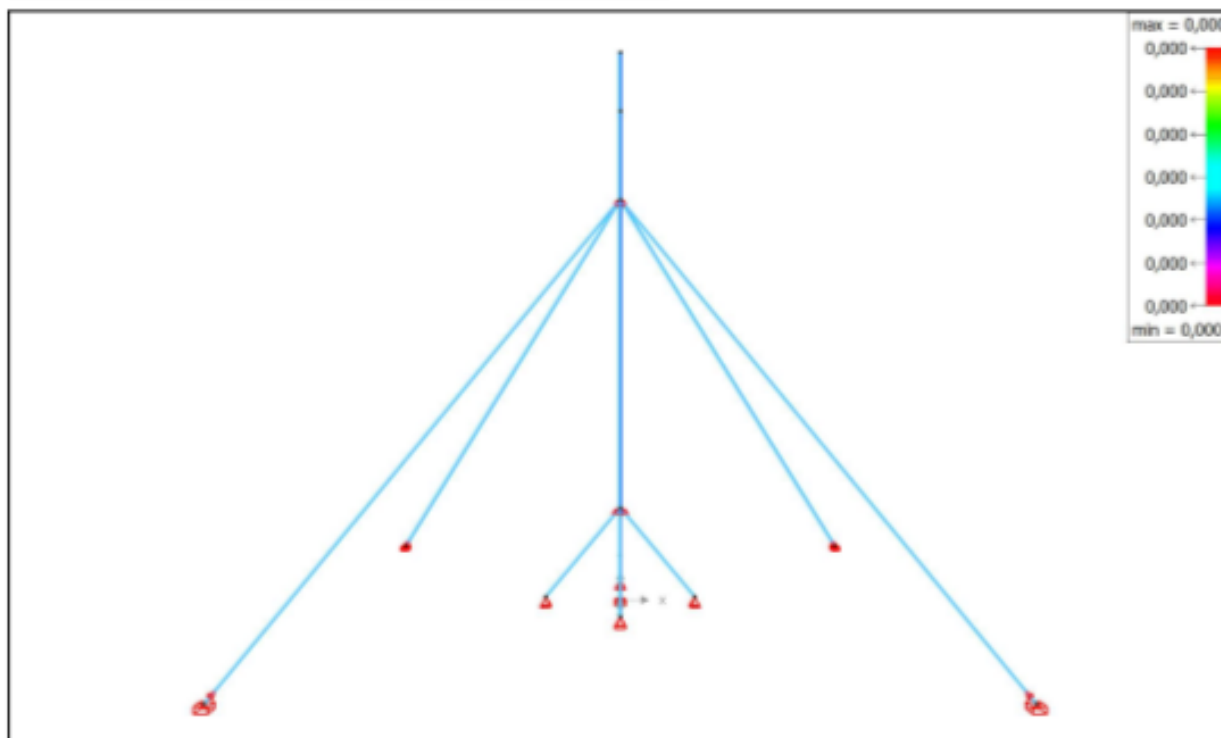
7.15 My in staaf (kNm) - UGT FC Omhullende



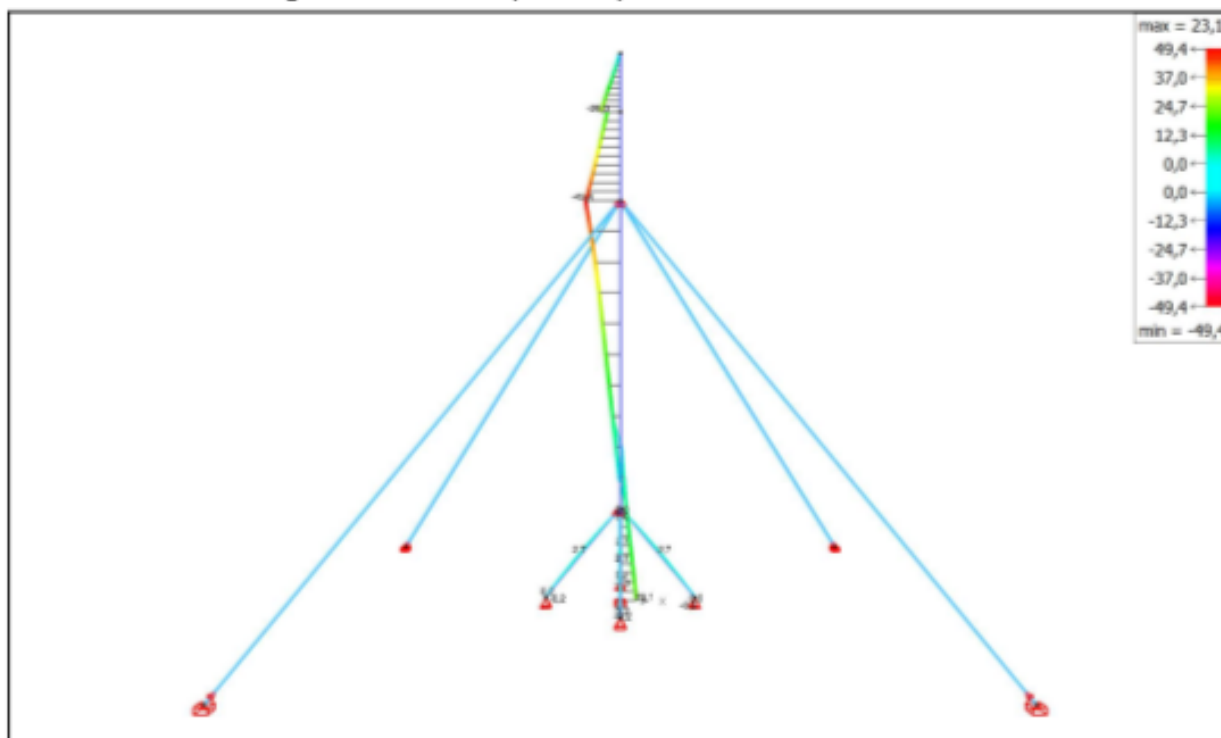
7.16 Mz in staaf (kNm) - UGT FC Omhullende



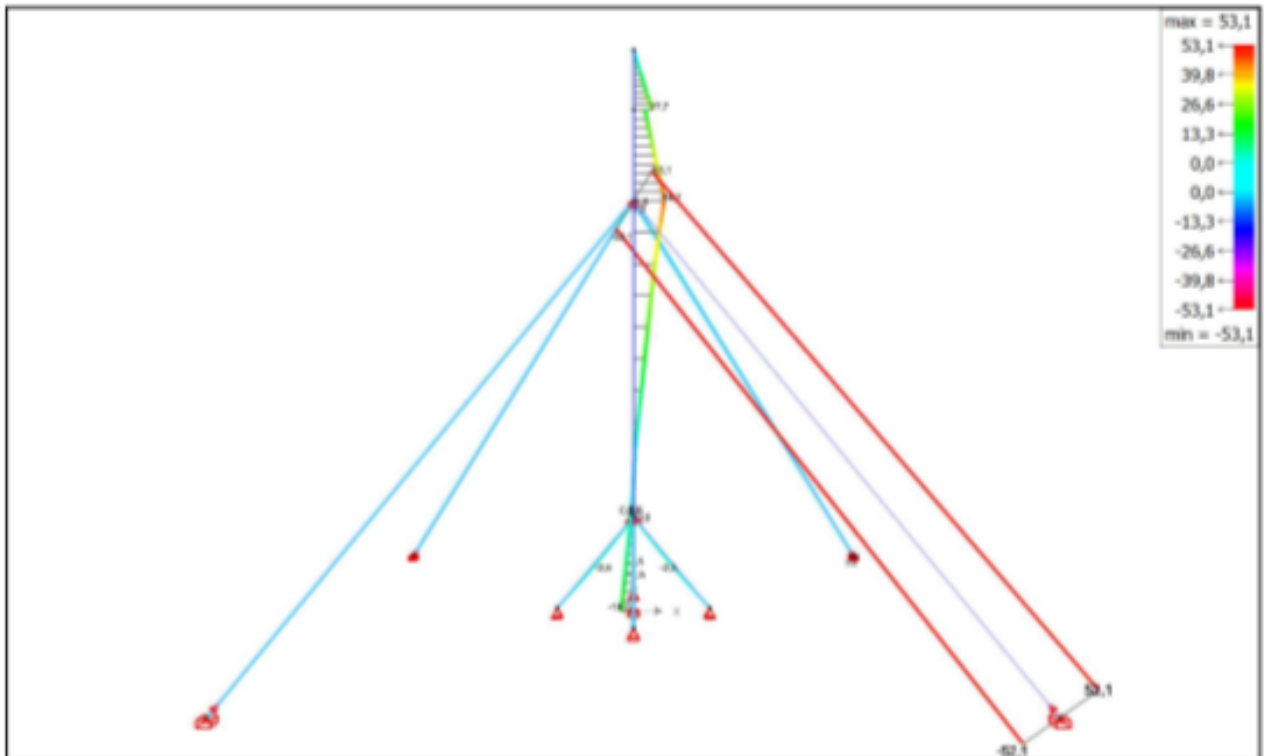
7.17 Tx in staaf (kNm) - UGT FC Omhullende



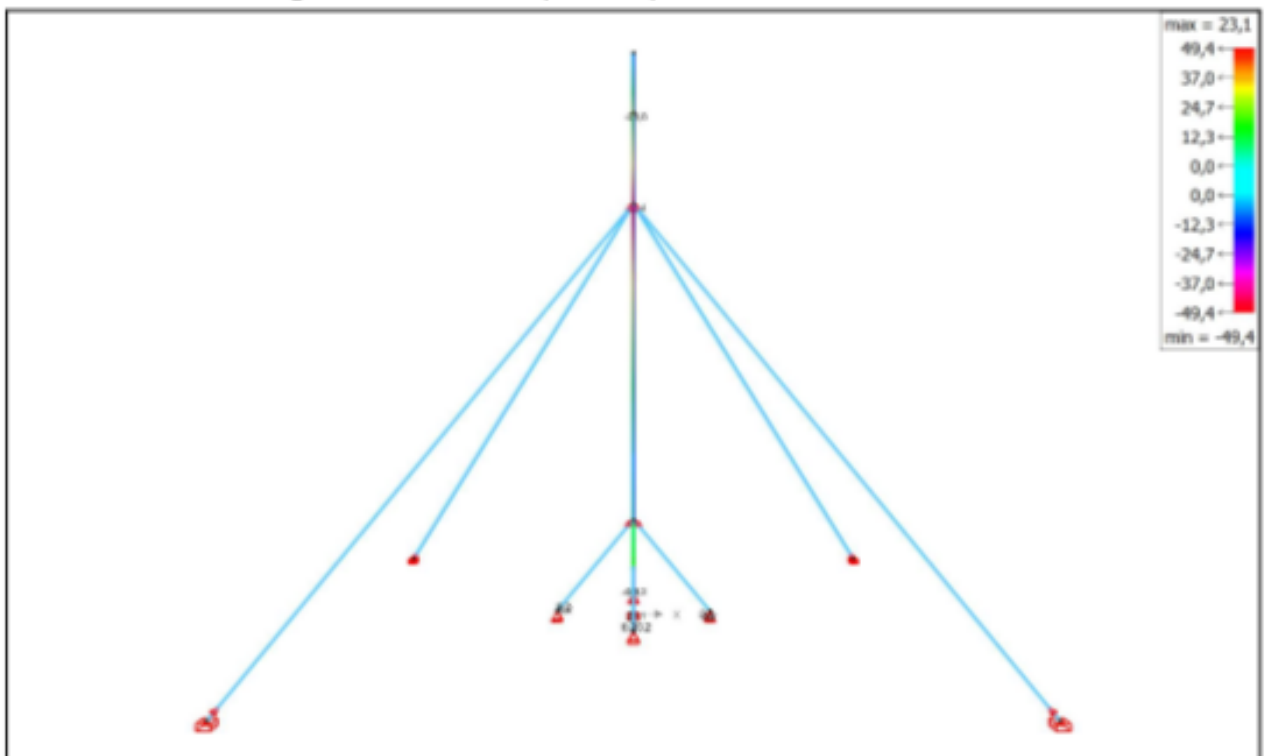
7.18 σ_c in staaf volgens sterke as (N/mm²) - UGT FC Omhullende



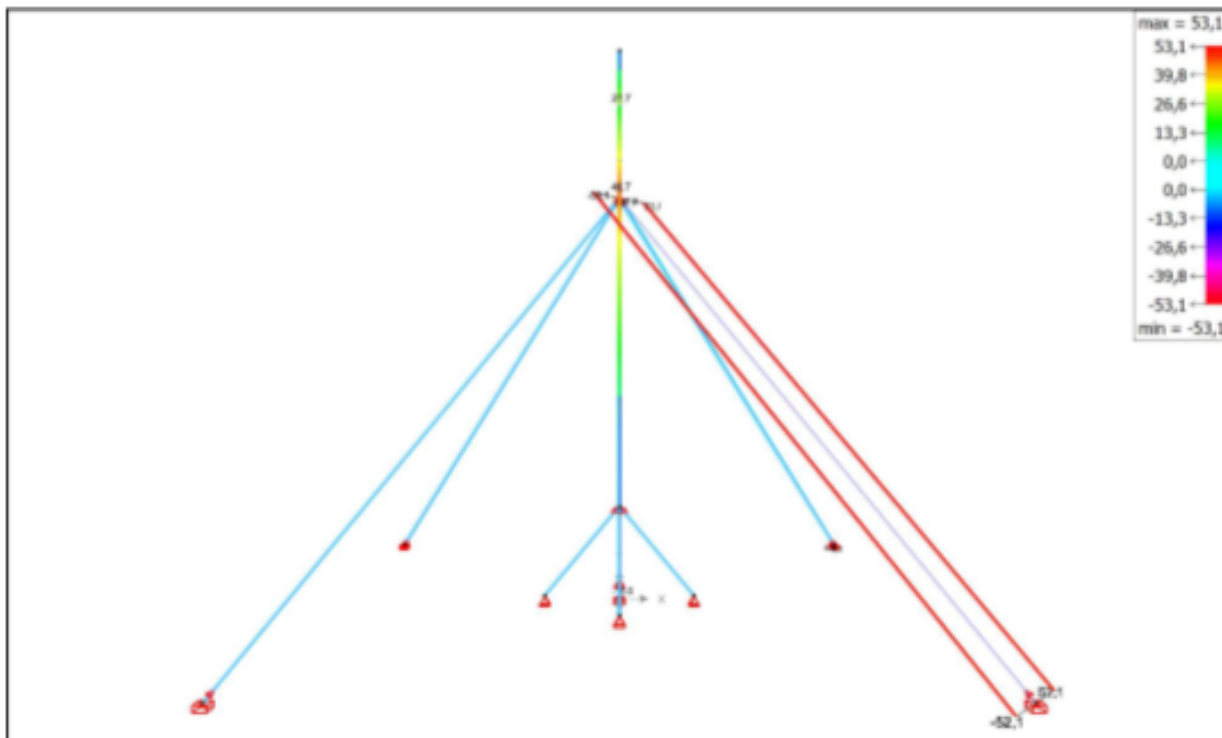
7.19 σ_t in staaf volgens sterke as (N/mm^2) - UGT FC Omhullende



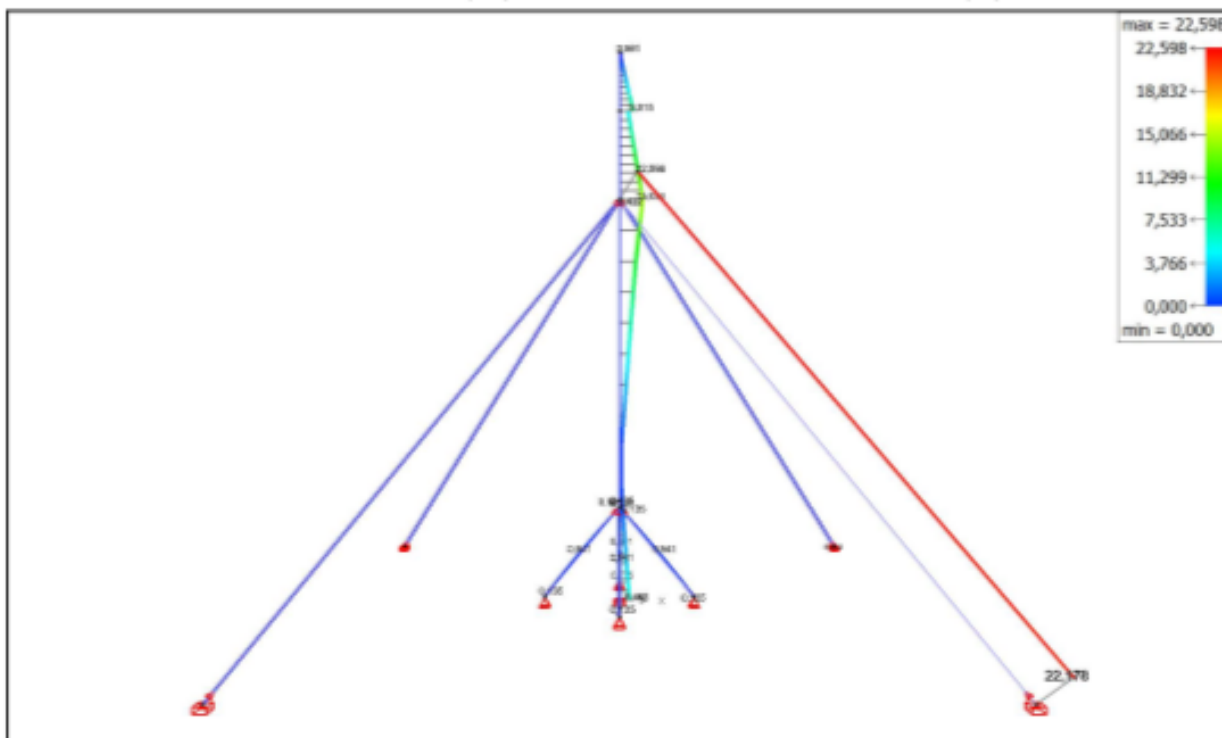
7.20 σ_c in staaf volgens zwakke as (N/mm^2) - UGT FC Omhullende



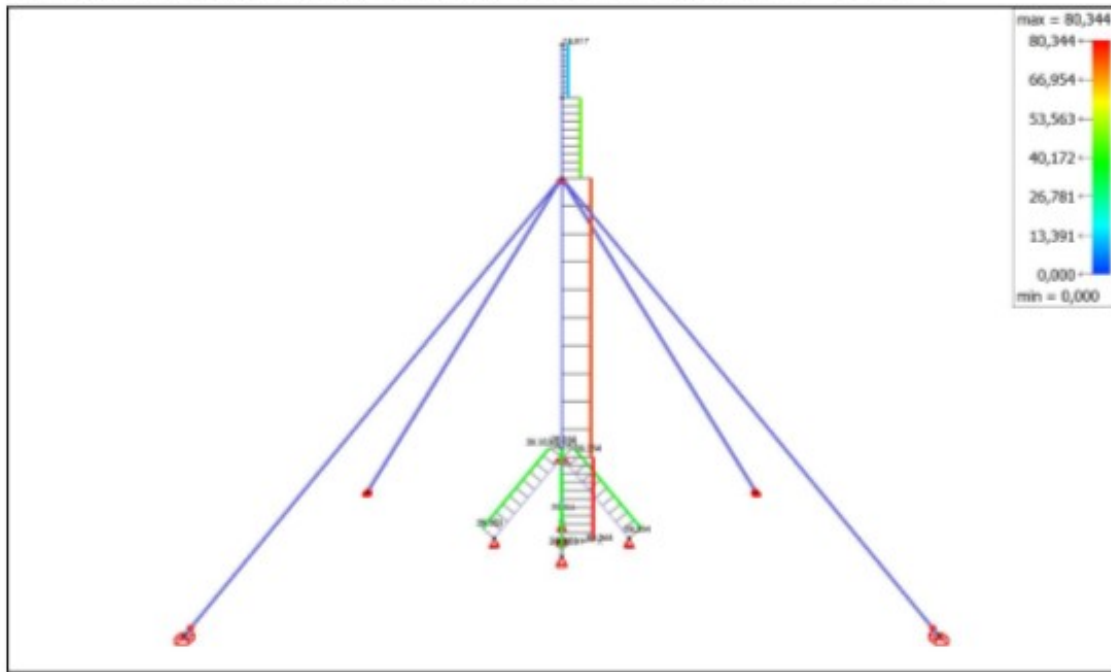
7.21 σ_t in staaf volgens zwakke as (N/mm²) - UGT FC Omhullende



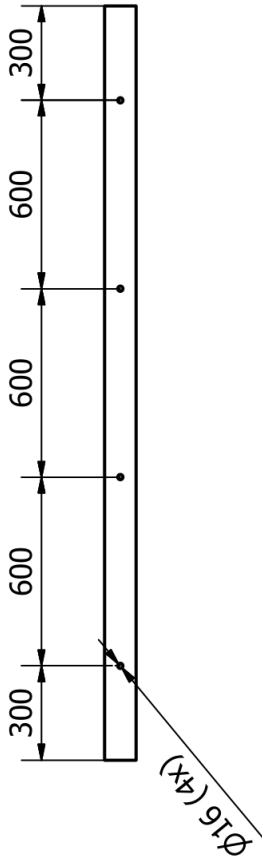
7.22 Sterkte controle van staaf (%) - Eurocode 3 : EN 1993-1-1/3 (--)





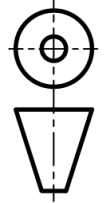
7.23 Stabiliteitscontrole van staaf (%) - Eurocode 3 : EN 1993-1-1/3 (--)



BIJLAGE C: TECHNISCHE TEKENING LAT FUNDERING



Algemene tolerantie: DIN ISO 2768-mK

Materiaal: S235	Ruwmaten: 8 x 100 x 6000
Norm:	Behandeling:
Benaming: Lat fundering	Tek. nr.: A4/008
 Tekenaar: Thomas Snijders	Formaat: A4
	Schaal: 1:20
 Groep: ENE- EL	Sam. nr.:
	Datum: 10/05/2020
	

Overzicht EN 1993-1-1 : staaf 1

Data



Doorsnede: PIPE 100x4,5 [M]
 Materiaal : Staal S235
 Staallengte: 2,186 m
 Kniklengte in het vlak: 26,015 m
 Kniklengte uit het vlak: 26,015 m

Checks

	UGT-FC
Axiale trek	0,000%
Axiale druk	1,304%
Buiging om y'-as	6,468%
Buiging om z'-as	6,468%
Afschuiving in de y'-richting	0,198%
Afschuiving in de z'-richting	0,198%
Torsie	0,000%
Buiging om y'-as + afschuiving in de z'-richting	6,468%
Buiging om z'-as + afschuiving in de y'-richting	6,468%
Dubbele buiging + normaalkracht	6,468%
Dubbele buiging + dwarskracht + normaalkracht	6,468%
	UGT-FC
Knikstabiliteit om y'-as	70,386%
Knikstabiliteit om z'-as	70,386%
Knikstabiliteit om x'-as	1,304%
Laterale torsieknik	0 %
Knikstabiliteit om y'-as t.g.v. M_y , M_z en N	80,334%
Knikstabiliteit om z'-as t.g.v. M_y , M_z en N	80,344%

Weerstandcontrole volgens EN 1993-1-1 : staaf 1

UGT - FC

Axiale trek (§6.2.3)

De staaf wordt niet getrokken

Axiale druk (§6.2.4)

1,304%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 1

Doorsnedeklasse: 1

$$N_{Ed} = 6,237 \text{ kN}$$

$$N_{s,Rd} = A \cdot f_{yd} = 478,402 \text{ kN}$$

$$A = 2035,8 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

Buiging om y'-as (§6.2.5)

6,468%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 8

Doorsnedeklasse: 1

$$M_{y,Ed} = 1,065 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Rd} = W_{y,pl} \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$W_{y,pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

Buiging om z'-as (§6.2.5)

6,468%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 8

Doorsnedeklasse: 1

$$M_{z,Ed} = 1,065 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{z,pl} \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$W_{z,pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

Afschuiving in de y'-richting (§6.2.6)

0,198%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 8

$$V_{y,Ed} = 0,347 \text{ kN}$$

$$V_{y,Rd} = A_{vy} \cdot f_{yd} / \sqrt{3} = 175,838 \text{ kN}$$

$$A_{vy} = 1296,0 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

Afschuiving in de z'-richting (§6.2.6)

0,198%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 8

$$V_{z,Ed} = 0,348 \text{ kN}$$

$$V_{z,Rd} = A_{vz} \cdot f_{yd} / \sqrt{3} = 175,838 \text{ kN}$$

$$A_{vz} = 1296,0 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

Torsie (§6.2.7)

De staaf is niet onderhevig aan torsie

Buiging om y'-as + afschuiving in de z'-richting (§6.2.8)

6,468%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 8

Doorsnedeklasse: 1

$$M_{y,Ed} = 1,065 \text{ kNm}$$

$$V_{z',Ed} = 0,348 \text{ kN}$$

$$M_{y',Rd} = W_{y',pl} \cdot (1 - \rho) \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$V_{z',Rd} = A_{vz} \cdot f_{yd} / \sqrt{3} = 175,838 \text{ kN}$$

$$W_{y',pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$A_{vz} = 1296,0 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho = 0,000$$

Buiging om z'-as + afschuiving in de y'-richting (§6.2.8)

6,468%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 8

Doorsnedeklasse: 1

$$M_{z',Ed} = 1,065 \text{ kNm}$$

$$V_{y',Ed} = 0,347 \text{ kN}$$

$$M_{z',Rd} = W_{z',pl} \cdot (1 - \rho) \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$V_{y',Rd} = A_{vy} \cdot f_{yd} / \sqrt{3} = 175,838 \text{ kN}$$

$$\rho = 0,000$$

$$W_{z',pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$A_{vy} = 1296,0 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

Dubbele buiging + normaalkracht (§6.2.9)

6,468%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 8

Doorsnedeklasse N: 1

Doorsnedeklasse y': 1

Doorsnedeklasse z': 1

$$N_{Ed} = 4,643 \text{ kN}$$

$$e_y = 0,0 \text{ mm}$$

$$e_z = 0,0 \text{ mm}$$

$$M_{y,Ed} = 1,065 \text{ kNm}$$

$$M_{z',Ed} = 1,065 \text{ kNm}$$

$$M_{N,y',Rd} = M_{y',Rd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$M_{N,z',Rd} = M_{z',Rd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_{yd} = 478,402 \text{ kN}$$

$$M_{y',Rd} = W_{y',pl} \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$M_{z',Rd} = W_{z',pl} \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$A = 2035,8 \text{ mm}^2$$

$$W_{y',pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$W_{z',pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 0,010$$

$$a_n = 0,500$$

$$a_t = 0,500$$

$$\alpha = 2,000$$

$$\beta = 2,000$$

Dubbele buiging + dwarskracht + normaalkracht (§6.2.10)

6,468%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 8

Doorsnedeklasse N: 1

Doorsnedeklasse y': 1

Doorsnedeklasse z': 1

$$N_{Ed} = 4,643 \text{ kN}$$

$$e_y = 0,0 \text{ mm}$$

$$e_z = 0,0 \text{ mm}$$

$$M_{y,Ed} = 1,065 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Ed} = 0,348 \text{ kN}$$

$$M_{z',Ed} = 1,065 \text{ kNm}$$

$$V_{y',Ed} = 0,347 \text{ kN}$$

$$M_{VN,y',Rd} = M_{V,y',Rd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$M_{VN,z',Rd} = M_{V,z',Rd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$N_{v,Rd} = A \cdot f_{yd} = 478,402 \text{ kN}$$

$$M_{yy,Rd} = W_{y,d} \cdot (1 - \rho) \cdot f_{yd} = 18,463 \text{ kNm}$$

$$M_{zz,Rd} = W_{z,d} \cdot (1 - \rho) \cdot f_{yd} = 18,463 \text{ kNm}$$

$$V_{y,Rd} = A_{vy} \cdot f_{yd} / \sqrt{3} = 175,838 \text{ kN}$$

$$V_{z,Rd} = A_{vz} \cdot f_{yd} / \sqrt{3} = 175,838 \text{ kN}$$

$$A = 2035,8 \text{ mm}^2$$

$$\rho = 0,000$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 0,010$$

$$\alpha = 2,000$$

$$W_{y,d} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$A_{vy} = 1296,0 \text{ mm}^2$$

$$a_w = 0,500$$

$$\beta = 2,000$$

$$W_{z,d} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$A_{vz} = 1296,0 \text{ mm}^2$$

$$a_w = 0,500$$

Stabiliteitscontrole volgens EN 1993-1-1 : staaf 1

UGT - FC

Knikstabiliteit om y'-as (§6.3.1)

70,386%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 1

Doorsnedeklasse: 1

$$N_{Ed} = 6,237 \text{ kN}$$

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot A \cdot f_{yd} = 8,861 \text{ kN}$$

$$\chi_y = 0,019$$

$$\Phi_y = 27,481$$

$$\lambda_y = 680,253$$

$$A = 2035,8 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_{y,Rd} = 7,244$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_y = 0,210$$

$$L_{cr,y} = 28,015 \text{ m}$$

Knikstabiliteit om z'-as (§6.3.1)

70,386%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 1

Doorsnedeklasse: 1

$$N_{Ed} = 6,237 \text{ kN}$$

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot A \cdot f_{yd} = 8,861 \text{ kN}$$

$$\chi_z = 0,019$$

$$\Phi_z = 27,481$$

$$\lambda_z = 680,253$$

$$A = 2035,8 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_{z,Rd} = 7,244$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha_z = 0,210$$

$$L_{cr,z} = 28,015 \text{ m}$$

Knikstabiliteit om y'-as t.g.v. M_y , M_z en N (§6.3.3)

80,334%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 1

Doorsnedeklasse N: 1

Doorsnedeklasse y': 1

Doorsnedeklasse z': 1

$$N_{Ed} = 6,237 \text{ kN}$$

$$e_y = 0,0 \text{ mm}$$

$$e_z = 0,0 \text{ mm}$$

$$M_{y,Ed} = 0,713 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 0,716 \text{ kNm}$$

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot A \cdot f_{yd} = 8,861 \text{ kN}$$

$$M_{b,y,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{y,pl} \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$M_{b,z,Rd} = W_{z,pl} \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$W_{y,pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$W_{z,pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$A = 2035,8 \text{ mm}^2$$

$$\chi_y = 0,019$$

$$\chi_{LT} = 1,000$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{yy} = 1,433$$

$$k_{yz} = 0,860$$

$$C_{my} = 0,917$$

$$C_{mz} = 0,917$$

$$C_{mLT} = 0,917$$

$$\lambda_{rel,0} = 0,145$$

$$\lambda_{rel,0,br} = 0,172$$

Knikstabiliteit om z'-as t.g.v. M_y , M_z en N (§6.3.3)

80,344%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 1

Doorsnedeklasse N: 1

Doorsnedeklasse y': 1

Doorsnedeklasse z': 1

$$N_{Ed} = 6,237 \text{ kN}$$

$$e_y = 0,0 \text{ mm}$$

$$e_z = 0,0 \text{ mm}$$

$$M_{y,Ed} = 0,713 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 0,716 \text{ kNm}$$

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot A \cdot f_{yd} = 8,861 \text{ kN}$$

$$M_{b,y,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_{y,pl} \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{z,pl} \cdot f_{yd} = 16,463 \text{ kNm}$$

$$W_{y,pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$\chi_z = 0,019$$

$$k_{z,y} = 0,860$$

$$C_{my} = 0,917$$

$$\lambda_{rel,z} = 0,145$$

$$W_{z,pl} = 70056 \text{ mm}^3$$

$$\chi_{LT} = 1,000$$

$$k_{z,z} = 1,433$$

$$C_{mz} = 0,917$$

$$\lambda_{rel,0,3m} = 0,172$$

$$A = 2035,8 \text{ mm}^2$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

$$C_{REL,T} = 0,917$$

Knikstabiliteit om x'-as (§6.3.1)

1,304%

Maximum ter plaatse van knoop 1 in combinatie UGT FC 1

Doorsnedeklasse: 1

$$N_{Ed} = 6,237 \text{ kN}$$

$$N_{b,z,Rd} = \chi_T \cdot A \cdot f_{yd} = 478,402 \text{ kN}$$

$$\chi_T = 1,000$$

$$\Phi_T = 0,520$$

$$N_{cr,y} = 9,118 \text{ kN}$$

$$N_{cr,T} = 164425,653 \text{ kN}$$

$$I_y = 5954575 \text{ mm}^4$$

$$L_{cr,T} = 2,186 \text{ m}$$

$$A = 2035,8 \text{ mm}^2$$

$$\lambda_{T,Rd} = 0,200$$

$$N_{cr,x} = 9,118 \text{ kN}$$

$$N_{cr,TF} = 164425,653 \text{ kN}$$

$$y_0 = 0,0 \text{ mm}$$

$$f_{yd} = 235,0 \text{ N/mm}^2$$

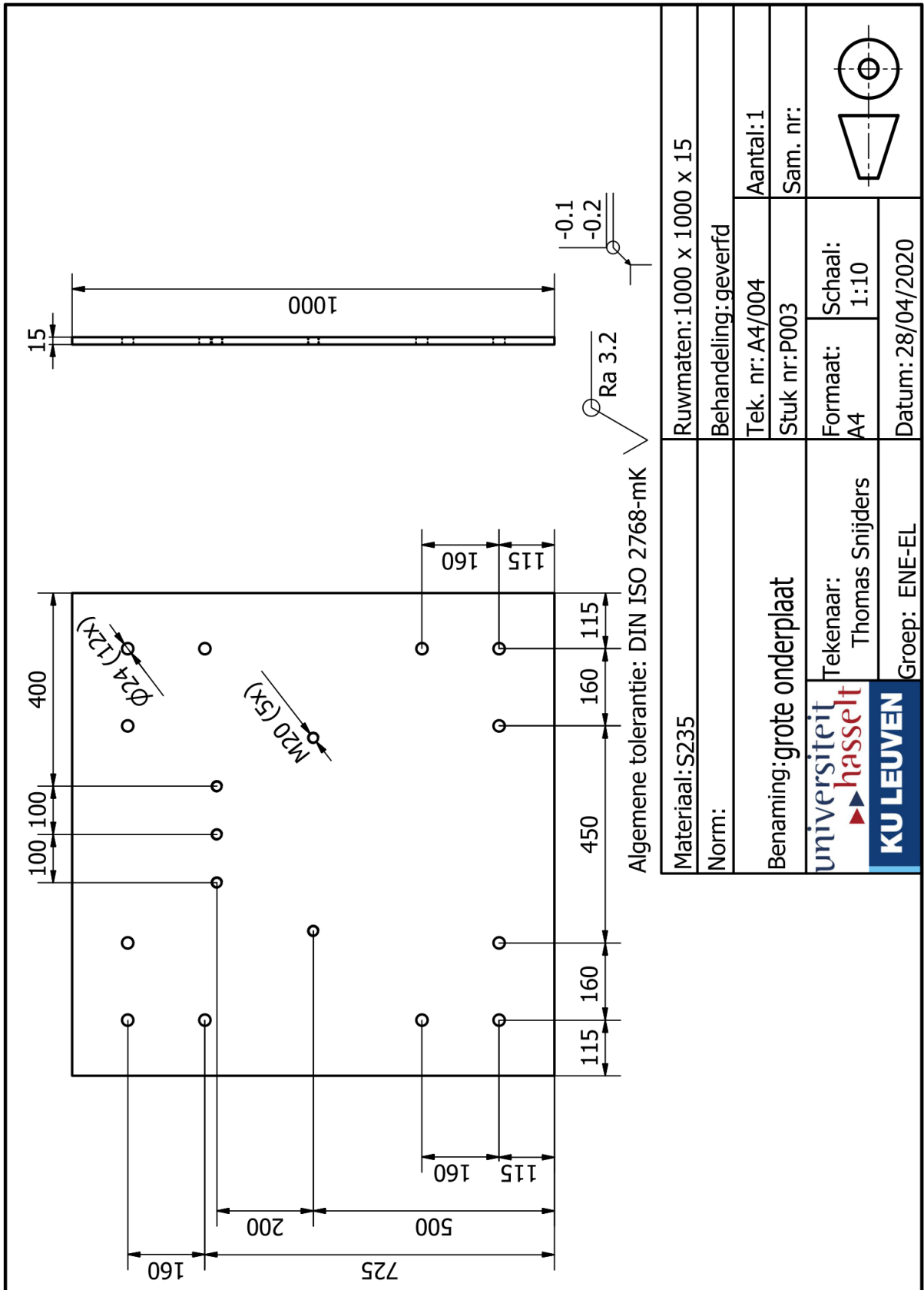
$$\alpha_{cr} = 0,210$$

$$z_0 = 0,0 \text{ mm}$$

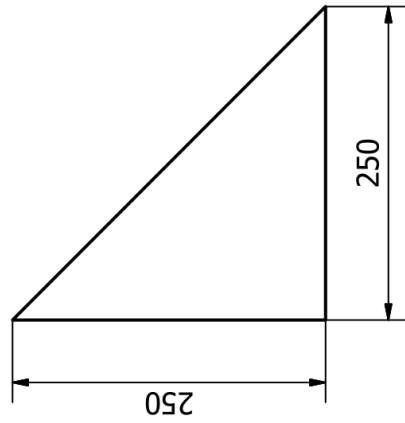
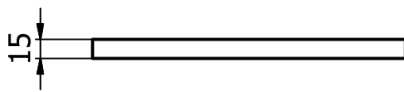
Laterale torsieknik (§6.3.2)

De sectie is niet onderhevig aan laterale torsieknik




BIJLAGE E: TECHNISCHE TEKENING GROTE ONDERPLAAT



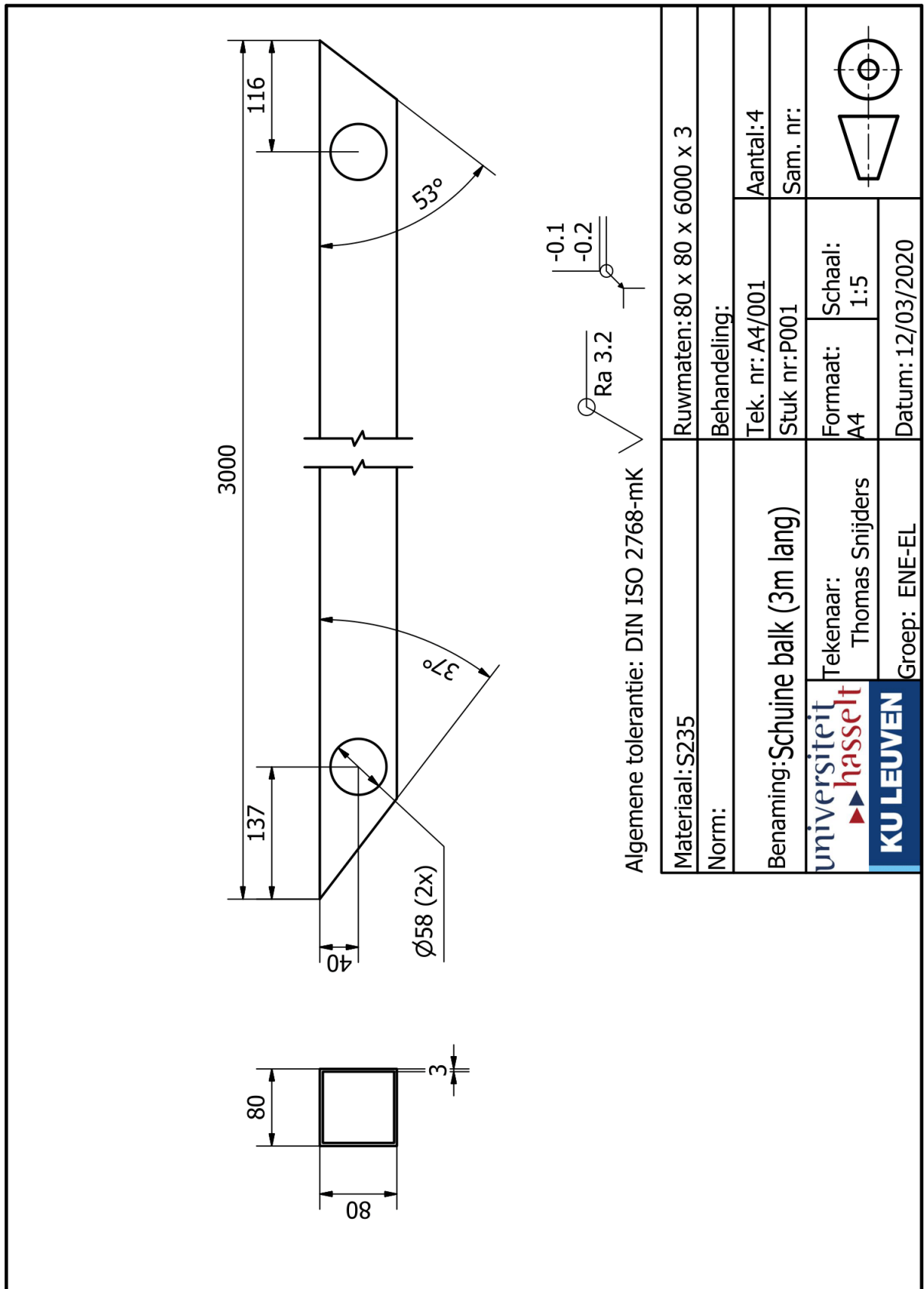
BIJLAGE F: TECHNISCHE TEKENING DRIEHOEKEN TOREN



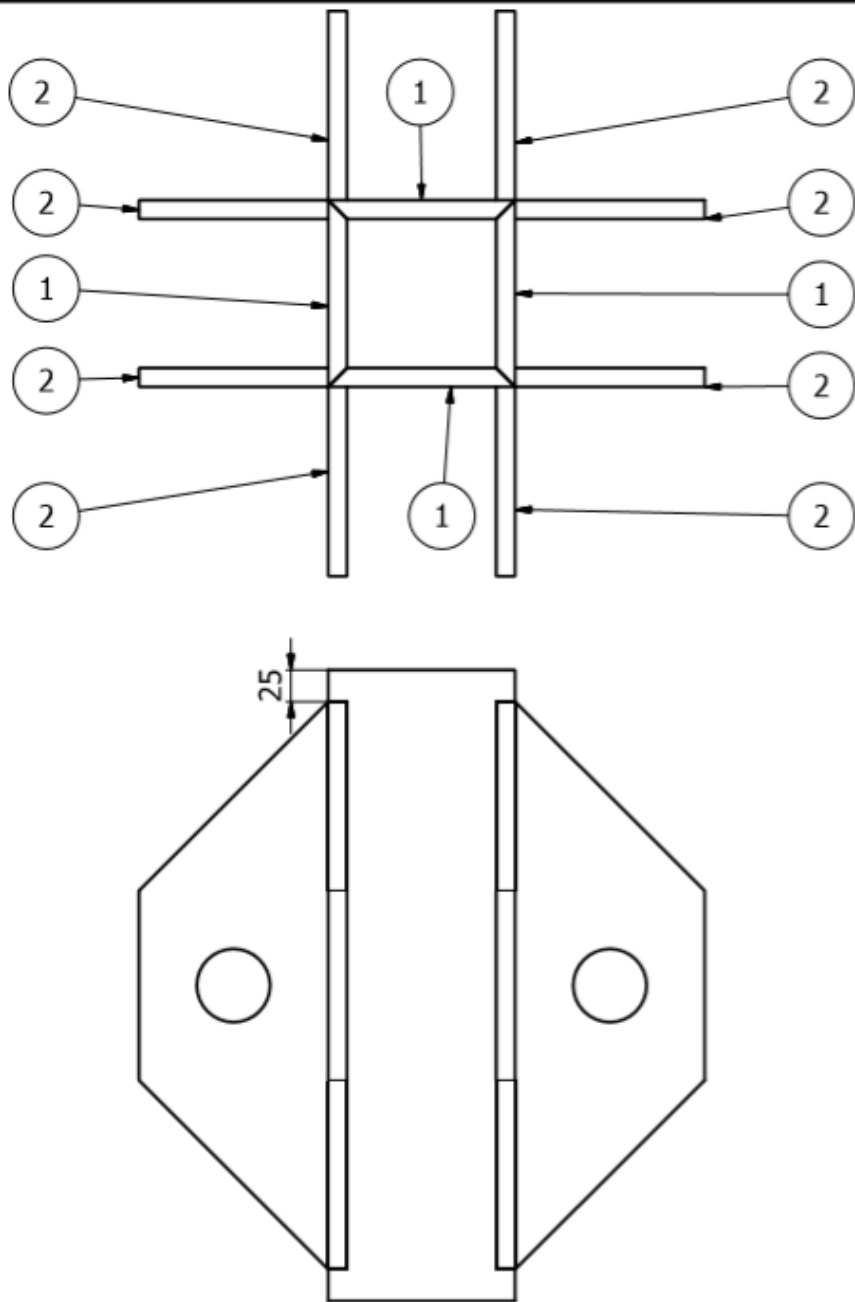
Algemene tolerantie: DIN ISO 2768-mK

Materiaal: S235	Ruwmaten: 1000 x 2000 x 15
Norm:	Behandeling: geverfd
Benaming: Opstaande driehoek toren	Tek. nr: A4/009 Aantal: 4
 Tekenaar: Thomas Snijders	Stuk nr: P008 Sam. nr:
	Formaat: A4 Schaal: 1:5
 Groep: ENE-EL	Datum: 10/05/2020 

BIJLAGE G: TECHNISCHE TEKENING SCHUINE BALK



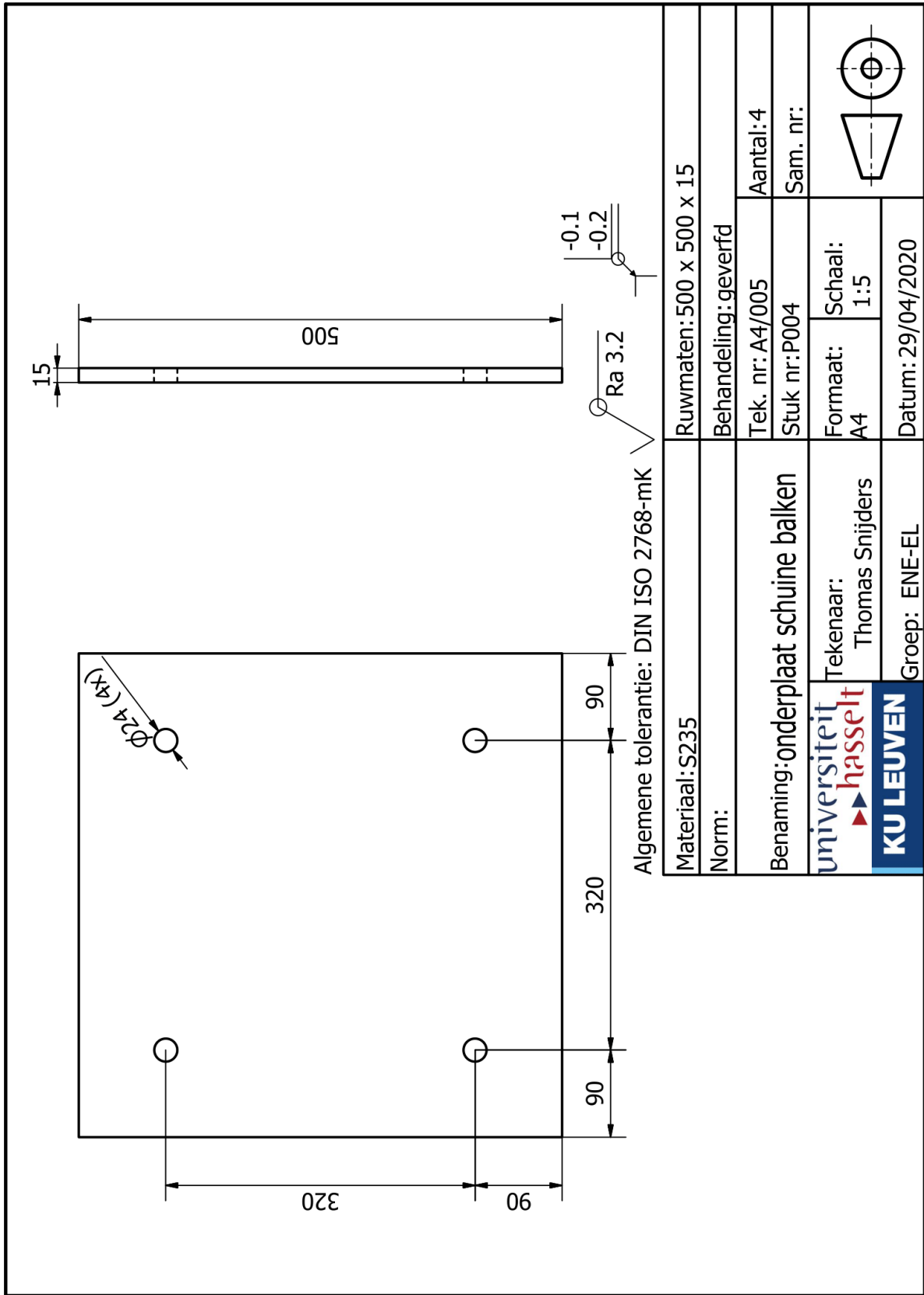
BIJLAGE H: TECHNISCHE TEKENING ASSEMBLY BUS SCHUINE BALKEN



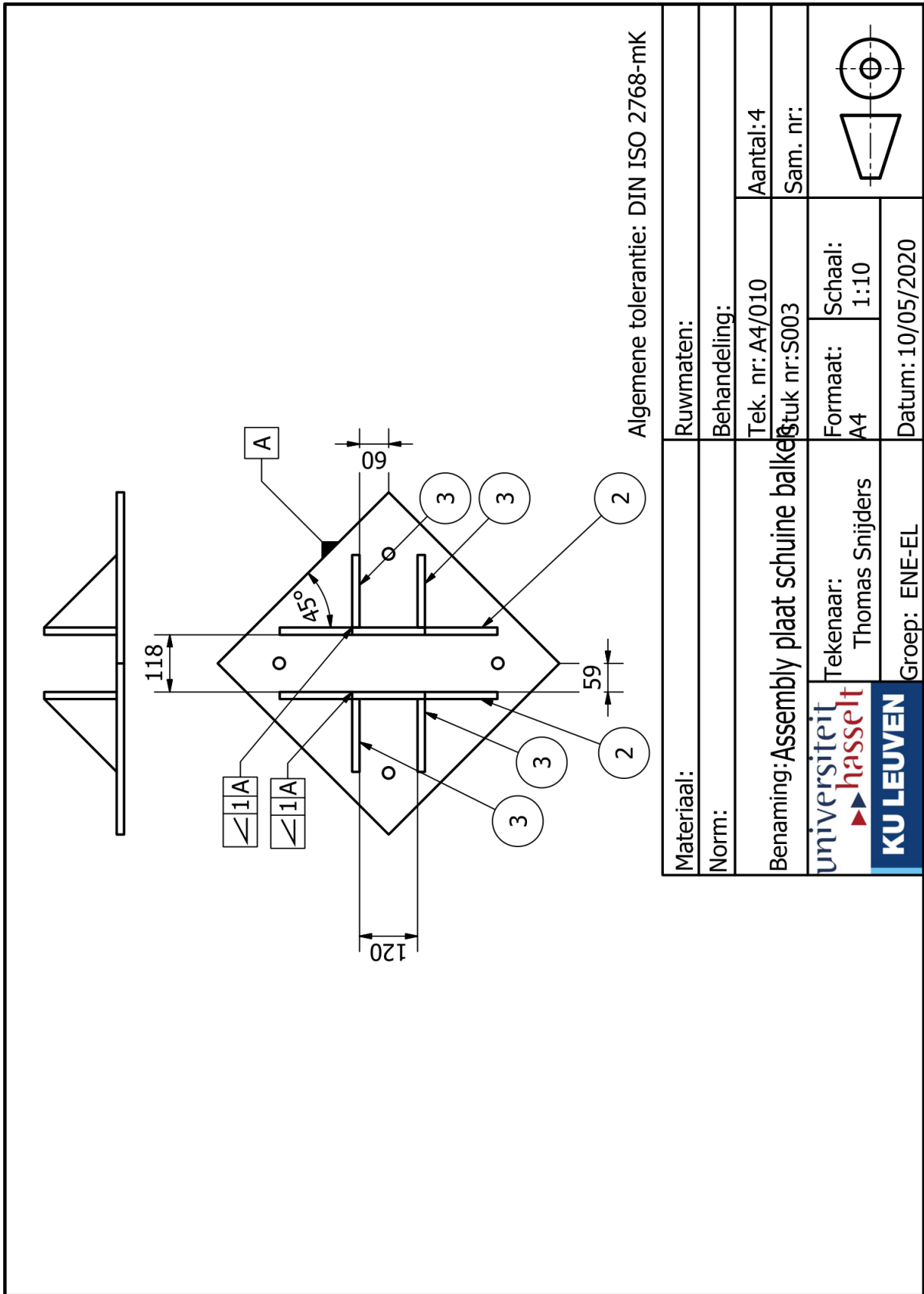
Algemene tolerantie: DIN EN ISO 2768-mK

Materiaal:		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling: Verven	
Benaming: Assembly_bus_schuine_balken		Tek. nr: A4/003	Aantal: 1
		Stuk nr: S002	Sam. nr:
	Tekenaar: K. Van Wassenhove	Formaat: A4	Schaal: 1:5
	Groep: ENE-EL	Datum: 27/04/2020	

BIJLAGE I: TECHNISCHE TEKENING ONDERPLAAT SCHUINE BALKEN

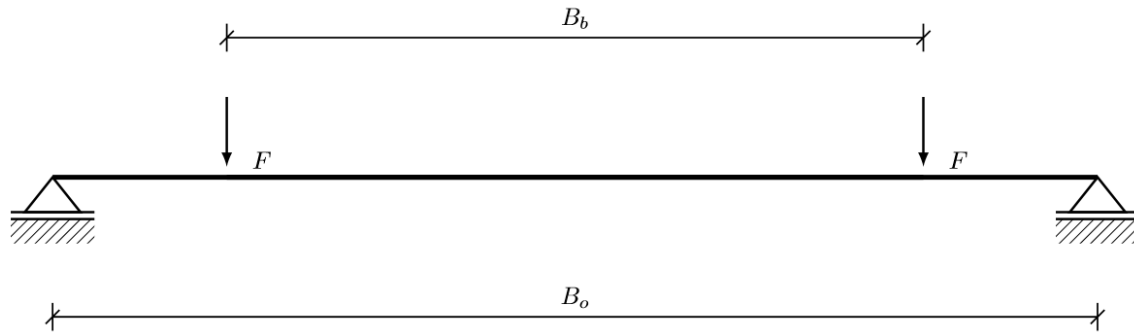


BIJLAGE J: TECHNISCHE TEKENING ASSEMBLY PLAAT SCHUINE BALKEN



Materiaal:	Ruwmaten:	
Norm:	Behandeling:	
Benaming: Assembly plaat schuine balken	Tek. nr: A4/010	Aantal: 4
	Stuk nr: S003	Sam. nr:
universiteit hasselt Tekenaar: Thomas Sniijders	Formaat: A4	Schaal: 1:10
	Datum: 10/05/2020	
KU LEUVEN Groep: ENE-EL		

BIJLAGE K: STERKTEBEREKENING PEN VOOR SCHUINE BALK



FIGUUR 74: INWERKENDE KRACHTEN OP PEN

B_o is de afstand tussen de reactiekrachten (de opstaande balken waar de pen door gaat). B_b is de afstand tussen de inwerkende krachten (de schuine balk). De afstand $B_o = 0.133$ m, de afstand $B_b = 0.08$ m. De gekozen pen heeft een straal $r = 0.025$ m en is gemaakt uit S235 staal.

Zoals in '4.2 Sterkteberekening' besproken is de grootste kracht op de schuine balken in de horizontale richting $F_x = 13.26$ kN en in de verticale richting $F_y = 21.26$ kN. Hieruit kan volgens de stelling van Pythagoras de vectorsom van de krachten berekend worden:

$$F_{\text{totaal}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(13.26 \text{ kN})^2 + (21.26 \text{ kN})^2} = 25.06 \text{ kN} \quad (186)$$

Deze kracht wordt verdeeld over de twee wanden van de schuine balk waar de pen door gaat:

$$F = \frac{F_{\text{totaal}}}{2} = \frac{25.06 \text{ kN}}{2} = 12.53 \text{ kN} \quad (187)$$

Het krachtenevenwicht en de snedekrachtendiagrammen worden eerst symbolisch uitgerekend, daarna worden de variabelen ingevuld.

In de x-richting (volgens de oriëntatie van het vrijlichaamsschema) werken er geen krachten. Hieronder wordt het krachtenevenwicht in de Y-richting en het moment om de oorsprong berekend.

$$\begin{cases} \Sigma F_Y: F_{RY1} + F_{RY2} - 2 * F = 0 \\ \Sigma M_o: F * \left(\frac{B_o - B_b}{2}\right) + F * \left(B_o - \frac{B_o - B_b}{2}\right) - F_{RY2} * B_o = 0 \end{cases} \quad (188)$$

$$\Leftrightarrow F = F_{RY1} = F_{RY2} \quad (189)$$

Nu de reactiekrachten gekend zijn wordt de figuur opgedeeld in drie snedes (tussen elke inwerkende kracht) van links naar rechts. Voor elke snede wordt de dwarskracht V en het moment M uitgerekend. De normaalkracht is overal nul vermits er geen krachten in de x-richting werken.

Snede 1 (tussen de linkse opstaande plaat en de linkse schuine balk):

$$V = F \quad (190)$$

$$M = F * x \quad (191)$$

Snede 2 (tussen de linkse en rechtse kant van de schuine balk):

$$V = F - F = 0 \quad (192)$$

$$M = F * x - F * (x - \frac{B_o - B_b}{2}) = F * (\frac{B_o - B_b}{2}) \quad (193)$$

Snede 3 (tussen de rechtse kant van de schuine balk en de rechtse opstaande plaat):

$$V = F - 2 * F = -F \quad (194)$$

$$M = F * x - F * (x - \frac{B_o - B_b}{2}) - F * (x - B_b - \frac{B_o - B_b}{2}) \quad (195)$$

De dwarskracht is het grootste tussen de linkse opstaande wand en de linkse wand van de schuine balk en tussen de rechtse wand van de schuine balk en de rechtse opstaande wand. Het moment is het grootste tussen de wanden van de schuine balk. De spanningen zijn dus het grootste op de plaats waar de schuine balk de pen raakt, hier zijn zowel dwarskracht als moment maximaal.

De pen wordt volgens twee soorten spanning belast: afschuiving en buiging. De afschuifspanning is het grootste op de neutrale lijn, en de buiging is het grootste aan de boven- en onderzijde van de pen. Hieronder worden de uiterste gevallen (de afschuifspanning op de neutrale lijn, en de buigspanning op de boven- of onderzijde) berekend.

Afschuiving:

De formule voor afschuiving is [81]:

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} \quad (196)$$

met:

- τ [Pa]: de schuifspanning,
- V [N]: de inwendige resulterende dwarskracht,
- $Q = \bar{y}' * A'$ [m³]: waarin A' het bovenste deel van de dwarsdoorsnede is boven de snede waar t wordt gemeten en \bar{y}' de afstand van het zwaartepunt tot de neutrale lijn van A' ,
- I [m⁴] het buigtraagheidsmoment van de gehele doorsnede,
- t [m]: de breedte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede.

De maximaal optredende inwendige dwarskracht V is gelijk aan de inwerkende kracht van de schuine balk op de as:

$$V = F \quad (197)$$

Vermits de pen een volle cilinder is kan het buigtraagheidsmoment I geschreven worden als:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (198)$$

De breedte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede t is in het geval van een cilinder:

$$t = 2 * r \quad (199)$$

De afstand van het zwaartepunt tot de neutrale lijn van A' , \bar{y}' is bij een halve cirkel gelijk aan:

$$\bar{y}' = \frac{4 * r}{3 * \pi} \quad (200)$$

De oppervlakte van het bovenste deel van de dwarsdoorsnede boven de snede waar t wordt gemeten is gelijk aan:

$$A' = \frac{\pi * r^2}{2} \quad (201)$$

Deze variabelen kunnen ingevuld worden in de formule voor afschuifspanning:

$$\tau = \frac{F * Q}{I * t} = \frac{F * \frac{4 * r}{3 * \pi} * \frac{\pi * r^2}{2}}{\frac{\pi * r^4}{4} * 2 * r} = \frac{4 * F}{3 * \pi * r^2} \quad (202)$$

Indien nu de variabele kracht F en de straal van de pen r ingevuld worden:

$$\tau = \frac{4 * F}{3 * \pi * r^2} = \frac{4 * 12.53 * 10^3 N}{3 * \pi * (0.025 m)^2} = 8.51 MPa \quad (203)$$

Volgens de grensspanningshypothese van Hüber, Hencky en Von Mises [163] kan deze spanning τ omgezet worden naar een ideële spanning σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = \sqrt{3 * (8.51 MPa)^2} = 14.7 MPa \quad (204)$$

Dit is veel lager dan de vloeigrens van S235 staal: 235 MPa. Deze pendiameter kan de afschuiving weerstaan.

Buiging:

De formule voor buiging is [81]:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (205)$$

met:

- σ [Pa]: de normaalspanning,
- M [Nm]: het resulterende inwendige moment,
- y [m]: de loodrechte afstand van de neutrale lijn tot het punt waar de buigspanning bepaald wordt,
- I [m^4]: het buigtraagheidsmoment.

Het maximaal optredende inwendige moment M is gelijk aan:

$$M = F * \left(\frac{B_o - B_b}{2} \right) \quad (206)$$

Vermits de pen een volle cilinder is kan het buigtraagheidsmoment I geschreven worden als:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (207)$$

Deze variabelen kunnen vervangen worden in de formule voor buigspanning:

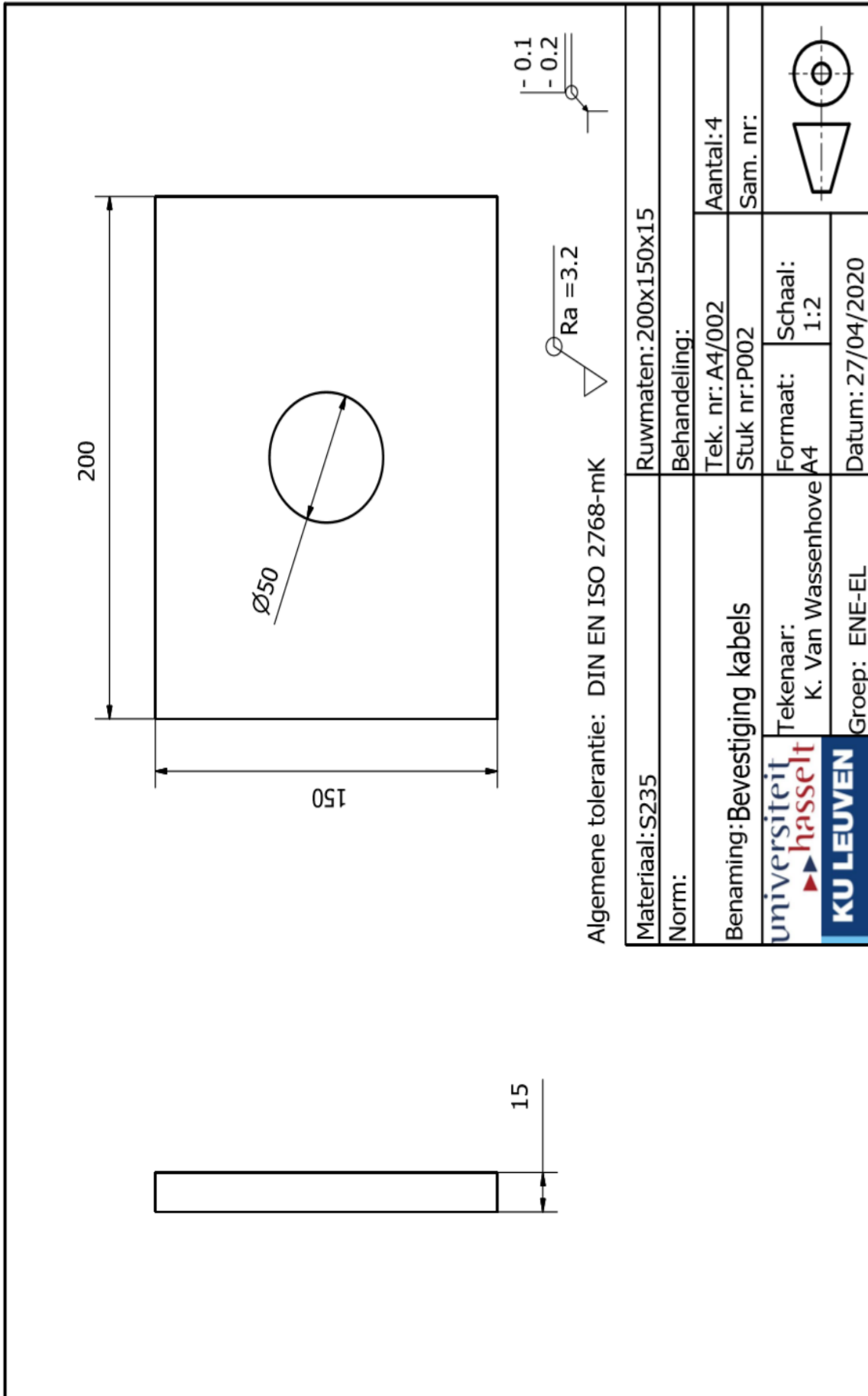
$$\sigma = \frac{M * y}{I} = \frac{F * \left(\frac{B_o - B_b}{2}\right) * r}{\frac{\pi * r^4}{4}} = \frac{2 * F * (B_o - B_b)}{\pi * r^3} \quad (208)$$

Indien nu de kracht F, de straal r en de afstanden B_o en B_b ingevuld worden:

$$\sigma = \frac{2 * 12.53 * 10^3 N * (0.133m - 0.08m)}{\pi * (0.025m)^3} = 27.1 MPa \quad (209)$$

Dit is veel lager dan de vloeigrens van S235 staal: 235 MPa. Deze pendiameter kan de buiging weerstaan.

BIJLAGE L: TECHNISCHE TEKENING BEVESTIGING KABELS



BIJLAGE M: STERKTEBEREKENING AS VOOR HET SCHARNIER

Zoals uitgelegd in 4.7 *Kantelmech* is het scharnier opgebouwd uit twee platen, verbonden aan buizen die kunnen draaien rond een as. Omdat deze as een essentieel element is, wordt deze overgedimensioneerd zodat deze niet kan falen. De maximale kracht dat deze as moet kunnen weerstaan, treedt op wanneer de toren rechtgetrokken wordt, en is gelijk aan 10.6kN.

De as van het scharnier wordt gemaakt uit een massieve stalen (S235) buis met diameter 50mm.

Rond de as zitten er 7 buizen waarvan er 4 verbonden zijn aan de onderste plaat en 3 verbonden zijn aan de bovenste plaat. Om de berekening te vereenvoudigen wordt er beschouwd dat de kracht door elke buis gelijkmatig wordt gedragen. Elke buis heeft een lengte van 0.1 m.

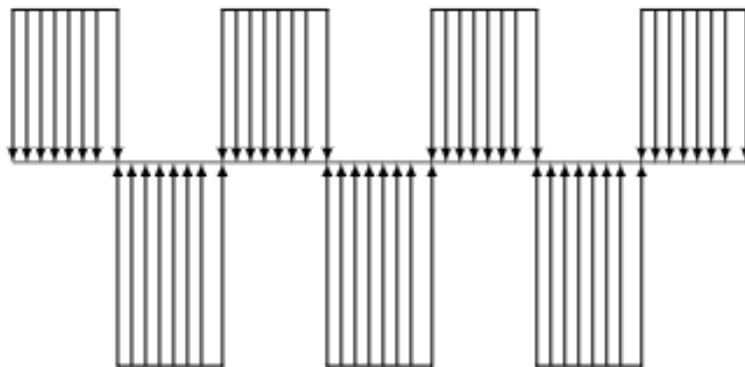
De kracht op elk deel van de bovenste buis bedraagt:

$$q_{\text{bovenstebuis}} = \frac{10.6 \text{ kN}}{3 * 0.1 \text{ m}} = 35.33 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (210)$$

De kracht op elk deel van de onderste buis bedraagt:

$$q_{\text{onderstebuis}} = \frac{8.73 \text{ kN}}{4 * 0.1 \text{ m}} = 21.825 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (211)$$

Het vrijlichaamsschema van deze as is afgebeeld in Figuur 75.



FIGUUR 75: VRIJLICHAAMSCHEMA VAN DE AS VOOR HET SCHARNIER

Snedekrachten:

Snede 1:

Snede 1 loopt van 0m tot 0.1m. De normaalkracht N in de as is:

$$N = 0 \text{ kN} \quad (212)$$

De dwarskracht V is gelijk aan:

$$V = q_{\text{onderstebuis}}x = 21.825x \text{ kN} \quad (213)$$

Het interne moment M is gelijk aan:

$$M = q_{\text{onderstebuis}} \frac{x^2}{2} = 10.9125x^2 \text{ kNm} \quad (214)$$

Snede 2 (0.1m - 0.2m):

De normaalkracht N is gelijk aan:

$$N = 0 \text{ kN} \quad (215)$$

De dwarskracht V is gelijk aan:

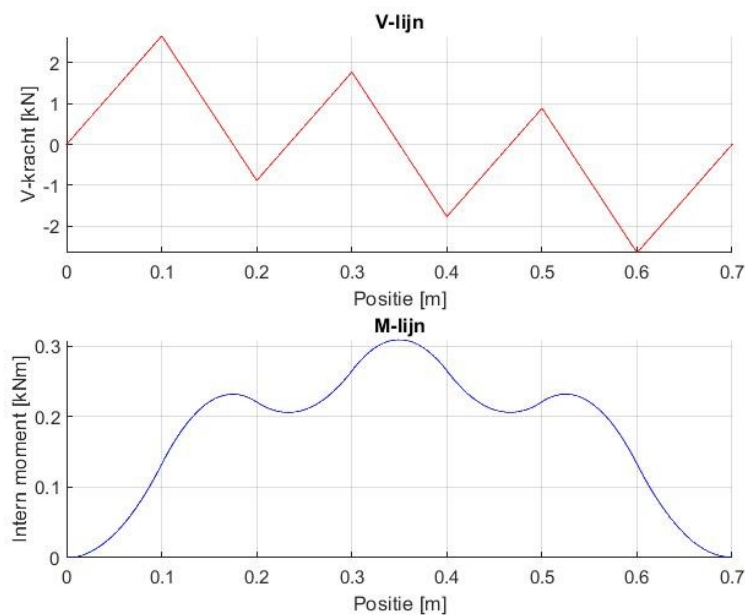
$$V = 6.183 - 35.33x \text{ kN} \quad (216)$$

Het intern moment M is gelijk aan:

$$M = -17.665x^2 + 6.183x - 0.30915 \text{ kNm} \quad (217)$$

Andere sneden:

De andere sneden zijn analoog, de M- en V-lijnen van de scharnieras wordt afgebeeld in Figuur 76. De maximale dwarskracht op punt 1 (0.1 m) is gelijk aan 2.65 kN (met een intern moment gelijk aan 132.5 Nm). Het maximaal intern moment op punt 2 (0.35 m) is gelijk aan 309 Nm.

**FIGUUR 76: M-/ V-LIJN VAN DE SCHARNIERAS**Punt 1:

In punt 1 wordt de as zowel belast op afschuiving en buiging.

Afschuiving

De formule voor afschuiving is [81]:

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} \quad (218)$$

met:

- τ [Pa]: de schuifspanning,
- V [N]: de inwendige resulterende dwarskracht,
- $Q = \bar{y}' * A'$ [m^3]: waarin A' het bovenste deel van de dwarsdoorsnede is boven de snede waar t wordt gemeten en \bar{y}' de afstand van het zwaartepunt tot de neutrale lijn van A' ,
- I [m^4] het buigtraagheidsmoment van de gehele doorsnede,
- t [m]: de breedte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede.

Vermits de as een volle cilinder is kan het buigtraagheidsmoment I geschreven worden als:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (219)$$

De breedte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede t is in het geval van een cilinder:

$$t = 2 * r \quad (220)$$

De afstand van het zwaartepunt tot de neutrale lijn van A' , \bar{y}' is bij een halve cirkel gelijk aan:

$$\bar{y}' = \frac{4 * r}{3 * \pi} \quad (221)$$

De oppervlakte van het bovenste deel van de dwarsdoorsnede boven de snede waar t wordt gemeten is gelijk aan:

$$A' = \frac{\pi * r^2}{2} \quad (222)$$

Deze variabelen kunnen ingevuld worden in de formule voor afschuifspanning:

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} = \frac{V * \frac{4 * r}{3 * \pi} * \frac{\pi * r^2}{2}}{\frac{\pi * r^4}{4} * 2 * r} = \frac{4 * V}{3 * \pi * r^2} = \frac{4 * 2.65 * 10^3 N}{3 * \pi * (0.025 m)^2} = 1.80 MPa \quad (223)$$

Buiging

De formule voor buiging is [81]:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (224)$$

met:

- σ [Pa]: de normaalspanning,
- M [Nm]: het resulterende inwendige moment,
- y [m]: de loodrechte afstand van de neutrale lijn tot het punt waar de buigspanning bepaald wordt,
- I [m^4]: het buigtraagheidsmoment.

Vermits de pen een volle cilinder is kan het buigtraagheidsmoment I geschreven worden als:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (225)$$

Buiging is gelijk aan:

$$\sigma = \frac{109 Nm * 0.025 m}{\frac{\pi * (0.025 m)^4}{4}} = 10.8 MPa \quad (226)$$

Volgens de grensspanningshypothese van Hüber, Hencky en Von Mises [163] kunnen deze spanningen opgeteld worden naar een ideële spanning σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = \sqrt{(10.8 MPa)^2 + 3 * (1.80 MPa)^2} = 11.2 MPa \quad (227)$$

Dit is veel lager dan de vloeigrens van S235 staal: 235 MPa. Deze pendiameter kan de belasting in punt 1 weerstaan.

Punt 2

De formule voor buiging is [81]:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (228)$$

met:

- σ [Pa]: de normaalspanning,
- M [Nm]: het resulterende inwendige moment,
- y [m]: de loodrechte afstand van de neutrale lijn tot het punt waar de buigspanning bepaald wordt.
- I [m^4] het buigtraagheidsmoment van de gehele doorsnede,

Vermits de pen een volle cilinder is kan het buigtraagheidsmoment I geschreven worden als:

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad (229)$$

De buigspanning is gelijk aan:

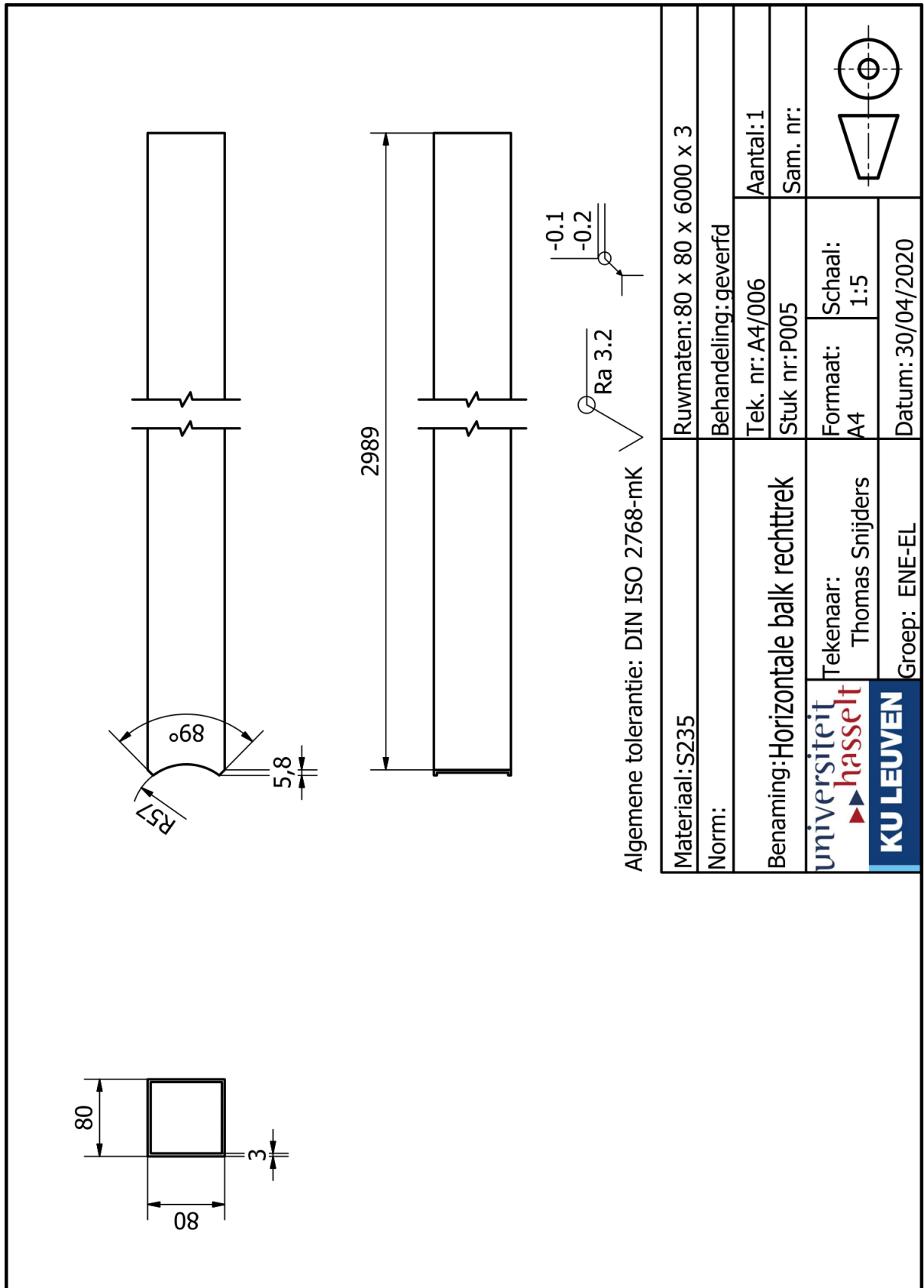
$$\sigma = \frac{309 \text{ Nm} * 0.025 \text{ m}}{\frac{\pi * (0.025 \text{ m})^4}{4}} = 25.2 \text{ MPa} \quad (230)$$

Dit is veel lager dan de vloeigrens van S235 staal: 235 MPa. Deze pendiameter kan de belasting in punt 2 weerstaan.

Conclusie

De as kan de belasting dragen met een voldoende hoge veiligheidsfactor. Dit betekent als er een onbekende extra belasting optreedt of tijdens het neerhalen van de toren er een windstoot is, de as van het scharnier deze belasting aankan.

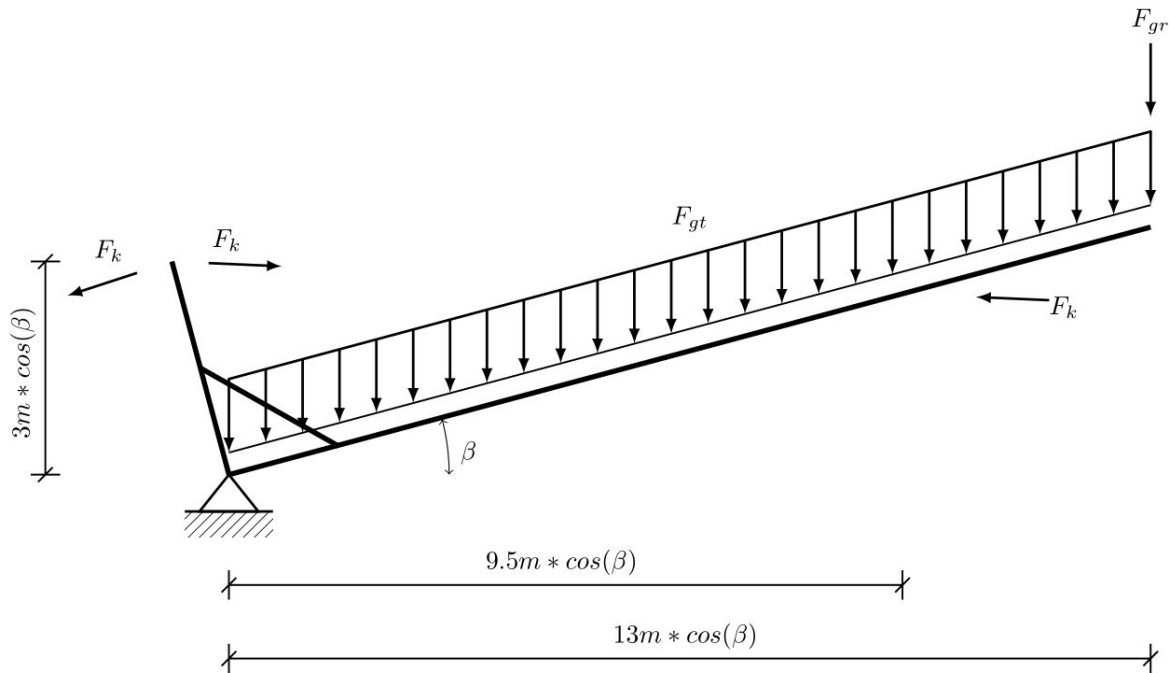
BIJLAGE N: TECHNISCHE TEKENING HORIZONTALE BALK RECHTTREK



Algemene tolerantie: DIN ISO 2768-mK

Materiaal: S235	Ruwmaten: 80 x 80 x 6000 x 3
Norm:	Behandeling: geverfd
Benaming: Horizontale balk rechttrek	Tek. nr: A4/006 Aantal: 1
universiteit hasselt Tekenaar: Thomas Snijders	Stuk nr: P005 Sam. nr:
	Formaat: A4 Schaal: 1:5
Groep: ENE-EL KU LEUVEN	Datum: 30/04/2020

BIJLAGE O: STERKTEBEREKENING SCHUINE BALK RECHTTREK



FIGUUR 77: VRIJLICHAAMSSCHEMA RECHTTREKKEN WINDMOLEN

Zoals vermeld in '4.7 Kantelmechanisme', worden er twee balken op de toren gelast om de kracht in de kabel te beperken, wanneer de windmolen rechtgetrokken wordt. In Figuur 77 is het vrijlichaamsschema van de windmolen weergegeven, op het moment dat deze rechtgetrokken wordt. In het vrijlichaamsschema worden de inwerkende krachten weergegeven: F_{gt} en F_{gr} zijn respectievelijk het gewicht van de toren (een verdeelde belasting) en het gewicht van de rotor. F_k is de kracht die inwerkt op de kabel. Deze krachten worden allen berekend in '4.1 Inwerkende krachten'. Daarnaast worden de belangrijkste afmetingen weergegeven. Op het einde van de bijlage wordt er eveneens een simulatiemodel in Diamonds getoond ter controle.

De hoek β is de hoek tussen de het horizontale vlak en de windmolen. Van zodra deze hoek groter wordt dan 35° komt de kabel los van de balk, en is er dus geen spanning meer in de balk. Van zodra de hoek kleiner wordt dan 15° kan de windmolen rusten op een houten ondersteuning, waardoor er eveneens geen spanning meer is in de balk. Hoe horizontaler de windmolen komt, hoe groter het moment. De sterkteberekening wordt dus uitgevoerd bij een hoek $\beta = 15^\circ$.

Eerst worden enkele vereenvoudigingen, hoeken en variabelen geïntroduceerd. De lengte van de kabel, van de top van de balk tot de inklemming in de fundering kan berekend worden a.d.h.v. de cosinusregel.:

$$l_{\text{deel kabel}} = \sqrt{(9.5 \text{ m})^2 + (3 \text{ m})^2 - 2 * (9.5 \text{ m}) * (3 \text{ m}) * \cos(90^\circ - \beta)} \quad (231)$$

Bij een hoek van $\beta = 15^\circ$ is deze lengte gelijk aan $l_{\text{deel kabel}} = 9.19 \text{ m}$. M.b.v. de sinusregel kan bepaald worden welke hoek δ dit deel van de kabel maakt met het horizontale vlak:

$$\frac{\sin(\delta)}{3 \text{ m}} = \frac{\sin(90^\circ - \beta)}{l_{\text{deel kabel}}} \quad (232)$$

Indien de lengte van de kabel hierin vervangen wordt, en de hoek $\beta = 15^\circ$ ingevuld wordt, blijkt dat de hoek $\delta = 18.4^\circ$. De rest van de kabel (tussen de top van de balk en de bevestiging aan de toren) staat steeds onder dezelfde hoek (als $\beta < 35^\circ$). Deze hoek α is:

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{3 \text{ m}}{9.5 \text{ m}}\right) = 17.5^\circ \quad (233)$$

De hoek θ tussen het horizontale vlak en de rest van de kabel is:

$$\theta = (180^\circ - 90^\circ - \beta) + a - 90^\circ = \alpha - \beta \quad (234)$$

Bij $\beta = 15^\circ$ is $\theta = 2.5^\circ$. Het gewicht van de toren en het gewicht van de rotor worden samen opgeteld:

$$F_T + F_r = 2.03 \text{ kN} + 1 \text{ kN} = 3.03 \text{ kN} \quad (235)$$

Beide momenten worden eveneens opgeteld:

$$2.03 \text{ kN} * 6.5 \text{ m} + 1 \text{ kN} * 13 \text{ m} = 26.20 \text{ kNm} \quad (236)$$

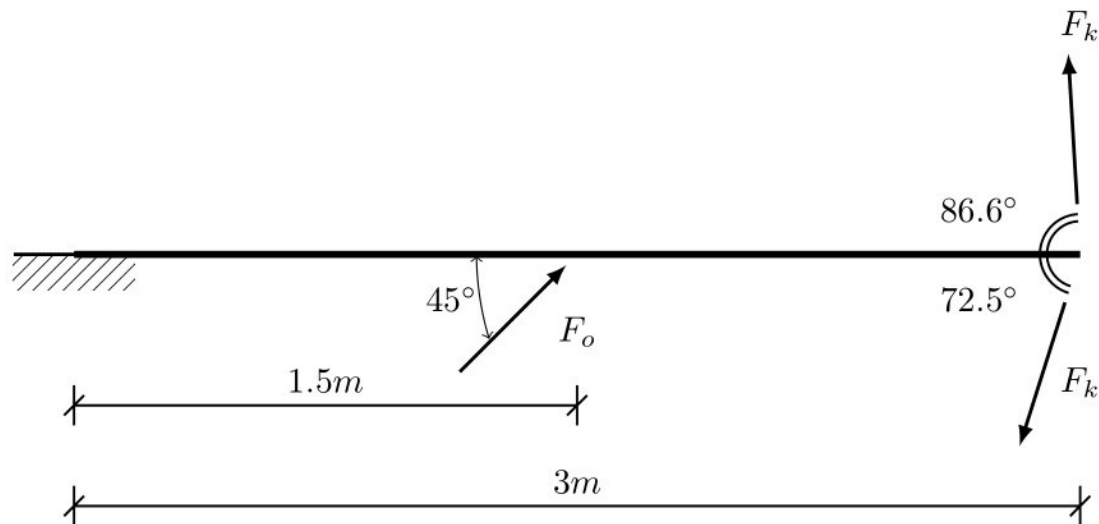
Om te berekenen wat de spanning in de balk is, moet er eerst het krachtenevenwicht van de windmolen opgesteld worden. Hiervoor wordt enkel rekening gehouden met de toren en de kabel.

$$\begin{cases} F_x: F_x - F_k * \cos(2.5^\circ) = 0 \\ F_y: F_y + F_k * \sin(2.5^\circ) - 3.03 \text{ kN} = 0 \\ M_o: F_k * \cos(2.5^\circ) * 9.5 \text{ m} * \sin(15^\circ) - 26.20 \text{ kNm} * \cos(15^\circ) = 0 \end{cases} \quad (237)$$

Dit stelsel uitwerken geeft:

$$\begin{cases} F_x = 10.3 \text{ kN} \\ F_y = 2.6 \text{ kN} \\ F_k = 10.3 \text{ kN} \end{cases} \quad (238)$$

Nu de kracht in de kabel berekend is, kan het vrijlichaamsschema van het kantelmechanisme (de twee balken) opgesteld worden.



FIGUUR 78: VRIJLICHAAAMSSHEMA BALK RECHTTREK

Aan de hand van het vrijlichaamsschema in Figuur 78 kan het krachtenevenwicht van de balk opgesteld worden. De kracht op de kabel F_k is in de vorige berekening berekend. De Vermits de balk aan de onderkant vastgelast is aan de toren van de windmolen, kan deze beschouwd worden als een inklemming (zoals weergegeven in het vrijlichaamsschema). Voor deze berekening wordt er echter gerekend alsof het een scharnier is, om de berekening te vereenvoudigen. De kracht F_o is de ondersteuning door de schuine balk van het kantelmechanisme.

$$\begin{cases} F_x: F_x + F_o * \cos(45^\circ) - F_k * \cos(72.5^\circ) - F_k * \cos(86.6^\circ) = 0 \\ F_y: F_y + F_o * \sin(45^\circ) - F_k * \sin(72.5^\circ) + F_k * \sin(86.6^\circ) = 0 \\ M_o: F_o * \sin(45^\circ) * 1.5m - F_k * \sin(72.5^\circ) * 3m + F_k * \sin(86.6^\circ) * 3m = 0 \end{cases} \quad (239)$$

Dit stelsel uitwerken geeft:

$$\begin{cases} F_x = 4.6 \text{ kN} \\ F_y = 0.5 \text{ kN} \\ F_o = -1.3 \text{ kN} \end{cases} \quad (240)$$

Nu alle krachten op de balken van het kantelmechanisme gekend zijn, kan de balk opgedeeld worden in twee snedes (van links naar rechts).

Snede 1 (van het scharnierpunt tot de ondersteunende balk):

$$N = -F_x = -4.6 \text{ kN} \quad (241)$$

$$V = F_y = 0.5 \text{ kN} \quad (242)$$

$$M = F_y * x = 0.5 \text{ kN} * x \quad (243)$$

Snede 2 (van de ondersteunende balk tot de top van de balk):

$$N = -F_x + F_o * \cos(45^\circ) = -5.5 \text{ kN} \quad (244)$$

$$V = F_y + F_o * \sin(45^\circ) = 0.5 \text{ kN} + (-1.3 \text{ kN}) * \sin(45^\circ) = -0.4 \text{ kN} \quad (245)$$

$$\begin{aligned} M &= F_y * x + F_o \\ &* \sin(45^\circ) * (x - 1.5 \text{ m}) = 0.5 \text{ kN} * x - 1.3 \text{ kN} (x - 1.5 \text{ m}) \\ &= 1.95 \text{ kNm} - 0.8 \text{ kN} * x \end{aligned} \quad (246)$$

De totale spanning is het grootste op het punt waar de balk aan de ondersteuning bevestigd is ($x = 1.5 \text{ m}$). Op dit punt treden drie belastingsgevallen op: druk afschuiving en buiging. De drukkracht is op elke plaats van de doorsnede even groot, de afschuifspanning is maximaal op de neutrale lijn en de buiging is het grootste zo ver mogelijk van de neutrale lijn. Daarom worden eerst druk en afschuiving opgeteld (op de neutrale lijn), en erna druk en buiging (op de rand van de balk, zo ver mogelijk van de neutrale lijn). Hierna worden de spanningen opgeteld volgens een grensspanningshypothese.

Druk:

De formule voor drukspanning is [81]:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (247)$$

De oppervlakte van de doorsnede van de balk is:

$$A = 80 * 10^{-3} \text{ m} * 80 * 10^{-3} \text{ m} - 77 * 10^{-3} \text{ m} * 77 * 10^{-3} \text{ m} = 4.71 * 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (248)$$

De normaalkracht $N = -5.5 \text{ kN}$. Hieruit volgt dat de drukspanning $\sigma = -11.7 \text{ MPa}$

Afschuiving:

De formule voor afschuiving is [81]:

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} \quad (249)$$

met:

- τ [Pa]: de schuifspanning,
- V [N]: de inwendige resulterende dwarskracht,
- $Q = \bar{y}' * A'$ [m^3]: waarin A' het bovenste deel van de dwarsdoorsnede is boven de snede waar t wordt gemeten en \bar{y}' de afstand van het zwaartepunt tot de neutrale lijn van A' ,
- I [m^4] het buigtraagheidsmoment van de gehele doorsnede,
- t [m]: de breedte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede.

Vermits de as een holle balk is kan het buigtraagheidsmoment I geschreven worden als:

$$I = \frac{b_{buiten} * h_{buiten}^3}{12} - \frac{b_{binnen} * h_{binnen}^3}{12} = \frac{(80 * 10^{-3} m)^4}{12} - \frac{(77 * 10^{-3} m)^4}{12} \quad (250)$$

Hieruit blijkt dat het buigtraagheidsmoment $I = 4.48 * 10^{-7} m^4$. De breedte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede t is:

$$t = 2 * 0.003 m = 0.006 m \quad (251)$$

Vermits dit een dunwandig profiel is, kan het statisch oppervlaktetraagheidsmoment Q berekend worden volgens de hartlijnen [81]:

$$Q = \Sigma \bar{y}' A' = 2 * \left(\frac{0.0385 m}{2}\right)(0.003 m * 0.0385 m) + 0.0385 m * 0.0785 m * 0.003 m \quad (252)$$

Hieruit blijkt dat het statisch oppervlaktetraagheidsmoment $Q = 1.35 * 10^{-5} m^3$. Deze variabelen kunnen ingevuld worden in de formule voor afschuifspanning:

$$\tau = \frac{V * Q}{I * t} = \frac{0.4 * 10^3 N * 1.35 * 10^{-5} m^3}{4.48 * 10^{-7} m^4 * 0.006 m} = 2.0 MPa \quad (253)$$

Buiging

De formule voor buiging is [81]:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (254)$$

met:

- σ [Pa]: de normaalspanning,
- M [Nm]: het resulterende inwendige moment,
- y [m]: de loodrechte afstand van de neutrale lijn tot het punt waar de buigspanning bepaald wordt,
- I [m^4]: het buigtraagheidsmoment.

De maximale waarde van $y = 0.040 m$. Het buigtraagheidsmoment $I = 4.48 * 10^{-7} m^4$, zoals berekend bij schuifspanning.

De buigspanning is gelijk aan:

$$\sigma = \frac{0.75 * 10^3 Nm * 0.040 m}{4.48 * 10^{-7} m^4} = 67.0 MPa \quad (255)$$

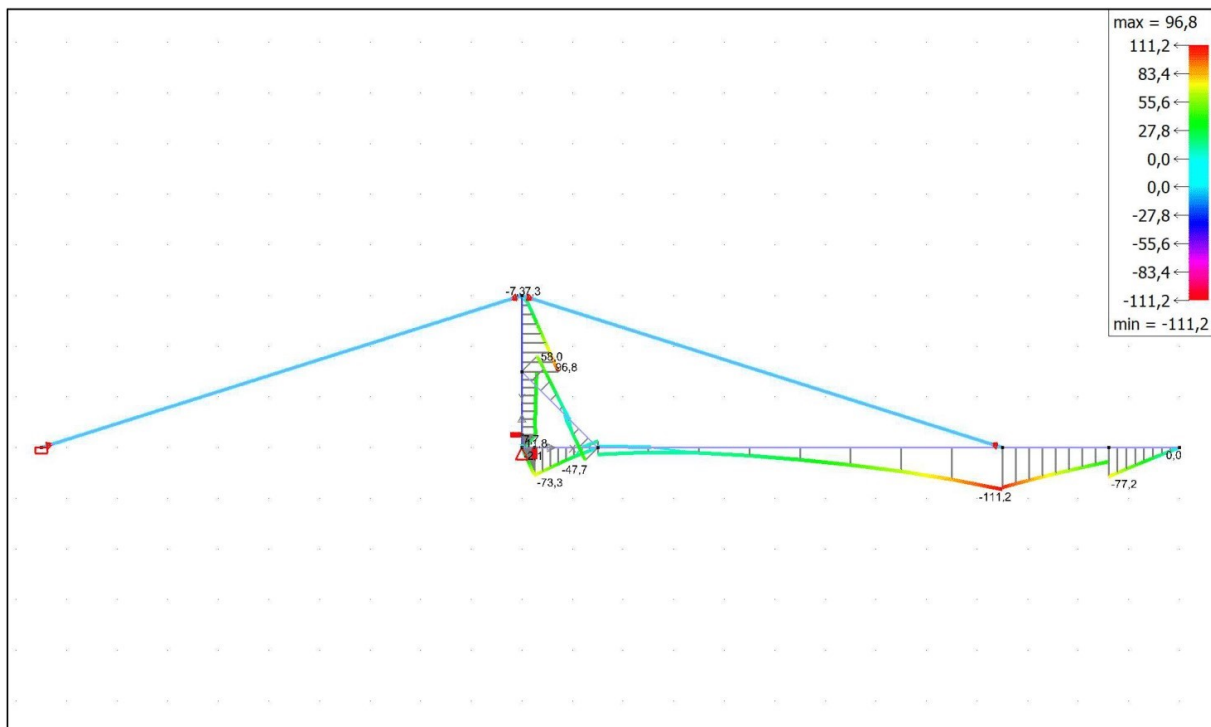
Op het tegenovergestelde deel van de balk is de spanning even groot maar negatief. Nu de spanningen bij de drie belastingsgevallen berekend zijn, kunnen deze spanningen opgeteld worden om de totale spanning te kennen. Eerst worden druk en afschuiving opgeteld m.b.v. de grensspanningshypothese van Hüber, Hencky en Von Mises. Volgens deze hypothese kunnen de spanningen opgeteld worden naar een ideële spanning σ_i [163]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} = \sqrt{(11.7 \text{ MPa})^2 + 3 * (2.0 \text{ MPa})^2} = 12.2 \text{ MPa} \quad (256)$$

De spanningen van veroorzaakt door druk en buiging kunnen algebraïsch opgeteld worden. Hiervoor wordt de negatieve buigspanning gebruikt (vermits drukspanning ook negatief is, en zo de grootste spanning kan bepaald worden):

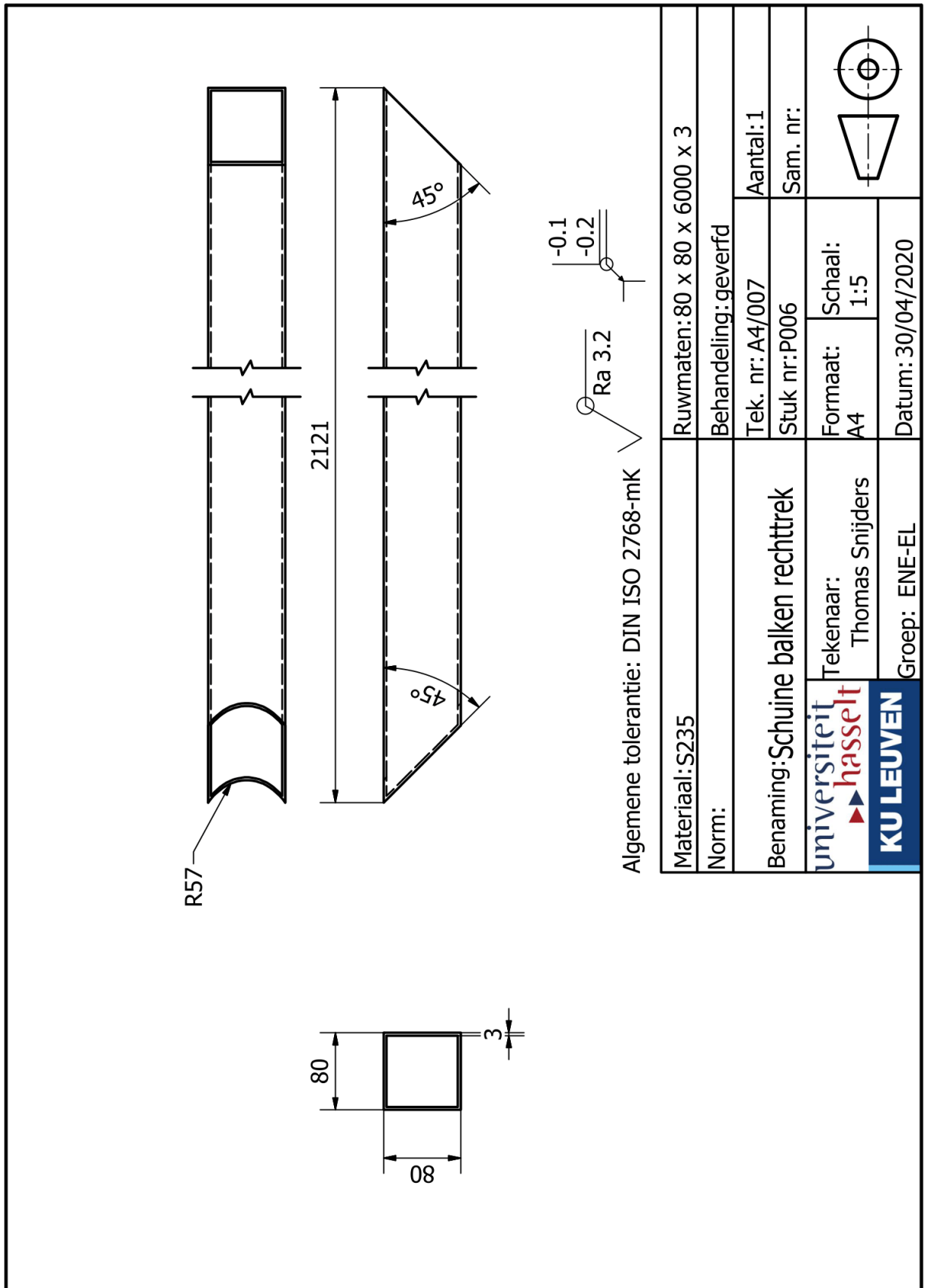
$$\sigma_{\text{totaal}} = \sigma_{\text{druk}} + \sigma_{\text{buiging}} = -11.7 \text{ MPa} - 67.0 \text{ MPa} = -78.7 \text{ MPa} \quad (257)$$



De eerste totale spanning is véél kleiner dan de vloeigrens van S235 staal: 235 MPa. De tweede spanning is bijna 3 keer kleiner dan deze vloeigrens. Het kantelmechanisme kan alle inwerkende krachten dus weerstaan. Als controle, en om te kijken hoe zwaar de toren zelf belast wordt bij het rechtekken, wordt er eveneens een simulatiemodel in Diamonds opgesteld. In Figuur 79 is het model, met de spanningen zichtbaar. Hieruit blijkt dat, zelfs als de windmolen helemaal horizontaal ligt, de spanningen laag genoeg blijven. Hierbij is geen rekening gehouden met de extra kracht die nodig is om de windmolen vanuit stilstand te versnellen. Maar vermits het rechtekken met het katrol traag gebeurt, en er nog een marge is in de spanningen, is dit geen probleem.



FIGUUR 79: SPANNINGEN OP DE WINDMOLEN BIJ HET RECHTTREKKEN

BIJLAGE P: TECHNISCHE TEKENING SCHUINE BALK RECHTTREK



Material: S235	Ruwmaten: 80 x 80 x 6000 x 3
Norm:	Behandeling: geverfd
Benaming: Schuine balken rechttrek	Tek. nr: A4/007
 Tekenaar: Thomas Sniijders	Aantal: 1
	Sam. nr:
 Groep: ENE-EL	Formaat: A4
	Schaal: 1:5
	Datum: 30/04/2020

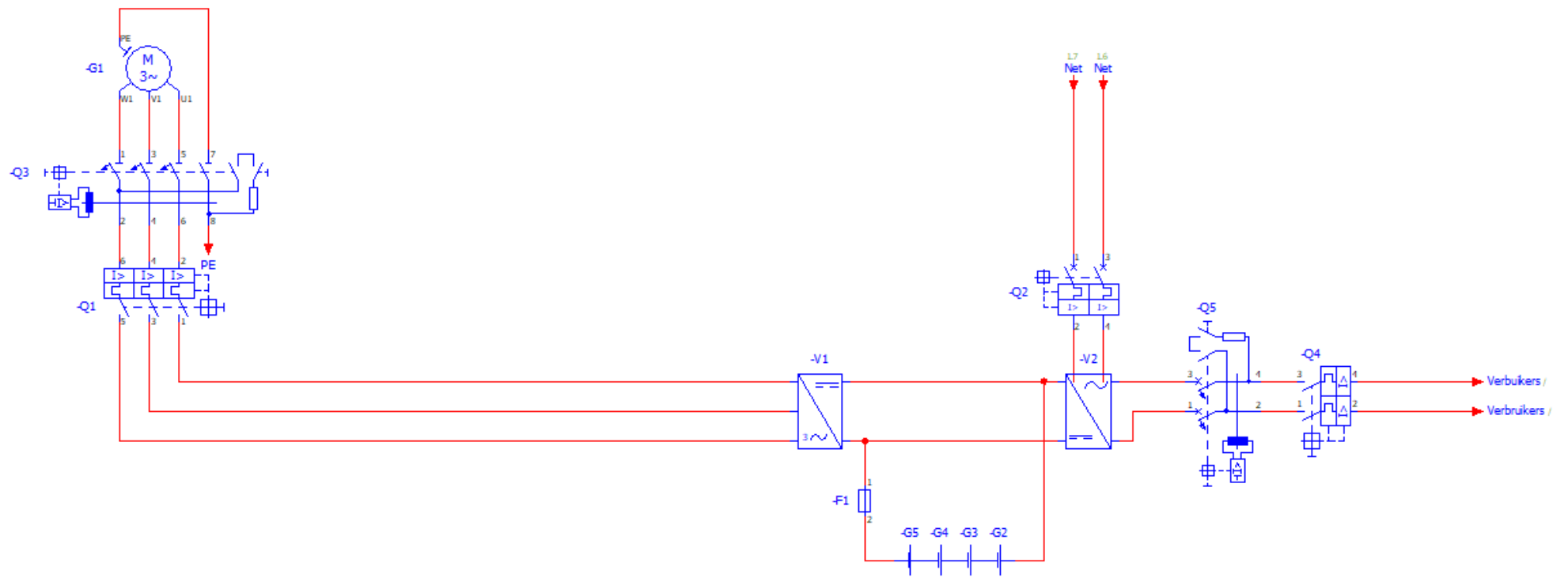
BIJLAGE Q: ITERATIEVE BEREKENING WIEKEN

r (m)	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
$\lambda r = (\Omega * r) / U = (10,47 * r) / 3,56$	0,000	0,735	1,471	2,206	2,941	3,676	4,412	5,147	5,882	6,617	7,353
$\delta = 2/3 * \text{bgtan}(1/\lambda r)$	1,047	0,625	0,398	0,284	0,219	0,177	0,149	0,128	0,112	0,100	0,090
$Q = (2/\pi) \text{bgcos}(\exp(-(N/2)(1 - r/R) / ((r/R)(\cos(\delta))))$	1,000	1,000	0,999	0,983	0,936	0,860	0,763	0,650	0,519	0,358	6,629E-04
$C = (2 * \pi * r * 8 * U) / (N * 9 * Cl * \lambda r * \text{sqrt}(U^2 + (\Omega * r)^2))$	0,462	0,372	0,260	0,191	0,149	0,121	0,102	0,088	0,077	0,069	0,062
$\sigma' = Nc / 2\pi r$	2,21E+06	7,11E-01	2,48E-01	1,21E-01	7,10E-02	4,63E-02	3,25E-02	2,40E-02	1,85E-02	1,46E-02	1,19E-02
$W = \text{sqrt}(U^2 + (\Omega r))$	3,560	4,419	6,331	8,622	11,059	13,563	16,103	18,665	21,240	23,825	26,416
$Re = (\rho * U * c) / \mu$	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,05E+05
$4 * \sin^2(\delta)$	3,000	1,368	0,601	0,314	0,188	0,124	0,088	0,065	0,050	0,040	0,032
$\sigma' Cl \cos(\delta)$	1,61E+06	8,44E-01	3,35E-01	1,71E-01	1,01E-01	6,67E-02	4,71E-02	3,49E-02	2,69E-02	2,13E-02	1,73E-02
$a = 1 / (1 + 4 * \sin^2(\delta) / \sigma' Cl \cos(\delta))$	1,000	0,382	0,358	0,352	0,351	0,350	0,349	0,349	0,349	0,349	0,349
$a' = (1 - 3a) / (4a - 1)$	-0,667	-0,275	-0,169	-0,140	-0,129	-0,123	-0,120	-0,119	-0,117	-0,117	-0,116
a vorige iteratiestap	0,000	0,266	0,194	0,125	0,083	0,058	0,043	0,032	0,025	0,020	0,017
a' vorige iteratiestap	-2,75E+12	3,26E-01	9,66E-02	4,60E-02	2,66E-02	1,72E-02	1,20E-02	8,88E-03	6,81E-03	5,39E-03	4,37E-03
$\delta = \text{bgtan}((1 - a) / (\lambda r(1 + a)))$	-1,571	0,924	0,541	0,393	0,310	0,255	0,216	0,187	0,165	0,148	0,134
$4 * \sin^2(\delta)$	3,000	1,368	0,601	0,314	0,188	0,124	0,088	0,065	0,050	0,040	0,032
$\sigma' Cl \cos(\delta)$	1,98E-10	6,27E-01	3,11E-01	1,64E-01	9,90E-02	6,56E-02	4,65E-02	3,46E-02	2,67E-02	2,12E-02	1,73E-02
$a = 1 / (1 + 4 * \sin^2(\delta) / \sigma' Cl \cos(\delta))$	0,000	0,265	0,194	0,125	0,083	0,058	0,043	0,032	0,025	0,020	0,017
$\sigma' Cl$	3,23E+06	1,04E+00	3,63E-01	1,78E-01	1,04E-01	6,78E-02	4,76E-02	3,52E-02	2,71E-02	2,14E-02	1,74E-02
$4 * \lambda r * \sin(\delta)$	0,000	2,347	3,029	3,381	3,585	3,708	3,785	3,836	3,871	3,897	3,915
$a' = (\sigma' Cl) / (4 * \lambda r * \sin(\delta))(1 - a)$	-2,75E+12	3,26E-01	9,66E-02	4,60E-02	2,66E-02	1,72E-02	1,20E-02	8,88E-03	6,81E-03	5,39E-03	4,37E-03
Δa	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\Delta a'$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$Q * \lambda r^3 a'(1 - a)[1 - (Cd/Cl) * \tan(\delta)]$	0,000	0,092	0,243	0,419	0,575	0,688	0,750	0,756	0,698	0,546	0,001
Gewichten numerieke integratie trapeziumregel	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
h/2	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01	3,68E-01
$8/\lambda^2$	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01
deel integraal	-3,51E-09	1,00E-02	2,64E-02	4,56E-02	6,25E-02	7,48E-02	8,16E-02	8,23E-02	7,59E-02	5,94E-02	6,14E-05

BIJLAGE R: STERKTEBEREKENING WIEKEN

r (m)	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	
$\lambda r = (\Omega \cdot r) / U = (10,47 \cdot r) / 3,56$	0,00	0,74	1,47	2,21	2,94	3,68	4,41	5,15	5,88	6,62	7,35	
$C = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot 8 \cdot U) / (N \cdot 9 \cdot Cl \cdot \lambda r \cdot \sqrt{U^2 + (\Omega \cdot r)^2})$	0,46	0,37	0,26	0,19	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,18
$W = \sqrt{U^2 + (\Omega r)}$	25,00	31,03	44,46	60,55	77,66	95,25	113,09	131,08	149,17	167,32	185,52	
Lengte	0,13	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,13	
A = Lengte * koorde	0,06	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,42
$Fl = 0,5 \cdot 1,4 \cdot A \cdot \rho \cdot W^2$	29,92	74,27	106,40	144,91	185,86	227,95	270,65	313,70	356,98	400,42	221,98	2333,03
$Fd = 0,5 \cdot 0,05 \cdot A \cdot \rho \cdot W^2$	1,07	2,65	3,80	5,18	6,64	8,14	9,67	11,20	12,75	14,30	7,93	83,32
$F = \sqrt{Fl^2 + Fd^2}$	29,94	74,31	106,47	145,00	185,98	228,10	270,82	313,90	357,21	400,67	222,12	2334,52
Fsom	1963,78	1933,84	1903,91	1829,59	1723,12	1578,13	1392,15	1164,05	893,23	579,33	222,12	
M = F*r	0,00	483,46	951,95	1372,20	1723,12	1972,66	2088,22	2037,09	1786,47	1303,50	555,31	14273,98
h	0,18	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,06	0,05	0,03	
$I = b \cdot h^3 / 12$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$\sigma = My / I$	0,00	0,29	0,98	2,37	4,83	8,85	15,15	24,66	38,45	55,95	59,46	
$\tau_{max} = 1,5 \cdot V / A$	0,04	0,05	0,07	0,11	0,14	0,19	0,23	0,26	0,29	0,28	0,18	

BIJLAGE S: ELEKTRISCH SCHEMA



WIND & PV HYBRID CONTROLLER USER'S MANUAL

SECURITY WARNING: THE BATTERIES MUST BE CONNECTED TO THE CONTROLLER BEFORE OPERATING, OTHERWISE THE GENERATOR AND THE CONTROLLER MAY BE DAMAGED!

CONTENTS

1.0 GENERAL

2.0 TECHNICAL SPECIFICATIONS

3.0 INSTALLING STEP

4.0 NOTE

5.0 SERVICES

1.0 General

1.1 The controller user's manual is suitable for 0.1kW-3.0kW grid and off-grid wind turbine generator and PV hybrid system. The following specification is for 1KW 24V system as an example.

1.2 Features

1.2.1 Automatically trace the set power of the wind turbine. For example, the controller can keep the turbine charging the battery under 1KW if the controller is set to 1KW.

1.2.2 Automatically unload while the wind turbine generator is overloaded.

1.2.3 Batteries overcharge protection.

1.2.4 Protect batteries from charging solar panel at night.

1.2.5 Electric shock protection.

1.2.6 The controller is independent from the dump loader.

2.0 TECHNICAL SPECIFICATIONS

Rated power: from 100W-3000W, can be set.

Rated DC voltage: DC 12V/24V/48V, can be customized.

Solar power: 12/24V/48V-10-1000W, can be customized.

Rated current of DC output: 10A(20A Max), can be customized.

Recover time of auto braking: 30min

Batteries overcharge protection: 14.4/28.8V/57.6V

Batteries overcharge recovering: 13/26V/52V

Protection(IP): IP20/IP54

Allowable ambient temperature(0C): -10-40

Dimension: 28cm×21cm×16cm

Net weight: 4.4kg

3.0 Installing steps

3.1 Panels:

3.2 Installing steps

3.2.1 Based on its protection grade, the controller should be installed in dry and cool indoor or outdoor places. The controller may not be around by the inflammable and explosive materials.

3.2.2 The controller should be mounted vertically and securely.

3.2.3 It's hot so don't touch it when it's operating.

3.2.4 Remember to put the wind turbine brake switch manually to the "on" position before wiring to prevent electric shock accidents caused by running generators.

3.2.5 Connect the cable correctly in accordance with the label on the controller. The table below is a reference (just to name a few) for you to choose the right cable.

W1, W2, W3: Input terminals of wind turbine generator (Regardless of sequence and electrode);

S+: Solar panel +

S-: Solar panel -

B+: Batteries +

B-: Batteries -

BR1: connect the main unload resistor (1-2KW/1-3 Ω) to pin 1.

BR2: connect the main unload resistor to pin 2.

BR3: connect the secondary unload resistor (1-2KW/1-3 Ω) to pin 1.

BR4: connect the secondary unload resistor to pin 2.

Notes: choose the power of the resistor according to the power of your turbine.

Cable selection table

Model	Wind turbine generator	PV Module	Battery
300W, 12V	12AWG (4 mm ² x3)	14AWG (2.5 mm ² x2)	12AWG (4mm ² x2)
300W, 24V	14AWG (2.5 mm ² x3)	14AWG (2.5 mm ² x2)	14AWG (2.5mm ² x2)

400W, 12V	12AWG (4mm ² x3)	14AWG (2.5 mm ² x2)	12AWG (4mm ² x2)
400W, 24V	14AWG (2.5mm ² x3)	14AWG (2.5 mm ² x2)	12AWG (4mm ² x2)
600W, 24V	12AWG (4mm ² x3)	14AWG (2.5 mm ² x2)	10AWG (6mm ² x2)
600W, 48V	14AWG (2.5mm ² x3)	14AWG (2.5 mm ² x2)	10AWG (6mm ² x2)

SECURITY WARNING: THE BATTERIES MUST BE CONNECTED TO THE CONTROLLER BEFORE OPERATING, OTHERWISE THE GENERATOR AND THE CONTROLLER MAY BE DAMAGED!

ATTENTION: THE CONTROLLER STOPS SUPPLYING TO THE STREET LAMP WHEN THE BATTERY IS ALMOST EXHAUSTED AND WON'T BEGIN TO SUPPLY AGAIN UNTIL THE NEXT EVENING.

3.2.6 Check and make sure the wiring is correct, put the wind turbine brake switch manually to the "off" position, and then the equipment goes into operation.

3.3 Running state and function setting indicator

3.3.1 Running indicators

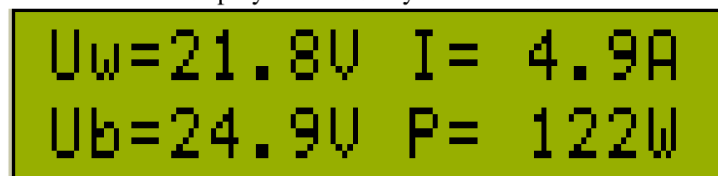
The indicators will show the different status while the controller is in operating, detailed in the table below.

LED DESCRIPTIONS

Indicators	Status	Explanation
L1 (Green) (Left)	Lights	Full battery capacity
L1 (Green) (Left)	Blinks	Low battery capacity
L2 (Green) (2nd)	Lights	PV is charging the battery
L2 (Green) (2nd)	Dark	PV is not charging the battery
L3 (Red) (3rd)	Lights	Battery overcharge
L4 (Green) (4th)	Lights	Wind turbine is charging the battery
L4 (Green) (4th)	Dark	Wind turbine is not charging the battery

LCD SCREEN:

The normal display when battery connected:



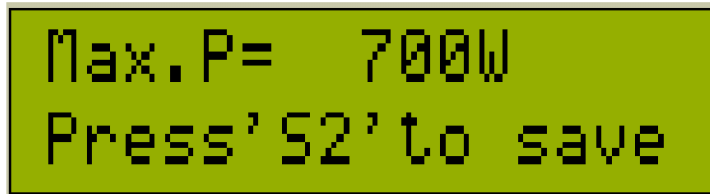
Uw: Wind turbine voltage

I: Wind turbine charging current

Ub: Battery voltage

P: The charging power of the wind turbine

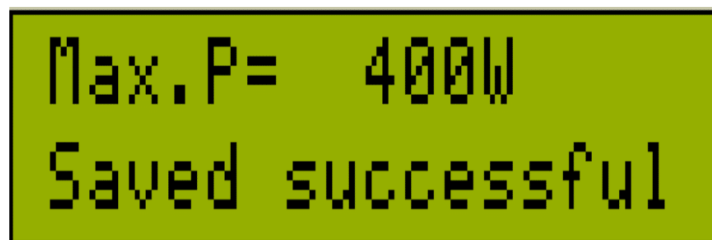
MTTP Set:



Max.P= 700W
Press 'S2' to save

Max.P: The max charging power of the wind turbine
Press S1 to get the above display. The Max.P will decrease if press another time. Set the power from 3000W to 100W by keeping pressing it.

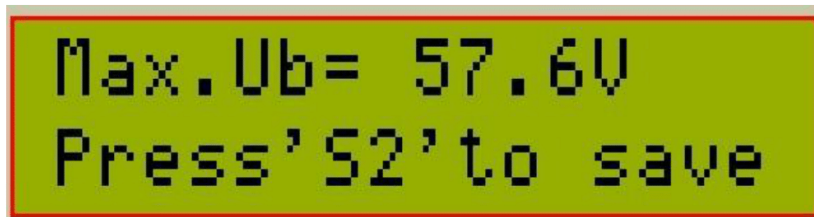
Press S2 to save.



Max.P= 400W
Saved successful

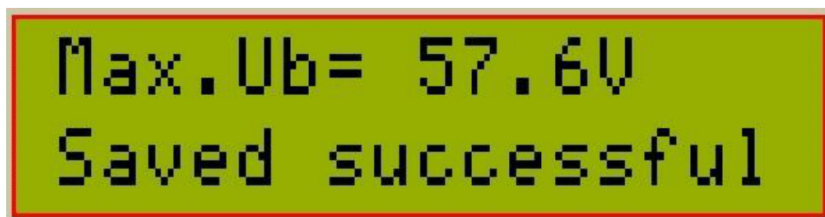
Wait 5-10S to recover to normal display after saved successfully.

Overcharge protection voltage set:



Max.Ub= 57.6V
Press 'S2' to save

Max.Ub: The max overcharge protection voltage
Press S1 and hold to get the above display. The Max.Ub will increase if press another time. Press S1 once to increase 0.1V, and hold for 3 seconds to increase 1V.
Press S2 to save.



Max.Ub= 57.6V
Saved successful

Wait 5-10S to recover to normal display after saved successfully.

4.0 Notes

4.1 Ordering Information

4.1.1 The controllers can be customized. Order should be detailed description of equipment configuration requirements, such as: generator sets parameters, technical

parameters of solar cell components, protective grading, as well as overload protection.
4.1.2 Use under special conditions can be customized in accordance with the usage conditions of users.

4.2 Installation Notes

4.2.1 Before accessing controller, please confirm the system equipment, such as, wind turbine, solar components, batteries, lightning protection devices and cable selection configuration is correct.

4.2.2 Check and make sure the ground insulation resistance of equipment should be in line with the technical requirements of the wind / light generating system.

4.2.3 Before installation, disassembly, repairing equipment, please make sure to manually switch the brake to the "on" position.

5.0 After-sales service

5.1 Customers in the procurement, use, or for advice on the quality of this product can contact the designated distributors or with the company.

5.2 We are very sorry that we never send a notice in case the specification changes.

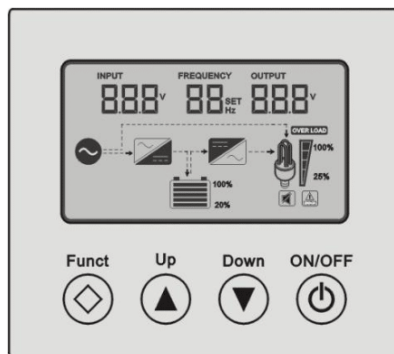
Manufacture: WINDPMG

Website: www.windpmg.com

8. Operating instructions

(1) Panel LCD display graphical representation instruction

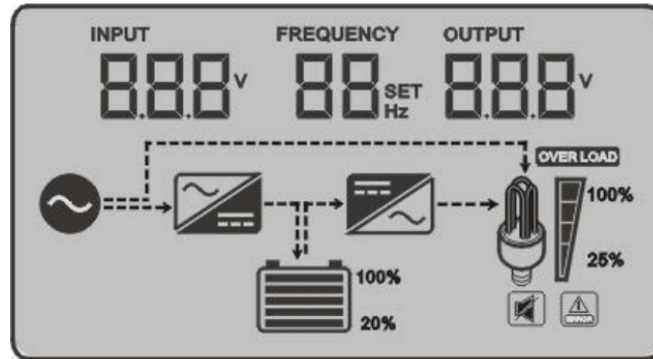
1.1 LCD display and function keys interface can display the equipment working status, such as: input/output voltage, frequency, grid mode, inverter mode, battery capacity, load capacity, alarm warning etc.



1.2 Instruction of keys

Function keys		Instruction
	Mute/ function key	Sound attenuation with short press; enter into equipment working mode with long press
	Function key/ multiply key	Enter into charge current setting with long press; increment with short press
	Function key / Reducing key	Enter into battery mode setting with long press; decrement with short press
	ON/OFF	Single bond ON/OFF control

1.3 LCD display instruction



Equipment parameter instruction			
LCD display	Function instruction		
INPUT 888 _V	AC input voltage parameter		
FREQUENCY 88 _{Hz}	AC output frequency parameter		
OUTPUT 888 _V	AC output voltage parameter		
88 _{SET}	Equipment working mode selection		
	Grid priority mode	Energy-saving mode	Battery priority mode
	01 _{SET}	02 _{SET}	03 _{SET}

(4) Audible alarm reminder instruction




Equipment running normal	Buzzing prohibit	Buzzer is no tweet under default state
	Buzzer starts	Buzzer tweet 4 times every 15s, indicate the equipment operated under battery inverter state
Battery high voltage alarm	Buzzer tweets 4 times per second, alarms high voltage	
Battery low voltage alarm	Buzzer tweets 2 times per second, alarms low voltage	
Overtemperature alarm	Buzzer alarm 2 seconds pause 1 second	






(5) Electric generator connection announcements:







If connect electric generator, it needs operating as below:






- 1, Start up electric generator and after it running stable, make electric generator output power supply be connected into the equipment input terminal, then make sure the equipment output is no-load, then start up the equipment.
- 2, After the equipment starting, then connect load one by one
- 3, We suggest electric generator capacity should be 2~3 times of this equipment

(3) Working mode instruction





Icon	Working mode	Running state
	The grid priority mode	Mains priority mode, after the device starts and the grid input under normal operation, the equipment through the grid bypass regulator to supply power to the load, at the same time power battery; When the grid is having too high/low/serious distortion or other abnormal, equipment will make battery energy through internal module transfer into high quality electricity and supply power to load.
	Energy-saving mode	Under energy-saving mode, after the device starts, it will automatically detect load, when the load is greater than 5% rated power, the equipment starts AC output and power to the load; When detects no load, the device will automatically back to the search pattern, drop the battery energy consumption to lowest; This mode, equipment detects load every 10s, so as to achieve the purpose of energy saving.
	Battery priority mode	Battery priority mode, the device started for the first time and the mains input under normal, equipment operation for mains priority mode, but no battery be powered. When the battery in the external charging device (such as solar charging system) after adequate power charged, equipment will automatically convert to battery energy through internal module into high quality electricity for load; When the battery power drops to the low voltage threshold, the device automatically stabilizes the voltage through the mains bypass to provide power to the load, but does not charge the battery.

Battery icon instruction		
LCD display	Status	Battery voltage values/12V; *A (pcs)
	Twinkle	<10.5V; *A
	Lighten	10.5~11.2V; *A
	Lighten	11.2~11.6V; *A
	Lighten	11.6~12.1V; *A
	Lighten	12.1~12.5V; *A
	Lighten	>12.5V; *A

Load icon instruction				
LCD display	Function instruction			
	Output overload reminder			
	0%~25%	25%~50%	50%~75%	75%~100%
				

Working mode icon instruction		
LCD display	Function instruction	
	Grid input icon	
	AC-DC icon	
	DC-AC icon	
Buzzing icon instruction		
	Lighten	Prohibit buzzer tweet
	dark	Start buzzer tweet
Fault/abnormal icon instruction		
	Fault/Abnormal reminder	

(2) Panel key/LCD setting instruction

Function key		Operating instructions		
	Mute key	Long press for 1 second, buzzing 1 time, start mute state; Long press for 1 second again, buzzing 2 times, close mute stage;		
	Function key	Long press for 5s, 01,02,03 mode can be recurrent selection, it will take effect after restarting;		
		Grid priority mode	Energy-saving mode	Battery priority mode
				

▲	Function key	Long press for 5s, LCD panel 88^{SET} will display relative charge current regulation C+, press ▲ increase charge current, press ▼ decrease charge current						
		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
		0A	5A	10A	15A	20A	25A	30A
▼	Function key	Long press for 5s, LCD panel 88^{SET} will display relative charge voltage regulation U+, press ▲ increase charge voltage, press ▼ decrease charge voltage;						
		U0	Gel U.S.A				13.7V	
		U1	A.G.M.1				13.4V	
		U2	A.G.M.2				13.7V	
		U3	Sealed lead Acid				13.6V	
		U4	Gel European				13.8V	
		U5	Open lead acid				13.8V	
		U6	Calcium(open)				13.6V	
		U7	De sulphation cycle 15.5 for 4 hrs					
⏻	ON/OFF key	Starting up	Long press for 2s, buzzing 1 time, equipment start output					
		Power off	Long press for 2s, Long press for 2, after internal relay energized, the equipment power off output					

Product Parameters

Rate power		1000W	1500W	2000W	3000W
Battery	Rate voltage	12VDC/24VDC/48VDC			24VDC/48VDC
	Charge current	30A(default)-C0-C6can be set			
	Battery type	U0-U7 can be set			
Input	Voltage range	85-138VAC/170-275VAC			
	Frequency	45-65Hz			
Output	Voltage range	110VAC/220VAC;±5%(Inverter mode)			
	Frequency	50/60Hz±1%(Inverter mode)			
	Output wave	Pure sine wave			
	Switching time	<10ms(traditional load)			
	Efficiency	>85%(80% Resistance load)			
	Overload	110-120%/30S;>160%/300ms			
Protection		Battery overvoltage/lowvoltage, overload, short circuit protection, oevertemperature protection, etc.			
Operating ambient temperature		0-40°C			
Storage ambient temperature		-15 - +50°C			
Operating/Storage ambient		0-90%No condensation			
Machine Size: L*W*H (mm)		453*220*180			
Package size: L*W*H (mm)		580*290*220			

BIJLAGE V: OPBRENGST WINDMOLEN

TABEL 24: DE VERMOGENDATASETS UIT QBLADE, DE GEcombineERDE DATASET, DE DISCRETE WAARDEN VAN DE WEIBULL-VERDELING EN HET GEMIDDELD OPGEWEKTE VERMOGEN PER WINDSNELHEID

	50 RPM	100 RPM	150 RPM	200 RPM				
V [m/s]	P [W]	P [W]	P [W]	P [W]		P(W)	f(v)	P(W)*f(v)
0,01	-4,84	-38,77	-130,69	-310,28		0	1,71E-05	0
0,27	-4,9	-38,59	-131,53	-310,99		0	0,004793	0
0,52	-5,02	-39,18	-131,21	-306,11		0	0,013228	0
0,78	-2,41	-40,36	-132,19	-312,3		0	0,022431	0
1,04	2,24	-40,57	-134,88	-313,3		2,24	0,031053	0,069558
1,3	9,28	-33,95	-137,28	-317,65		9,28	0,038434	0,356726
1,55	19,96	-19,94	-135,78	-322,44		19,96	0,044304	0,884476
1,81	33,22	-3,21	-124,99	-327,86		33,22	0,048618	1,61514
2,07	46,81	16,95	-101,64	-324,4		46,81	0,051461	2,409118
2,33	54,58	41,7	-68,01	-309,29		48,14	0,052987	2,550837
2,58	64,67	72,91	-30,45	-273,1		72,91	0,053382	3,892001
2,84	69,52	110,95	9,45	-223,59		110,95	0,052839	5,862203
3,1	74,37	158,27	56,24	-161,99		158,27	0,051544	8,157659
3,36	75,78	208,81	109,49	-96,76		208,81	0,049669	10,37133
3,61	75,04	263,53	172,17	-28,5		263,53	0,047364	12,48199
3,87	70,32	322,06	244,58	47,71		322,06	0,044762	14,41601
4,13	68,09	372,86	328,23	132,15		350,54	0,041972	14,71295
4,39	67,12	411,33	423,13	224,84		417,23	0,039086	16,30775
4,64	67,74	435,77	531,99	329,61		483,88	0,036176	17,50471
4,9	70,2	487,27	650,96	449,09		569,11	0,033301	18,95218
5,16	74,22	516,75	763,49	577,96		763,49	0,030505	23,29053
5,42	77,84	537,1	886,94	723,95		886,94	0,027821	24,67566
5,67	77,4	555,82	1018,37	881,2		1018,37	0,025272	25,73601
5,93	75,94	582,51	1149,14	1066,77		1149,14	0,022872	26,28352
6,19	74,55	594,12	1256,54	1256,04		1256,29	0,020632	25,91957
6,45	73,37	599,13	1348,5	1454,11		1401,31	0,018554	25,99948
6,7	72,31	607,06	1416,55	1659,78		1659,78	0,016638	27,61539
6,96	71,43	602,75	1469,67	1886,22		1886,22	0,014881	28,0689
7,22	70,7	599,61	1615,86	2096,29		2096,29	0,013277	27,83341
7,48	70,12	595,24	1668,55	2331,4		2331,4	0,01182	27,55711
7,73	69,68	563,47	1743,25	2567,44		2567,44	0,0105	26,95931
7,99	69,35	556,93	1808,55	2790,5		2790,5	0,00931	25,97931
8,25	69,17	545,25	1830,03	2976,01		2976,01	0,008239	24,52003
8,51	69,08	536,21	1875,63	3142,72		3000	0,007279	21,83722
8,76	69,15	537,02	1928,29	3286,32		3000	0,00642	19,26126
9,02	69,31	539,16	1974,91	3386,96		3000	0,005654	16,96313
9,28	69,58	541,09	2004,19	3482,44		3000	0,004973	14,91774
9,54	69,93	547,99	2020,21	3792,76		3000	0,004367	13,10104
9,79	70,37	560,7	2041,05	3894,36		3000	0,00383	11,4908

10,05	70,92	576,23	2049,38	4059,34		3000	0,003355	10,0662
10,31	71,54	593,02	2020,68	4131,26		3000	0,002936	8,807799
10,57	72,25	609,36	2018,82	4268,43		3000	0,002566	7,698204
10,82	73,03	622,51	2023,45	4294,76		3000	0,002241	6,721679
11,08	73,89	625,86	2012,27	4394,6		3000	0,001954	5,862842
11,34	74,81	619,49	2010,09	4445,65		3000	0,001703	5,108852
11,6	75,8	613,48	1902,95	4518,97		3000	0,001483	4,447767
11,85	76,86	607,77	1889,69	4657,91		3000	0,00129	3,869057
12,11	77,97	602,12	1859,43	4684,92		3000	0,001121	3,362653
12,37	79,15	596,59	1840,65	4749,66		3000	0,000973	2,920191
12,63	80,38	591,64	1811,77	4794		3000	0,000845	2,534004
12,88	81,66	587,17	1810,28	4789,96		3000	0,000732	2,197393
13,14	83	582,75	1812,52	4859,23		3000	0,000635	1,904044
13,4	84,39	578,62	1811,34	4858,19		3000	0,00055	1,648736
13,66	85,82	574,79	1820,96	4773,5		3000	0,000476	1,426728
13,91	87,29	571,54	1825,24	4821,85		3000	0,000411	1,233907
14,17	88,8	568,49	1843,67	4764,93		3000	0,000355	1,066439
14,43	90,36	565,7	1876,04	4796,05		3000	0,000307	0,921161
14,69	91,95	563,11	1891,33	4798,74		3000	0,000265	0,795226
14,94	93,58	561,07	1930,3	4761,2		3000	0,000229	0,686173
15,2	95,24	559,12	1972,02	4568,17		3000	0,000197	0,591731
15,46	96,94	557,46	2000,63	4512,29		3000	0,00017	0,510028
15,72	98,68	555,94	2037,31	4487,32		3000	0,000146	0,43939
15,97	100,45	554,83	2073,63	4457,13		3000	0,000126	0,378377
16,23	102,25	554,03	2100,68	4398,9		3000	0,000109	0,325668
16,49	104,09	553,38	2113,18	4363,57		3000	9,34E-05	0,280177
16,75	105,95	552,97	2107,1	4317,99		3000	8,03E-05	0,240936
17	107,85	552,64	2091,08	4289,88		3000	6,90E-05	0,207116
17,26	109,78	552,87	2077,48	4289,05		3000	5,93E-05	0,177961
17,52	111,75	553,21	2064,37	4296,41		3000	5,10E-05	0,15285
17,78	113,74	553,74	2051,47	4295,72		3000	4,37E-05	0,131232
18,03	115,76	554,47	2038,84	4313,54		3000	3,75E-05	0,112636
18,29	117,81	555,32	2025,94	4315,52		3000	3,22E-05	0,096635
18,55	119,89	556,56	2013,72	4325,41		3000	2,76E-05	0,082878
18,81	121,99	557,9	2002,41	4366,77		3000	2,37E-05	0,071055
19,06	124,13	559,39	1991,91	4380,15		3000	2,03E-05	0,060902
19,32	126,29	561,05	1981,9	4452,49		3000	1,74E-05	0,05218
19,58	128,48	562,92	1971,92	4481,92		3000	1,49E-05	0,044693
19,84	130,7	565,05	1962,25	4566,61		3000	1,28E-05	0,038268

20,09	132,94	567,28	1953,03	4606,46		3000	1,09E-05	0,032759
20,35	135,21	569,62	1943,9	4689,98		3000	9,34E-06	0,028034
20,61	137,51	572,18	1936,22	4741,28		3000	7,99E-06	0,023983
20,87	139,84	574,97	1929,07	4807,05		3000	6,84E-06	0,020512
21,12	142,19	577,86	1922,17	4872,59		3000	5,85E-06	0,01754
21,38	144,56	580,94	1915,47	4927,89		3000	5,00E-06	0,014993
21,64	146,96	584,11	1909,35	4979,04		3000	4,27E-06	0,012813
21,9	149,39	587,44	1903,42	5007,25		3000	3,65E-06	0,010947
22,15	151,84	590,98	1898,08	5007,61		3000	3,12E-06	0,009351
22,41	154,32	594,59	1893,7	4986,08		3000	2,66E-06	0,007986
22,67	156,82	598,31	1889,31	4956,98		3000	2,27E-06	0,006818
22,93	159,34	602,21	1885,14	4932,27		3000	1,94E-06	0,00582
23,18	161,89	606,26	1881,48	4908,75		3000	1,66E-06	0,004967
23,44	164,47	610,41	1878,09	4886,07		3000	1,41E-06	0,004238
23,7	167,07	614,71	1874,79	4863,04		3000	1,20E-06	0,003615
23,96	169,69	619,08	1872,59	4840,57		3000	1,03E-06	0,003083
24,21	172,34	623,59	1870,71	4817,77		3000	8,76E-07	0,002629
24,47	175,01	628,26	1869	4795,25		3000	7,47E-07	0,002241
24,73	177,71	633	1867,67	4773,53		3000	6,37E-07	0,00191
24,99	180,43	637,83	1866,76	4753		3000	5,43E-07	0,001628
							som	646,0437
							Jaarlijks	5659343