

# Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: energie

## **Masterthesis**

***Invloed van hoogspanningsinstallaties op externe elektrische installaties: analyse en remediëring***

**Stan Braeken**

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

### **PROMOTOR :**

Prof. ir. Aniceta DEXTERS

### **PROMOTOR :**

dr. ir. Johan RIMEZ

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek  
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



**2022**  
**2023**

# Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: energie

## ***Masterthesis***

***Invloed van hoogspanningsinstallaties op externe elektrische installaties: analyse en remediëring***

**Stan Braeken**

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

## **PROMOTOR :**

Prof. ir. Aniceta DEXTERS

## **PROMOTOR :**

dr. ir. Johan RIMEZ



**KU LEUVEN**



## Woord vooraf

Met genoegen presenteer ik hier mijn thesis, het resultaat van mijn inzet en toewijding gedurende mijn studie. Deze thesis is het sluitstuk in mijn academische opleiding.

Ik wil graag mijn dank uitspreken aan mijn promotoren dr. ir. Johan Rimez en Prof. ir. Annick Dexters voor hun begeleiding en waardevolle inzichten. Hun expertise en ondersteuning hebben een cruciale rol gespeeld bij het tot stand brengen van dit werk. Ik wil ook mijn andere professoren, docenten en medewerkers bedanken. Hun kennis, passie en toewijding hebben een cruciale rol gespeeld in mijn academische ontwikkeling en hebben me geholpen om mijn vaardigheden en competenties te vergroten.

Daarnaast ook woorden van dank voor mijn medestudenten en vrienden die me tijdens dit traject hebben gesteund. Jullie aanmoediging, begrip en aanwezigheid hebben me geholpen om gemotiveerd te blijven en obstakels te overwinnen.

Tot slot wil ik mijn diepe waardering uiten voor mijn ouders en familie. Jullie onvoorwaardelijke steun, en geloof in mij hebben me geïnspireerd en gesterkt om mijn ambities na te streven.

Stan Braeken



# Inhoud

Woord vooraf .....	0
Lijst van tabellen.....	4
Lijst van figuren .....	5
Verklarende woordenlijst.....	8
Abstract .....	9
Abstract in English .....	11
1. Inleiding .....	12
1.1. Situering .....	12
1.2. Probleemstelling.....	14
1.3. Doelstellingen.....	14
1.4. Materiaal & Methode.....	15
2. Literatuurstudie.....	17
2.1. Opbouw van het net.....	17
2.2. Lijnen .....	18
2.3. Overzicht beïnvloeding / koppelingswijzen.....	20
2.4. Inductieve koppeling .....	21
2.4.1. Impact magnetische velden op pijpleidingen.....	21
2.4.2. Magnetische velden rond hoogspanningslijnen.....	26
2.4.3. Conclusie inductieve koppeling.....	31
2.5. Capacitieve koppeling .....	32
2.5.1. Conclusie capacitieve koppeling.....	37
2.6. Conductieve koppeling.....	37
2.6.1. Stap- en contactspanningen.....	37
2.6.2. Invloed van netwerkincidenten op externe installaties.....	42
3. Simulaties .....	46
3.1. EM-analysetechnieken .....	46
3.2. Inductieve koppeling .....	47
3.2.1. ABCCBA faseconfiguratie.....	49
3.2.2. ABCABC faseconfiguratie.....	51
3.2.3. Invloed van fasehoek op magnetisch veld .....	54
3.2.4. Conclusie FEM inductieve koppeling.....	55
3.3. Capacitieve koppeling .....	56

3.3.1.	ABCCBA faseconfiguratie.....	57
3.3.2.	ABCABC faseconfiguratie.....	59
3.3.3.	Conclusie FEM capacitieve koppeling.....	60
3.4.	Conductieve koppeling.....	61
3.4.1.	Hekwerk rond onderstation verbonden.....	62
3.4.2.	Hekwerk rond onderstation met externe aarding .....	64
3.4.3.	Randelementenmethode (Boundary Element Method - BEM).....	65
3.4.4.	Simulaties BEM .....	68
3.4.5.	Conclusie BEM conductieve koppeling.....	75
4.	Overzichtstabel cases .....	76
4.1.	Cases.....	76
4.2.	Verklaringen .....	79
5.	Conclusie .....	80
	Referentielijst .....	82

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Inputs en outputs hulptools .....	67
Tabel 2: Rekenvoorbeeld bij een foutstroom $I_{\text{fout}}$ van 25 kA.....	73
Tabel 3: Cases deel 1 .....	76
Tabel 4: Cases deel 2 .....	77
Tabel 5: Cases deel 3 .....	78
Tabel 6: Verklaringen.....	79



## Lijst van figuren

Figuur 1: Hoogspanningsmast op privéterrein	
Figuur 2: Verschillende beïnvloedingswijzen [1] .....	12
Figuur 3: Opbouw elektriciteitsnet [2] .....	17
Figuur 4: enkel- en meervoudige geleiders [3].....	18
Figuur 5: Transmissielijnmodel [4] .....	19
Figuur 6: Bovengrondse pijpleiding onder HS-lijn [9, p. 151].....	21
Figuur 7: Pijpleiding en elektrisch circuit aardingselektrode [9, p. 152] .....	21
Figuur 8: Horizontale configuratie met waakdraden en bovengrondse pijpleiding [9, p. 153] .....	22
Figuur 9: Geïnduceerd spanningsprofiel op de pijpleiding met en zonder waakdraad voor 275 kV TL (dp=30 m, hp=1 m) [9, p. 153].....	23
Figuur 10: Relatie tussen geïnduceerde spanning en hoogte van pijpleiding boven de grond [9, p. 154] .....	23
Figuur 11: Relatie tussen de radius van de pijpleiding en de geïnduceerde spanning [9, p. 154] .....	24
Figuur 12: Relatie tussen de afstand van de geleiders en de geïnduceerde spanning [9, p. 154] .....	24
Figuur 13: Relatie tussen geïnduceerde spanning en de hoogte van de geleiders vanaf de grond [9, p. 154].....	25
Figuur 14: Variatie van geïnduceerde spanning met de lengte van het parallelisme [9, p. 155] .....	25
Figuur 15: Verschillende geometrische configuraties voor HS transmissielijnen [9, p. 153] .....	26
Figuur 16: Geïnduceerde spanning op de pijpleiding voor verschillende lijnconfiguraties [9, p. 155].	26
Figuur 17: Magnetisch veld voor verschillende lijnconfiguraties [10, p. 231] .....	27
Figuur 18: Faseverschuiving tussen 2 circuits [11, p. 4] .....	27
Figuur 19: Dwarsdoorsnede mast met fasevolgorde + ondergrondse pijpleiding [11, p. 3] .....	28
Figuur 20: Geïnduceerde spanning voor het geval 'ABCCBA' [11, p. 4] .....	29
Figuur 21: Geïnduceerde spanning voor een lage reactantiebundel 'ABCABC' [11, p. 5].....	29
Figuur 22: Variatie van de geïnduceerde AC spanning op de pijpleidingeinden bij 'ABCCBA' fasevolgorde, gerefereerd t.o.v. de gelijke belasting van 350A in beide circuits [11, p. 5] .....	30
Figuur 23: Variatie van de geïnduceerde AC spanning op de pijpleidingeinden bij 'ABCABC' fasevolgorde, gerefereerd t.o.v. de gelijke belasting van 350A in beide circuits [11, p. 6] .....	30
Figuur 24: Eenlijnsmodel voor het berekenen van $V_{o.c.}$ (open circuit spanning) en de laadstroom van een object onder een HS lijn [14, p. 769] .....	33
Figuur 25: Elektrisch veld voor verschillende lijnconfiguraties [10, p. 231].....	34
Figuur 26: Elektrisch veld op aardoppervlak van een "low reactance bundle" & "super bundle" voor een 275 kV transmissielijn line " [17, p. 2468] .....	35
Figuur 27: Elektrisch veld op het grondoppervlak voor een lage reactantie opstelling met 2 pijpleidingen (1 aan elke kant van de pyloon) [17, p. 2468] .....	35
Figuur 28: Elektrisch veld aan het grondoppervlak (lage reactantiebundel) met de afstand van een pijpleiding tot de geleiders als parameter [17, p. 2469] .....	36
Figuur 29: Variatie van het elektrisch veld aan het grondoppervlak (lage reactantiebundel) met de aanwezigheid van een pijpleiding met radius $R_p$ als parameter [17, p. 2470] .....	36
Figuur 30: Gesimplificeerd model voor de GPR rond een mast onderhevig aan een blikseminslag [20, p. 2].....	38
Figuur 31: voorbeeld aardingsnet (a) en voorbeeld spanningsplot (b) [21, p. 2] .....	39
Figuur 32: Aanraak- en stapspanningen voor een voorbeeld aardingsnet [21, p. 3] .....	40

Figuur 33: : Aanraak- en stapspanningen voor een voorbeeld aardingsnet met steile gradiënt [21, p. 3].....	41
Figuur 34: Schematisch diagram voor een aardfout nabij een onderstation [21, p. 5] .....	42
Figuur 35: aarding huis in invloedssfeer van aarding HS-mast .....	43
Figuur 36: Definitie invloedssfeer .....	44
Figuur 37: stroom en potentiaalverhoging aarding t.g.v. blikseminslag op HS-mast .....	44
Figuur 38: Foutstroom en potentiaalverhoging aarding t.g.v. één fase kortsluiting .....	45
Figuur 39: Verschillende methodes voor elektromagnetische analyses [23] .....	46
Figuur 40: 3 fasen stromen op $t=0$ .....	47
Figuur 41: definitie grond.....	48
Figuur 42: dwarsdoorsnede van HS-verbinding met 2 draadstellen ABCCBA faseconfiguratie.....	49
Figuur 43: Simulatie magnetisch veld ABCCBA faseconfiguratie .....	49
Figuur 44: dwarsdoorsnede van HS-verbinding met 2 draadstellen ABCCBA faseconfiguratie met machine .....	50
Figuur 45: Simulatie fluxdichtheid met machine midden .....	51
Figuur 46:dwarsdoorsnede geleiders ABCABC faseconfiguratie.....	52
Figuur 47: Simulatie van magnetische fluxdichtheid voor een ABCABC faseconfiguratie .....	52
Figuur 48: dwarsdoorsnede geleiders ABCABC faseconfiguratie met machine.....	53
Figuur 49: Simulatie van magnetische fluxdichtheid voor een ABCABC faseconfiguratie met machine .....	53
Figuur 50: Simulatie van magnetische fluxdichtheid en fluxlijnen voor een ABCABC faseconfiguratie met machine.....	54
Figuur 51: 3 fasen stromen op $t=1$ .....	55
Figuur 52: Simulatie van magnetisch veld bij nieuwe fasehoeken .....	55
Figuur 53: 3 fasen spanningen .....	56
Figuur 54: dwarsdoorsnede	Figuur 55: dwarsdoorsnede ABCCBA
configuratie met machine .....	57
Figuur 56: Simulatie elektrisch veld .....	58
Figuur 57: Simulatie elektrisch veld met machine .....	58
Figuur 58: Simulatie elektrisch veld ABCABC faseconfiguratie .....	59
Figuur 59: Simulatie elektrisch veld ABCABC faseconfiguratie met machine .....	59
Figuur 60: stap- en aanraakspanningen tijdens een incident op het hoogspanningsnet [25] .....	61
Figuur 61: vermaasd aardingsnet met doorverbonden aarding hekwerk .....	62
Figuur 62: Retourpad foutstroom [25] .....	63
Figuur 63: veiligheidscurve aanraakspanningen AREI deel 3 pag 18 [26] .....	63
Figuur 64: vermaasd aardingsnet onderstation met afzonderlijke aarding van hekwerk .....	64
Figuur 65: Homogeen gebied met een gesloten grens [27].....	65
Figuur 66: Constant elements met n segmenten [27] .....	66
Figuur 67: Schematische voorstelling grens BEM simulatie.....	68
Figuur 68: Schematische voorstelling nieuwe grens BEM simulatie.....	69
Figuur 69: Spanningsprofiel 5 pinelektrodes 10m diep ingedreven .....	70
Figuur 70: Spanningsprofiel 5 pinelektrodes 10m diep ingedreven zoom-out.....	70
Figuur 71: Spanningsprofiel 5 aardelektrodes 0.5m diep ingedreven .....	71
Figuur 72: Spanningsprofiel 1 aardelektrode 10m diep ingedreven.....	71
Figuur 73: Schematische voorstelling spanningen op aardingsystemen huizen en pyloon .....	72

Figuur 74: Schematische voorstelling van verschilspanning t.g.v. 2 aardreferenties ..... 74

## Verklarende woordenlijst

BEM: Boundary Element Method

FEM: Finite Element Method

HS: Hoogspanning

RMS: Root Mean Square

ROW: Right-of-way

TL: Transmission Line / transmissielijn

OHL: Overhead Line

## Abstract

Elia, de transmissienetbeheerder van België, is verantwoordelijk voor de bouw, het beheer en het onderhoud van het Belgische hoogspanningsnet. Vanwege de toenemende bebouwing in de directe omgeving van hoogspanningsinfrastructuur worden omwonenden steeds vaker geconfronteerd met elektromagnetische fenomenen, zowel tijdens normaal bedrijf als bij netwerkincidenten. Het doel van deze masterproef is om deze fenomenen te categoriseren, te verklaren en aanbevelingen te formuleren om de impact hiervan te verminderen en de veiligheid te waarborgen. Dit dient als basis om een leidraad te ontwikkelen voor techniekers om op een systematische en wetenschappelijk onderbouwde wijze zelfstandig eventuele problemen te voorkomen, te herkennen en op een te verhelpen. Voor de categorisatie werd op basis van een literatuurstudie onderscheid gemaakt tussen drie beïnvloedingswijzen: inductieve, capacitieve en conductieve beïnvloeding. De parameters die de impact van deze beïnvloedingswijzen bepalen, werden onderzocht via geschikte specifieke berekeningsmethodes. Om de elektromagnetische velden, te onderzoeken werd de Finite Element Method (FEM) gebruikt en de Boundary Element Method (BEM) werd toegepast voor de conductieve fenomenen. Op basis van de resultaten werden specifieke maatregelen onderzocht voor een aantal "use cases". Tenslotte werden oorzaken, gevolgen, wetenschappelijke verklaringen en te nemen maatregelen in een overzichtelijke tabel samengebracht. Dit kan dienen als referentiekader en geverifieerde kennis voor het ontwikkelen van een brochure die ELIA kan publiceren om techniekers te ondersteunen in hun werkzaamheden.



## Abstract in English

Elia, Belgium's transmission system operator, is responsible for the construction, operation and maintenance of the Belgian high-voltage grid. Due to increasing construction in the immediate vicinity of high-voltage infrastructure, local residents are increasingly confronted with electromagnetic phenomena, both during normal operation and during network incidents. The objective of this Master's thesis is to categorize, explain these phenomena and formulate recommendations to reduce their impact and ensure safety. This serves as the basis for developing a guide for technicians to independently prevent, recognize and remediate any problems in a systematic and scientifically based manner. For the categorization, three types of interference were distinguished based on a literature review: inductive, capacitive and conductive influence. The parameters determining the impact of these types of interference were investigated through suitable specific calculation methods. To investigate the electromagnetic fields, the Finite Element Method (FEM) was used, and the Boundary Element Method (BEM) was applied for the conductive phenomena. Based on the results, specific actions were examined for a number of use cases. Finally, causes, consequences, scientific explanations and measures to be taken were brought together in a summary table. This can serve as a frame of reference and verified knowledge for developing a brochure that ELIA can publish to support technicians in their work.

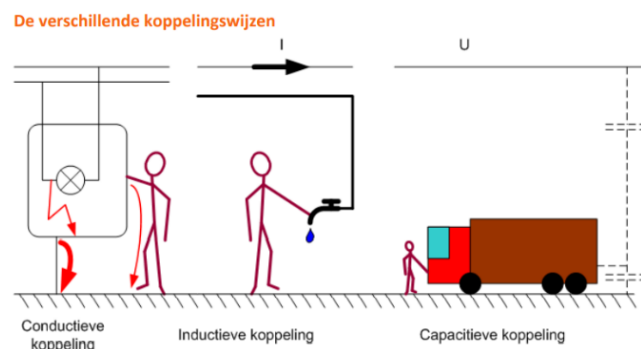
# 1. Inleiding

## 1.1. Situering

Elia is de transmissienetbeheerder van België, wat betekent dat ELIA het hoogspanningsnet bouwt, beheert en onderhoudt en dat het de balans tussen vraag en aanbod van elektrische energie waarborgt. Figuur 1 toont een hoogspanningsmast van een 380 kV verbinding op een privéterrein. Het huis en zijn elektrische installatie bevinden zich in de directe magnetische en elektrische invloedssfeer van de hoogspanningslijnen. Bij Elia komen op regelmatige basis klachten binnen van mensen die in de directe nabijheid wonen van hoogspanningslijnen of een onderstation. Die mensen ervaren vervelende effecten, zoals elektrische schokken bij aanraking van bijvoorbeeld een metalen dakraam of een metalen afrastering van hun weide. Omdat er in het verleden minder bebouwing rond hoogspanningsinfrastructuur was, werden de verschijnselen minder vaak waargenomen. Ook bij incidenten op het hoogspanningsnet, zoals een aardsluiting, ontstaan er gevaarlijke situaties door foutstromen die naar de aarde vloeien. Die foutstromen veroorzaken potentiaalverschillen die externe elektrische installaties, zoals bijvoorbeeld een huis langs de mast kunnen beïnvloeden. De besproken fenomenen kunnen we verdelen in drie groepen afhankelijk van hun oorzaken of beïnvloedingswijzen. Figuur 2 toont deze verschillende beïnvloedingswijzen.



Figuur 1: Hoogspanningsmast op privéterrein



Figuur 2: Verschillende beïnvloedingswijzen [1]



## 1.2. Probleemstelling

Door de toenemende bebouwing, in de directe omgeving van hoogspanningsinfrastructuur, worden de effecten, veroorzaakt door hoogspanning, als maar meer opgemerkt. Deze effecten zijn o.a. elektrische schokken bij het aanraken van geleidende objecten in de magnetische en elektrische invloedssfeer van de hoogspanningsinstallatie of het geproduceerde geluid door het corona-effect of deelontladingen. Deze effecten treden op in nominale bedrijf van de hoogspanningsinstallatie. Bij netwerkincidenten, zoals bijvoorbeeld een eenfasige aardsluiting, treden er nog andere fenomenen op. Op dat ogenblik wordt er een grote foutstroom via het aardingsstelsel van Elia naar de aarde geleid. De lokale aarde staat hierdoor op een verhoogde potentiaal. Dit zorgt ervoor dat alle aardingsinstallaties die datzelfde aardpotentiaal ervaren, bv. het huis langs de HS-mast, met een gevaarlijke situatie geconfronteerd worden.

De toenemende elektrificatie van bv. (huis)installaties zorgt voor meer (gevoelige) meetapparatuur op de daken. De elektromagnetische velden van de hoogspanningslijnen beïnvloeden deze meetapparatuur wanneer die niet is afgeschermd. Dit kan leiden tot verkeerde meetgegevens, communicatiefouten of zelfs defecten aan de elektronica.

De fenomenen van EM-velden stellen zich overal. Ook wanneer er werken worden uitgevoerd aan hoogspanningsinfrastructuur, wat vaak gebeurt terwijl één draadstel nog steeds onder spanning staat. Dit kan gevaarlijke situaties creëren voor techniekers wanneer (werk)materiaal of lijnen ongewild onder spanning komen te staan.

Tot op vandaag is er geen duidelijkheid in het AREI (Algemeen Reglement voor Elektrische Installaties) over bescherming van externe installaties tegen EM-velden, afkomstig van hoogspanningsinstallaties. Personen die problemen ervaren, hebben dus geen duidelijke richtlijnen om deze te voorkomen of te verhelpen.

## 1.3. Doelstellingen

De doelstelling van deze masterproef bestaat erin om de verschijnselen die mensen en installaties in de nabijheid van hoogspanning (HS) ervaren te categoriseren en op basis van enkele parameters globale aanbevelingen te doen om de effecten van deze verschijnselen te reduceren en de veiligheid te garanderen. We onderzoeken die verschijnselen in nominaal bedrijf van de hoogspanningslijnen, maar ook wanneer er zich een incident voordoet zoals bv. een blikseminslag of een aardsluiting op een HS-lijn / mast.

Elia wilt graag een leidraad voor techniekers ontwikkelen om zelfstandig eventuele problemen te voorkomen, te herkennen en op een systematische en wetenschappelijk onderbouwde wijze te verhelpen.

## 1.4. Materiaal & Methode

Er worden geen specifieke materialen gebruikt in dit onderzoek. Simulaties m.b.v. softwarepakketten zijn wel van toepassing. Het plan van aanpak bevat volgende stappen:

### ***Literatuurstudie***

Allereerst starten we met een literatuurstudie om de nodige achtergrondkennis (aarding van HS-installaties, contactspanningen, elektromagnetische velden,...) te vergaren. Een belangrijk document i.v.m. elektrische installaties is het AREI. Dit moet eerst grondig doorgenomen worden om de wetgeving te bestuderen. Verder moeten ook de verschillende beïnvloedingswijzen nl. conductieve, capacatieve en inductieve koppelingen, van elektromagnetische velden, bestudeerd worden.

### ***Onderzoeken en categoriseren van klachten.***

Na de literatuurstudie moet er onderzocht worden welke informatie hiervan verspreid wordt naar de mogelijke geïmpacteerden. Hierna worden bekende klachten in detail onderzocht en worden deze gecategoriseerd volgens de beïnvloedingswijze of combinatie van beïnvloedingswijzen die de oorzaak vormen.

### ***Welke fenomenen doen er zich voor bij bepaalde incidenten (blikseminslag, overslag, ...), bestuderen van concrete situaties? Opstellen en valideren van modellen met FEM en BEM.***

Vervolgens moet er onderzocht worden welke fenomenen zich voordoen in normaal bedrijf en bij een bepaald incident (blikseminslag, overslag, ...) en moeten deze gekwantificeerd worden. We bestuderen deze verschijnselen a.d.h.v. specifiek geschikte berekeningsmethoden. Eerst zal een model opgemaakt en vervolgens gevalideerd moeten worden. inductieve en capacatieve koppeling gebruiken we FEM en voor conductieve koppeling BEM.

### ***Oplossingen***

Na de simulaties worden theoretisch onderbouwde oplossingen geformuleerd die we kunnen aanreiken om gevaarlijke situaties te voorkomen. De concrete oplossingen kunnen we ook verifiëren met FEM en BEM. Een belangrijk punt voor een betrouwbaar model op te stellen, is de identificatie van de relevante parameters.

### ***Leidraad voor techniekers***

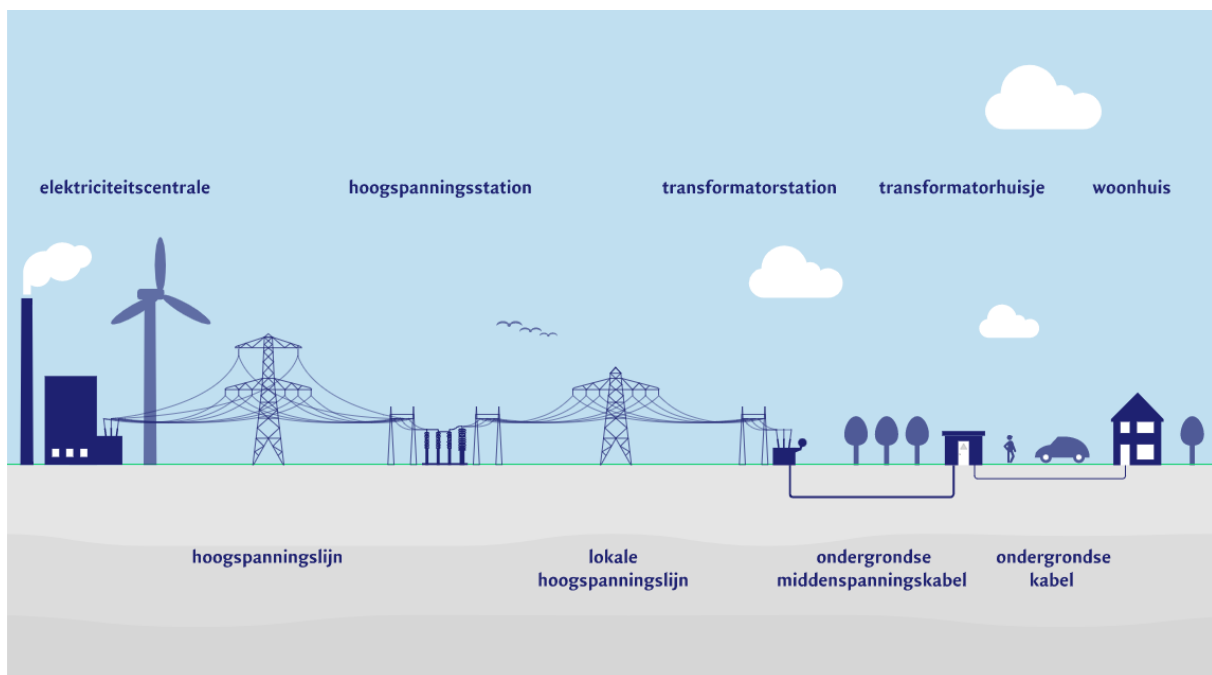
Als laatste stap willen we de basis leggen voor een leidraad waarin duidelijk en eenvoudig het probleem wordt toegelicht, de oorzaken worden aangehaald en oplossingen worden voorgesteld. Dit document zou gebruikt kunnen worden door techniekers die een installatie (particulier/ KMO) plaatsen in de nabijheid van HS.



## 2. Literatuurstudie

### 2.1. Opbouw van het net

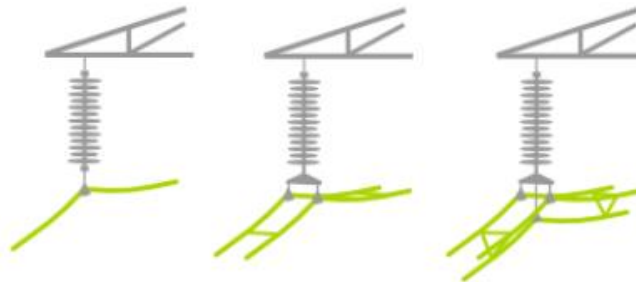
Een hoogspanningsnet is een netwerk van elektrische geleiders onder hoge spanning, waarmee elektrische energie wordt getransporteerd vanaf de producenten naar de distributienetwerken. Bij de koppeling van netwerken bevinden zich onderstations, waar de spanning wordt getransformeerd naar een lagere waarde. Elia beheert het hoogspanningsnet in verschillende niveaus namelijk: 380/220/150/110/70/36-30 kV. Het 380 kV netwerk vormt de ruggengraat van het elektriciteitstransport. Het zijn als het ware de snelwegen van de elektriciteitstransmissie. Doordat met dit net de connecties met de buurlanden maakt, wordt het ook het koppelnet genoemd. De netten van 150 kV en lager transporteren energie van en naar de belangrijke verbruikscentra en producenten. De distributienetbeheerders verdelen de energie op lagere spanningen (< 30 kV) tot bij de KMO's en de gezinnen. Figuur 3 toont de netstructuur met de energiestroom van producent tot consument.



Figuur 3: Opbouw elektriciteitsnet [2]

## 2.2. Lijnen

Een hoogspanningslijn bestaat uit geleiders die aan masten opgehangen zijn. De geleiders transporteren de energie en moeten dus geïsoleerd opgehangen worden aan de mast. Elk elektrisch circuit (van telkens drie fasen) noemt men draadstel. Het hoogspanningsnet is driefasig, waardoor er per draadstel 3 fasen aanwezig zijn. Lijnen kunnen als fasegeleider worden toegepast in 'single' of 'solo' of met meerdere tegelijk ('bundel'). Enkelvoudige draden zijn gebruikelijk voor lagere spanningen (30kV, 70kV) en hebben een lagere transportcapaciteit. De standaardpraktijk van Elia is dat men het liefst overal enkele geleiders gebruikt. Enkel bij hogere spanningsniveaus (400 kV) kan men in België systematisch dubbele tot quartet verbindingen tegenkomen. In het buitenland treffen we soms zelfs zesbundels ('sixtets') aan [3]. Figuur 4 toont het verschil tussen enkel- en meervoudige geleiders.



*Figuur 4: enkel- en meervoudige geleiders [3]*

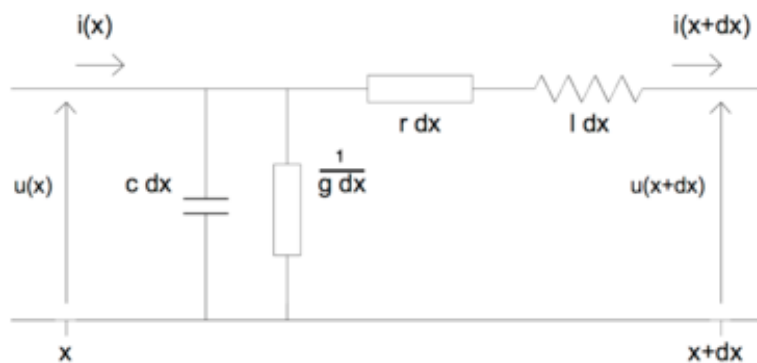
Het voordeel van meerdere dunne draden ten opzichte van één dikke is een betere koeling, maar vooral een groter buitenoppervlak [3]. Wisselstroom heeft de neiging om aan de buitenzijde van de lijn te vloeien (skin-effect). Bij bundelgeleiders wordt de totale stroom verdeeld over de individuele geleiders, wat resulteert in een grotere effectief gebruikt oppervlakte voor stroom. Dit betekent dat de individuele geleiders in de bundel minder last hebben van stroomverdringing en in diameter kunnen verkleinen. Het vergroten van het totale buitenoppervlak is tegelijk ook een manier om het corona-effect te verminderen.

De afstand tussen de lijnen en de lengte van de isolatoren wordt bepaald door het spanningsniveau van de lijn. Hoe hoger het spanningsniveau, hoe groter de afstanden moeten zijn doorslag te vermijden. De lucht tussen de fasen is het isolatiemedium. Figuur 5 toont het transmissielijnmodel. Dit model omvat zowel een inductieve ( $L dx$ ) als een capacitieve component ( $C dx$ ) om het gedrag van elektrische en magnetische velden in hoogspanningslijnen te beschrijven. De inductieve component van het transmissielijnmodel houdt rekening met het inductieve gedrag van de geleiders. Wanneer er een stroom door de geleiders van de transmissielijn stroomt, wordt er een magnetisch veld gegenereerd volgens de wet van Ampère en de wet van Biot-Savart. Dit magnetische veld wordt op zijn beurt gekoppeld aan de inductantie van de geleiders, die weerstand biedt tegen veranderingen in de stroom. De capacitieve component van het transmissielijnmodel houdt rekening met het capacitieve gedrag tussen de geleiders. Doordat de geleiders fysiek dicht bij elkaar liggen, ontstaat er een capacitieve koppeling tussen de geleiders. Dit betekent dat er een elektrisch veld wordt gecreëerd tussen de geleiders als gevolg van de aanwezige spanning. Dit wordt beschreven door de wet van Coulomb en de relatie tussen de elektrische veldsterkte en de spanning. De inductieve component ( $L dx$ ) is gerelateerd aan het magnetisch veld en de capacitieve component aan het elektrisch veld geproduceerd door een hoogspanningslijn.

De formule van de vlakke condensator toont aan dat als de afstand, tussen de 2 geleidende delen (lijn-grond of lijn-lijn), verkleint de capaciteit verhoogt.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \text{ (farad)}$$

- C : capaciteit van de vlakke condensator in Farad
- A: de oppervlakte van de geleidende platen in m<sup>2</sup>
- D: de afstand tussen de 2 geleidende platen in m
- $\epsilon_0$ : de elektrische veldconstante (8,85419 x 10<sup>-12</sup> F/m)



Figuur 5: Transmissielijnmodel [4]

Het transmissielijnmodel is een belangrijk hulpmiddel om het gedrag van elektrische en magnetische velden in hoogspanningslijnen te begrijpen en te beschrijven. Het model omvat zowel de inductieve als de capacitieve componenten om de interactie tussen elektrische stromen en velden in de lijn te modelleren. Als het spanningsniveau stijgt, moet onderlinge afstand tussen de faselijnen van een draadstel mee stijgen. Bij een te kleine afstand tussen de faselijnen (d) zal er een te grote capaciteit ontstaan (c dx) tussen de fasen onderling of tussen fase en grond. Dit zal ervoor zorgen dat het elektrisch veld onder en naast de lijnen zal verhogen.

Bovengrondse transmissielijnen zijn bronnen van sterke elektrische en magnetische velden (elektromagnetische velden). Slechts een klein aantal mensen wordt aan deze velden blootgesteld wegens professionele verplichtingen. Anderzijds wordt bijna de gehele bevolking blootgesteld aan lage niveaus van elektromagnetische straling thuis en op het werk. Toenemende publieke bezorgdheid over het effect van elektrische en magnetische velden heeft geleid tot de ontwikkeling van Europese richtlijnen [5] en zeer strenge normen in bepaalde landen. Daarom wordt het belangrijk om metingen van elektromagnetische velden te verrichten en deze te vergelijken met de kritische waarden die in de normen en voorschriften zijn vastgelegd [6]. Met de toepassing van moderne meetapparatuur en berekeningstechnieken is het mogelijk de waarden van de elektrische en magnetische velden onder en langs de lijnen te bepalen, alsook de manieren om ze te verminderen, waaronder structurele ingrepen aan bovengrondse transmissielijnen en hoogspanningsstations [7].

### 2.3. Overzicht beïnvloeding / koppelingswijzen

Koppelingseffecten van elektrische en magnetische velden ontstaan in het algemeen door een overdracht van energie van een onder spanning staande transmissielijn naar een ander gedeeltelijk of volledig geleidend object, dier of systeem, zoals bv. een omheining, pijpleiding, auto of aangrenzende parallelle laagspanningstransmissielijn. In de meeste gevallen is deze energieoverdracht van weinig belang, omdat transmissielijnen vaak weides of open vlaktes overspannen, maar door de toenemende bebouwing in Belgische steden en gemeenten komen de hoogspanningspylonen en lijnen meer en meer in het vizier. Wanneer een persoon deze fenomenen, zoals fysische schokken, ondervindt of wanneer externe elektrische installaties problemen ondervinden door de aanwezigheid van de elektromagnetische velden, wordt er meer aandacht aan besteed [8].

De effecten van elektromagnetische velden kan men indelen in twee grote groepen:

- Directe effecten op mensen, dieren en planten
- Indirecte effecten van de velden op stromen en spanningen van geleidende voorwerpen.

De directe effecten van elektromagnetische velden worden niet verder besproken. In deze studie zijn de indirecte effecten van deze velden, uitgedrukt in spanningen en stromen, van primair belang en deze zullen besproken worden.

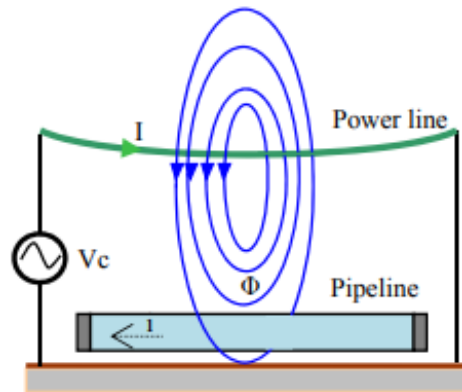
Deze indirecte effecten kunnen worden ingedeeld in drie grote categorieën:

- Inductieve koppeling via de magnetische wisselvelden
- Capacitieve koppeling via elektrische wisselvelden
- Geleidende (conductieve) koppeling via AC- of DC-aardstromen

In veel gevallen treden deze koppelingen tegelijkertijd op, vooral bij uitgestrekte geleidende installaties, zoals omheiningen of pijpleidingen, die met een onder spanning staande hoogspanningslijn parallel lopen. Er zijn een aantal situaties waarin een geleidend voorwerp van belang is. Eén situatie betreft mobiele 'ontvangers' zoals mensen, dieren, auto's, landbouwmachines, irrigatieleidingen of bouwapparatuur en de andere situatie betreft vaste geleidende installaties zoals hekken, metalen elementen in nabijgelegen gebouwen, antennemasten of aangrenzende transmissielijnen. Bijzondere situaties doen zich ook voor bij de aanleg van nieuwe transmissielijnen, pijpleidingen of metaalwerk in de buurt van onder spanning staande lijnen [8].

## 2.4. Inductieve koppeling

Inductieve koppeling is het resultaat van het magnetische veld dat door de hoogspanningslijnen wordt opgewekt. Boven- en ondergrondse geleidende structuren, die parallel lopen aan of in nabijheid zijn van transmissielijnen, worden onderworpen aan geïnduceerde spanningen die door de, in de tijd variërende, magnetische velden worden opgewekt. Deze geïnduceerde spanningen veroorzaken circulatiestromen in de geleidende structuren (tenminste als er een gesloten geleidend lus is voor de stroom) en spanningen tussen de onderdelen en de aarde. Figuur 6 toont een bovengrondse pijpleiding voorgesteld als geleidende structuur in de invloedssfeer van HS-lijnen.

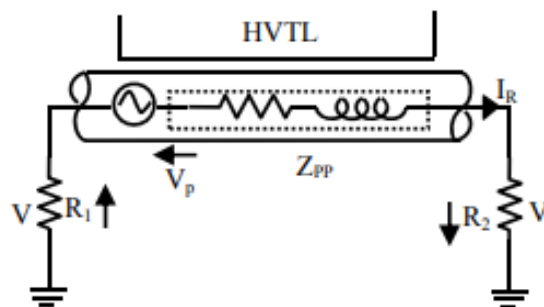


Figuur 6: Bovengrondse pijpleiding onder HS-lijn [9, p. 151]

### 2.4.1. Impact magnetische velden op pijpleidingen

In bron [9] concludeert men dat aarden van de pijpleiding een effectieve maatregel is voor het verminderen van de geïnduceerde spanning op de pijpleiding. Het aarden moet aan beide uiteinden gebeuren. Dit omdat de geïnduceerde spanning dan via de stroom een tegenflux kan genereren en de impact kan verkleinen.

De weerstand van de aardings elektrode moet zo gedimensioneerd worden dat de contactspanning onder de veilige waarde van 50 V blijft. Figuur 7 toont de pijpleiding met aardings elektrodes voorgesteld als een elektrisch circuit, waarbij  $R_1 = R_2 = R$ .



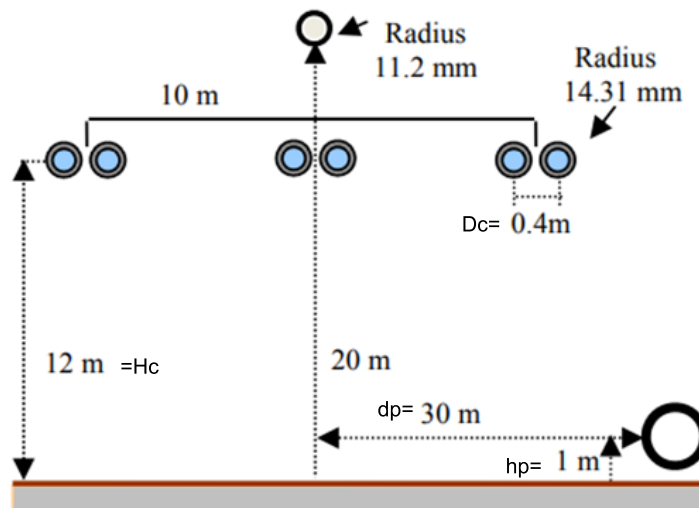
Figuur 7: Pijpleiding en elektrisch circuit aardings elektrode [9, p. 152]



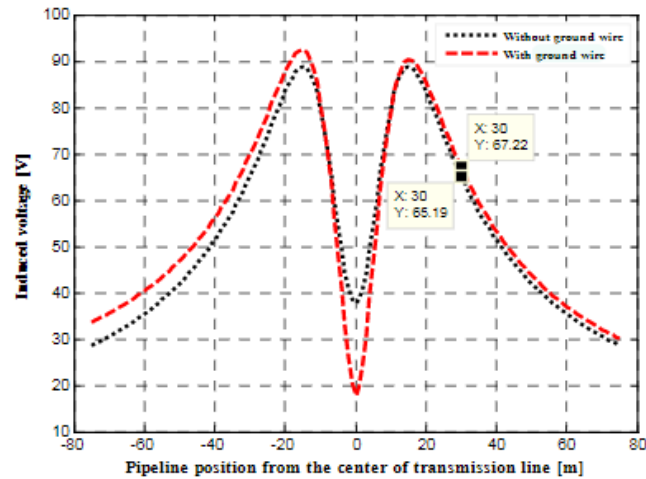
- $V_p$ : De geïnduceerde spanning over de pijpleiding ( $V_p = E_p \cdot L$ , waarbij  $L$  de lengte is van de pijpleiding (m) en  $E_p$  de geïnduceerde spanning per lengte-eenheid (V/m))
- $I_r$ : De stroom die vloeit door de pijpleiding t.g.v. de geïnduceerde spanningen (A)
- $Z_{pp}$ : de totale seriële impedantie van de van de stroom in de pijpleiding. Deze kan numeriek berekend worden ( $\Omega$ ). Zie bron [9]
- $R$ : de weerstand van de aardelektrodes ( $\Omega$ ).

Uit bron [9] kan men nog een aantal interessante verbanden opmaken m.b.t. inductieve koppeling. Dit onderzoek werd gedaan voor een 275 kV hoogspanningsverbinding. De geometrie wordt weergegeven in Figuur 8:

Figuur 9 toont voor de geïnduceerde spanning op een pijpleiding in functie van de afstand tot de mast. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen met en zonder de waakdraad van het hoogspanningsnet. Een waakdraad wordt bovenaan de pyloon gehangen om de installatie te beveiligen tegen bliksem, maar doet ook dienst als aardingsnet van het hoogspanningsnet. Zoals uit Figuur 9 blijkt, is de geïnduceerde spanning bijna verwaarloosbaar als de pijpleiding precies onder de hoogspanningslijn ligt en maximaal als de pijpleiding zich op een afstand van 15 m verwijderd van de loodlijn van de lijn naar aarde bevindt en neemt vervolgens geleidelijk af naarmate de horizontale positie van de pijpleiding toeneemt. Uit deze figuur blijkt ook dat de aanwezigheid van een waakdraad praktisch geen invloed heeft op de waarde van de geïnduceerde spanning, omdat deze zich boven de fasegeleiders bevindt en de stroom hierdoor ook 50 tot 100 keer kleiner is dan de stroom door een fasegeleider. De waakdraad verhoogt de geïnduceerde spanning enigszins met 1 tot 2%, op de leiding.

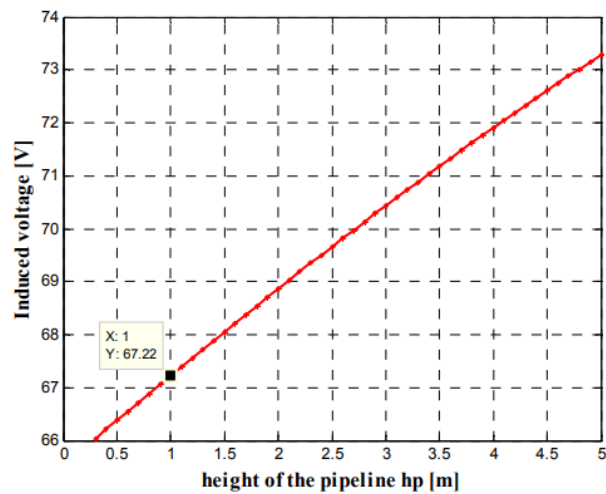


Figuur 8: Horizontale configuratie met waakdraden en bovengrondse pijpleiding [9, p. 153]



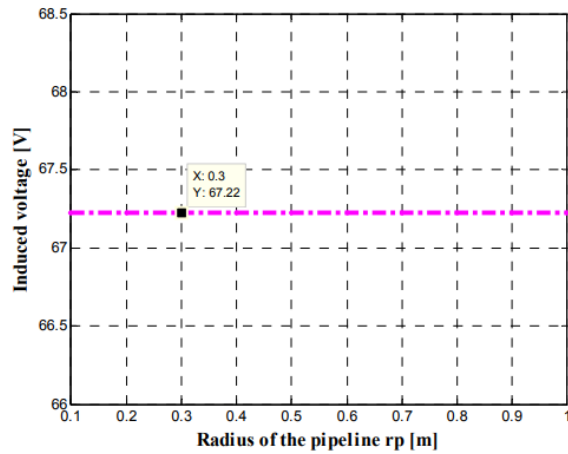
Figuur 9: Geïnduceerd spanningsprofiel op de pijpleiding met en zonder waakdraad voor 275 kV TL ( $dp=30\text{ m}$ ,  $hp=1\text{ m}$ ) [9, p. 153]

Het verband tussen de geïnduceerde spanning op de pijpleiding en de hoogte ervan boven de grond wordt getoond in Figuur 10. Als de afstand van de pijpleiding tot de grond wordt verhoogd met een verticale afstand  $hp$ , wordt duidelijk dat de geïnduceerde spanning licht toeneemt met een benaderende lineaire verhouding.



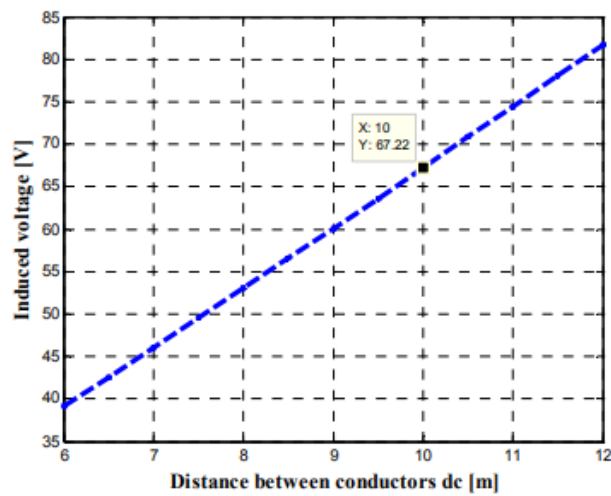
Figuur 10: Relatie tussen geïnduceerde spanning en hoogte van pijpleiding boven de grond [9, p. 154]

Figuur 11 toont aan dat bij het toenemen van de straal van de pijpleiding de amplitude van de geïnduceerde spanning op het oppervlak van de leiding constant blijft over de volledige lengte van het parallelisme. De straal van een object heeft dus geen rechtstreekse invloed op de grootte van de geïnduceerde spanning.

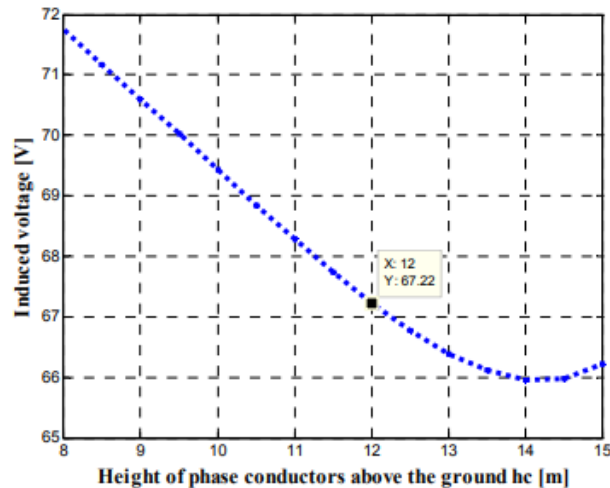


Figuur 11: Relatie tussen de radius van de pijpleiding en de geïnduceerde spanning [9, p. 154]

Aan de hand van de geometrie van **Figuur 8** variëren we de afstand tussen de fasegeleiders onderling ( $D_c$ ) en bestuderen het effect op de waarde van de geïnduceerde spanning, getoond in Figuur 12. Als de afstand tussen de fasegeleiders groot is, is de geïnduceerde spanning op de pijpleiding hoog. Deze relatie benadert een lineair verband. Figuur 13 toont de variatie van de geïnduceerde spanning met de hoogte van de geleiders t.o.v. de grond ( $H_c$ ). Het toenemen van de hoogte van de geleiders boven de grond lijkt een effectieve methode om de geïnduceerde spanning op de pijpleiding te verminderen.

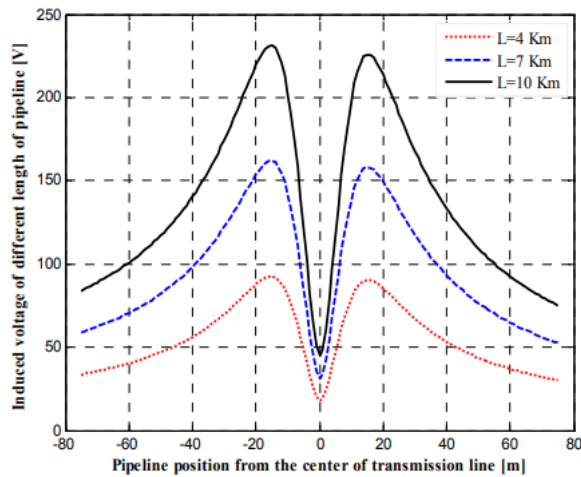


Figuur 12: Relatie tussen de afstand van de geleiders en de geïnduceerde spanning [9, p. 154]



Figuur 13: Relatie tussen geïnduceerde spanning en de hoogte van de geleiders vanaf de grond [9, p. 154]

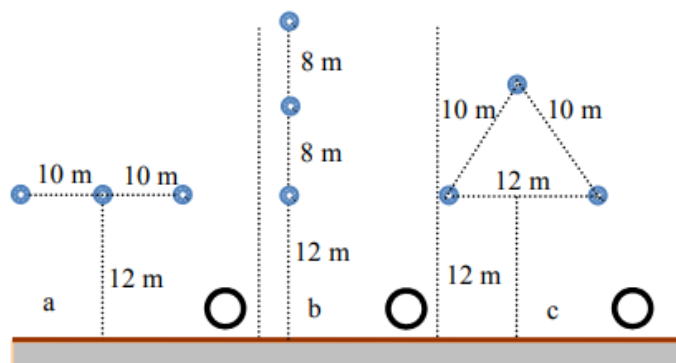
De geïnduceerde spanning hangt af van de lengte van de pijpleiding die aan de transmissielijn is blootgesteld. Voor een parallelisme tussen de pijpleiding en de HS-lijn toont Figuur 14 de geïnduceerde spanning op het oppervlak van de pijpleiding voor verschillende lengtes van een parallelle sectie. Naarmate de parallelle sectie toeneemt, des te groter het deel van de pijpleiding dat zich binnen het magnetische veld bevindt en dus gevoelig is voor inductieve koppeling. Dit resulteert in een grotere geïnduceerde spanning op het object. De blootstellingslengte of lengte van het object is dus een belangrijke factor voor de grootte van de geïnduceerde spanning.



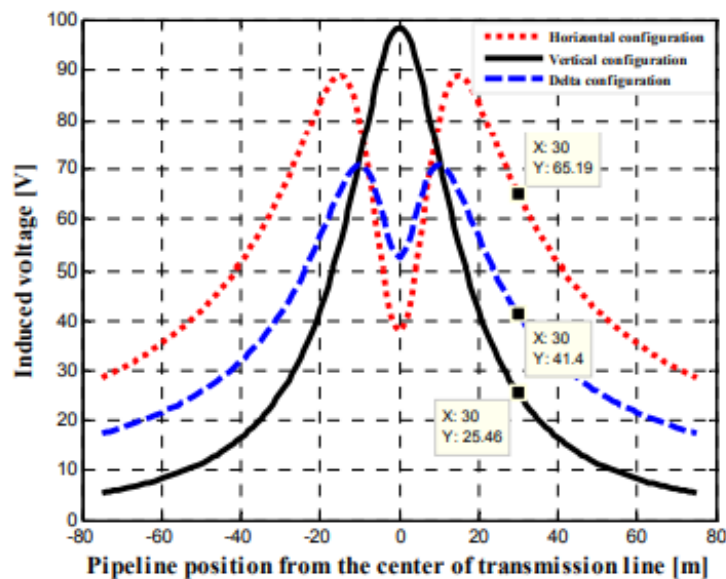
Figuur 14: Variatie van geïnduceerde spanning met de lengte van het parallelisme [9, p. 155]

Figuur 16 toont de vergelijking van de geïnduceerde spanningen voor de drie lijnconfiguraties met één circuit nl. horizontaal, verticaal en delta, zoals weergegeven in Figuur 15. In België hebben we de verticale configuratie, in Duitsland de horizontale en in Frankrijk de delta configuratie. Bij een horizontale lijnconfiguratie lopen de geleiders parallel aan het aardoppervlak. Deze configuratie resulteert over het algemeen in een sterkere geïnduceerde spanning op objecten die zich dicht bij de geleiders bevinden. De nabijheid van de objecten tot de geleiders zorgt voor een betere koppeling met het magnetische veld dat door de stroom in de geleiders wordt gegenereerd, waardoor de geïnduceerde spanning toeneemt. Bij een verticale lijnconfiguratie staan de geleiders verticaal

omhoog vanaf het aardoppervlak. Deze configuratie kan leiden tot een lagere geïnduceerde spanning op objecten in vergelijking met een horizontale configuratie. Dit komt doordat de afstand tussen de objecten en de geleiders groter is, waardoor de koppeling met het magnetische veld enigszins wordt verminderd. Merk wel op dat de geïnduceerde spanning recht onder de mast hoge waarden kan bereiken. Die drie velden compenseren mekaar, maar de reikwijdte van de 2de en 3de lijndraad is niet genoeg om het onderste magnetisch veld te neutraliseren. Bij een deltaconfiguratie vormen de geleiders een driehoek. Deze configuratie kan een complexer magnetisch veld genereren, waardoor de geïnduceerde spanning op nabijgelegen objecten kan variëren afhankelijk van hun positie en oriëntatie ten opzichte van de driehoek.



Figuur 15: Verschillende geometrische configuraties voor HS transmissielijnen [9, p. 153]

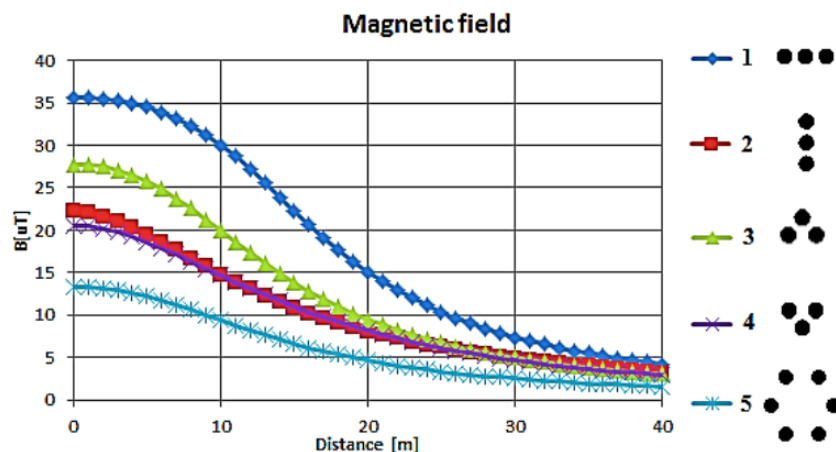


Figuur 16: Geïnduceerde spanning op de pijpleiding voor verschillende lijnconfiguraties [9, p. 155]

#### 2.4.2. Magnetische velden rond hoogspanningslijnen

De geïnduceerde spanning op geleidende structuren wordt veroorzaakt door het wisselend magnetisch veld van de transmissielijnen. Referentie [10] toont de variatie van het magnetisch veld in functie van verschillende lijnconfiguraties. Bij een horizontale lijnconfiguratie wordt het magnetische veld voornamelijk geconcentreerd in de horizontale richting. Dit betekent dat het magnetische veld sterker is in de buurt van de geleiders en geleidelijk afneemt naarmate men zich verder van de

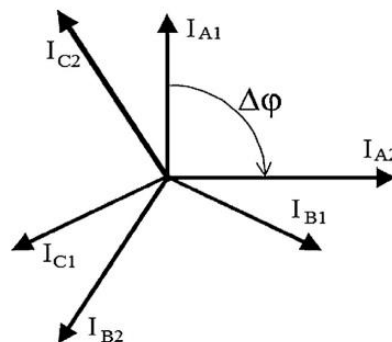
geleiders verwijderd. Bij een verticale lijnconfiguratie, is het magnetische veld voornamelijk geconcentreerd in de verticale richting. Dit betekent dat het magnetische veld sterker is direct boven en onder de geleiders en afneemt naarmate men zich horizontaal van de geleiders verwijderd. Bij de deltaconfiguratie zien we dat het magnetisch veld aan de mast iets lager is dan bij de horizontale opstelling. De twee onderste fasegeleiders zullen ook hier weer samenkoppelen en één groter veld vormen. De omgekeerde delta heeft dan weer een iets lager veld aan de grond doordat het samengekoppelde veld nu fysisch hoger ligt dan bij de delta. De tonconfiguratie lijkt het laagste magnetisch veld te geven aan het aardoppervlak. Onderstaande Figuur 17 toont de verschillende configuraties voor een hoogspanningsverbinding van 400 kV. De laagste geleiders hangen op een hoogte van 11,6 m. De afstand tussen de bundels is 10,4 m.



Figuur 17: Magnetisch veld voor verschillende lijnconfiguraties [10, p. 231]

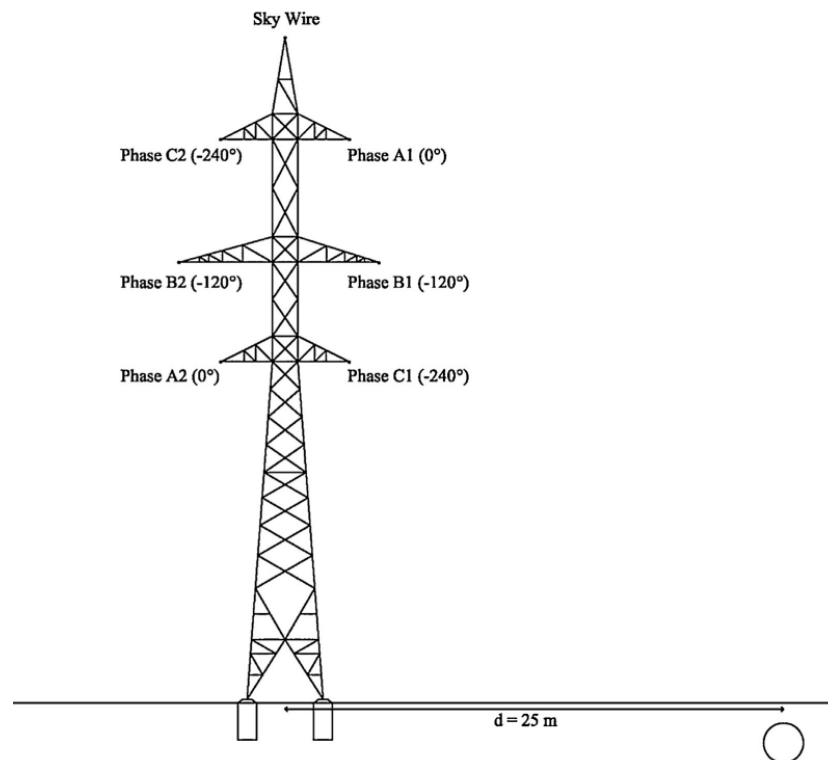
Naast de lijnconfiguratie is de faseconfiguratie bij meerdere draadstellen aan de masten een belangrijke parameter voor de waarde van het magnetisch veld t.h.v. een object of de grond [11].

Laten we nu aannemen dat een dubbele transmissielijn bestaat uit twee onafhankelijke enkelvoudige circuits (draadstellen), die verschillende netwerkknooppunten verbinden en over een bepaalde afstand op dezelfde masten zijn geplaatst. In dat geval is het vrij gebruikelijk dat er een faseverschuiving optreedt tussen de stroomfasoren van de twee circuits (Figuur 18). Dit kan veroorzaakt worden door het feit dat twee draadstellen een verschillende hoeveelheid actief en reactief vermogen transporteren maar ook doordat de fasevolgorde van de stromen in de geleiders van de 2 draadstellen verschillend is [11].



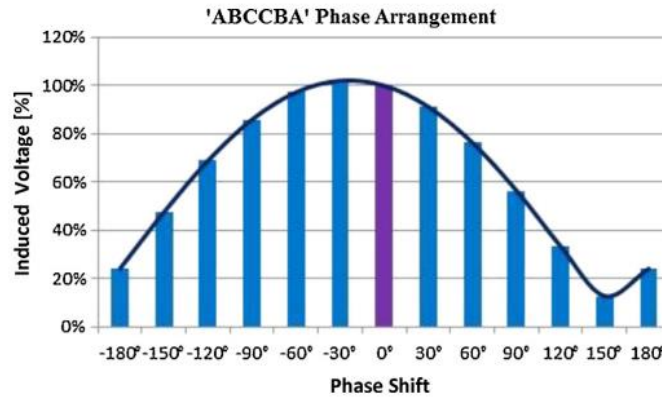
Figuur 18: Faseverschuiving tussen 2 circuits [11, p. 4]

Eerder onderzoek [12] toonde aan dat het verwaarlozen van de faseverschuiving kan leiden tot aanzienlijke fouten in de berekening van het magnetisch veld (tot 50%), wat leidt tot onderschatting of overschatting. De statistische analyse van een Italiaanse hoogspanning transmissielijn met twee circuits in [13] toonde aan dat de gemiddelde faseverschuiving tussen de twee circuits hoger kan zijn dan 90 graden. In onderstaande tekst worden de directe effecten van faseverschuivingen op geïnduceerde wisselspanningen in ondergrondse pijpleidingen bestudeerd. Het doel is de kritische faseverschuivingen te identificeren en de fout die optreedt als deze faseverschuivingen verwaarloosd worden. Om de invloed van faseverschuivingen op de geïnduceerde spanning te evalueren, wordt een symmetrische stroombelasting van 350 A op beide circuits genomen [11].



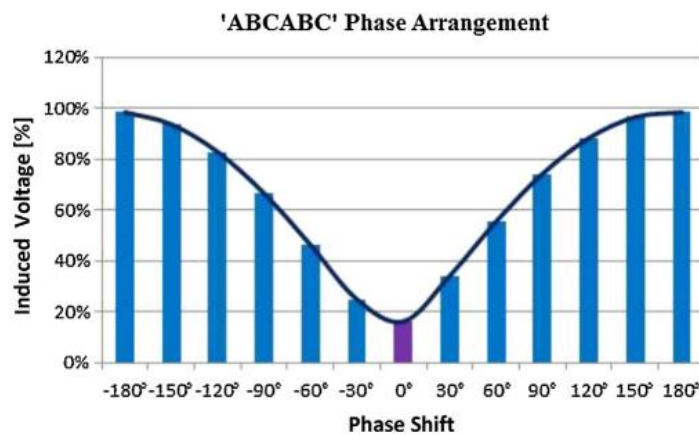
*Figuur 19: Dwarsdoorsnede mast met fasevolgorde + ondergrondse pijpleiding [11, p. 3]*

In eerste instantie wordt de bundel ABCCBA-fase-indeling ("klokwijs lezen) onderzocht. Deze configuratie wordt ook de lage reactantie bundel genoemd, waarbij fase A van de rechter kring als faseoorsprong wordt beschouwd en op de linker kring verschillende faseverschuivingen (van  $-180^\circ$  tot  $+180^\circ$ ) werden aangelegd, zie Figuur 20 en Figuur 21. Merk op dat een faseverschuiving van  $-120^\circ$  overkomt met een ABCACB fase-indeling, terwijl een faseverschuiving van  $120^\circ$  overeenkomt met een 'ABCBAC'-fase-indeling. Figuur 20 toont de maximale geïnduceerde spanning aan de pijpleidinguiteinden voor verschillende faseverschuivingen in vergelijking met het situatie zonder faseverschuiving. Uit de analyse van de geïnduceerde wisselspanningswaarden kunnen we concluderen dat het verwaarlozen van de faseverschuiving tussen de twee draadstellen een schattingsfout van minder dan 10% oplevert voor faseverschuivingen lager dan  $\pm 30^\circ$ . Als echter deze grens van  $\pm 30^\circ$  wordt overschreden, neemt de schattingsfout toe [11].



Figuur 20: Geïnduceerde spanning voor het geval 'ABCCBA' [11, p. 4]

Figuur 21 toont de maximale geïnduceerde spanning aan de pijpleidingen voor verschillende faseverschuivingen, vergeleken met een situatie zonder faseverschuiving, toegepast op dezelfde bundel, "ABCCBA" fase-indeling. Het is belangrijk op te merken dat in dit geval zelfs een kleine faseverschuiving aanzienlijke fouten kan opleveren.

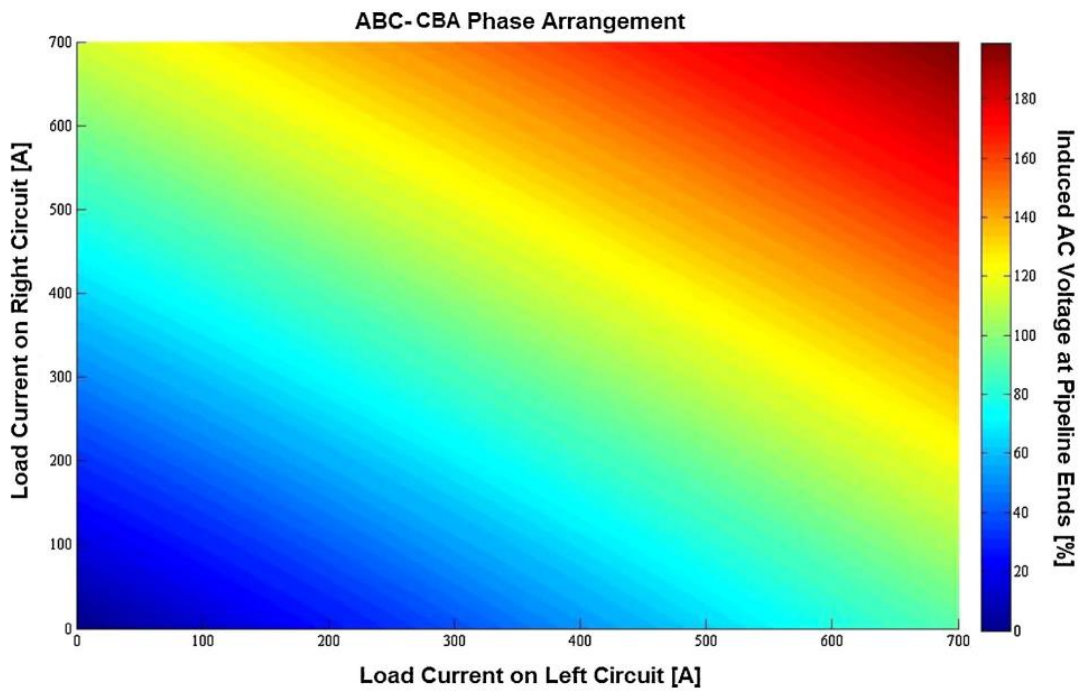


Figuur 21: Geïnduceerde spanning voor een lage reactantiebundel 'ABCABC' [11, p. 5]

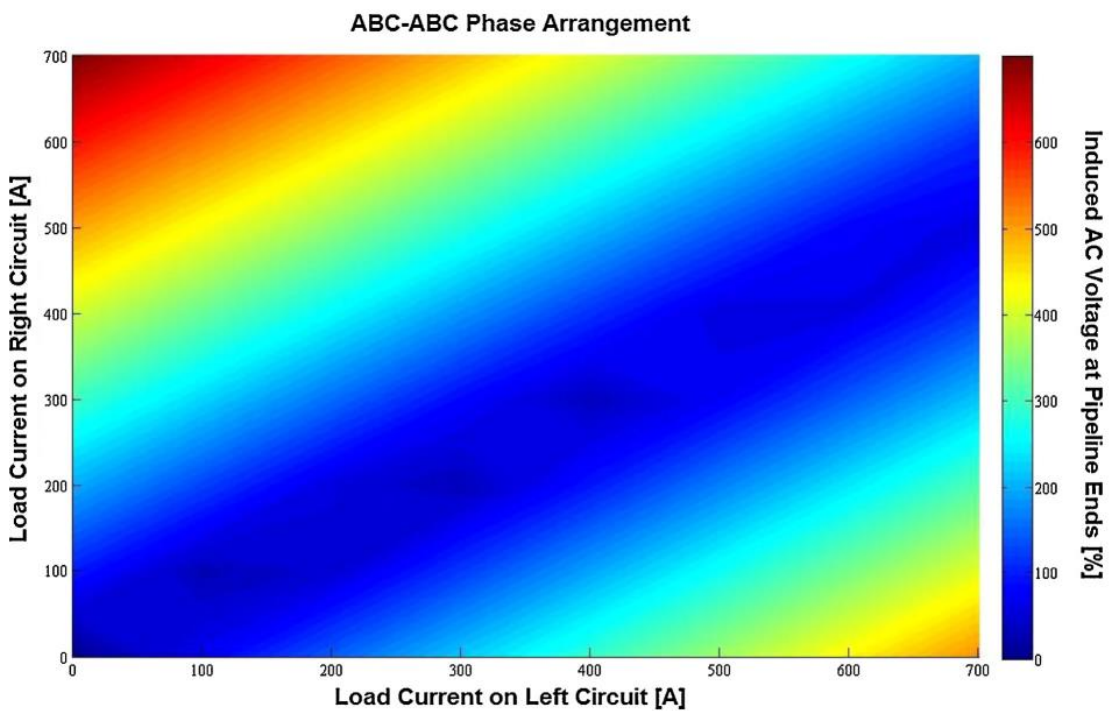
In de voorgaande punten werd ervan uitgegaan dat beide stroomkringen gelijke en symmetrische belastingen voeden. In [11] wordt ook de invloed geëvalueerd van verschillende symmetrische belastingen van elke stroomkring op de geïnduceerde wisselstroom. In eerste instantie wordt de superbundel, "ABCCBA" faseopstelling beschouwd en wordt de stroombelasting in elke stroomkring gevarieerd van 0A tot 700A. Geen belasting in een van de twee circuits is gelijk aan een bedrijfstoestand waarin slechts één van de circuits actief is, terwijl de andere (met de 0 A belasting) een reservelijn is. In geval van een storing op het eerste circuit wordt de reservelijn actief ter vervanging van het defecte. Figuur 22 toont het geïnduceerde wisselspanningsniveau op de pijpleiding voor verschillende belastingsstromen, vergeleken met het geval waarin beide circuits dezelfde symmetrische belasting van 350 A hebben. Uit Figuur 22 blijkt dat voor de superbundel faseopstelling beide stroomkringen hetzelfde gedrag tonen: een toename van de stroombelasting in elk circuit een evenredige toename van de geïnduceerde spanningswaarde genereren. De rechter kring echter, die dicht bij de pijpleiding hangt, heeft een grotere invloed op de geïnduceerde spanning dan de linkse kring. Een soortgelijke studie voor de lage reactantiebundel, "ABCABC" fase opstelling is weergegeven in Figuur 23. De geïnduceerde spanning op de leiding wordt berekend wanneer de symmetrische



belastingsstroom in beide stroomkringen circuits idem als de rechtse kring wordt gevarieerd van 0A tot 700A. De resultaten worden vergeleken met de normale bedrijfstoestand wanneer beide symmetrisch belast worden met 350 A en dezelfde fase-indeling wordt toegepast. [11]



*Figuur 22: Variatie van de geïnduceerde AC spanning op de pijpleidingeinden bij 'ABCCBA' fasevolgorde, gerefereerd t.o.v. de gelijke belasting van 350A in beide circuits [11, p. 5]*



*Figuur 23: Variatie van de geïnduceerde AC spanning op de pijpleidingeinden bij 'ABCABC' fasevolgorde, gerefereerd t.o.v. de gelijke belasting van 350A in beide circuits [11, p. 6]*

In [11] concludeert men dat de stroombelastingen in de hoogspanningskring een tegengestelde invloed hebben op het geïnduceerde spanningsniveau. Een verhoging van de stroombelasting in het rechter circuit leidt tot een verhoging van het geïnduceerde spanningsniveau, terwijl een verhoging in het linker circuit tot een verlaging van het geïnduceerde spanningsniveau leidt. In feite compenseert de stroombelasting van het linker circuit de invloed van het rechter circuit. De minimumwaarde van de geïnduceerde wisselspanning in de pijpleiding wordt verkregen als de stroombelasting van de linkse circuit 125% van de stroombelasting van het rechter circuit bereikt heeft. Daarna begint de geïnduceerde spanning toe te nemen met de belasting van het linkse circuit. Merk op dat deze resultaten gelden voor de specifieke voorwaarden en parameters van het onderzoek in referentie [11].

#### 2.4.3. Conclusie inductieve koppeling

Inductieve koppeling is een belangrijk fenomeen dat optreedt wanneer een veranderende stroom in één circuit een spanning opwekt in een ander circuit dat in de nabijheid is.

In het voorgaande hoofdstuk 2.4. hebben we de verschillende factoren die invloed hebben op de magnetische velden en geïnduceerde spanningen geanalyseerd. Er kan besloten worden dat in eerste instantie veel ontwerpparameters van de transmissielijnen rechtstreeks invloed hebben op de grootte van het magnetische veld aan de grond. De grootte van de geïnduceerde spanning wordt ook bepaald door factoren zoals de stroomsterkte van iedere lijn en van de stroomsterkte tussen de twee draadstellen. Ook de afstand tussen de geleiders en het object en de geometrische eigenschappen van het object bepalen mee het magnetisch veld aan de grond. We kunnen besluiten dat het negeren van de faseverschuivingen tussen de 2 draadstellen, aanzienlijke onder- en overschattingen van de geïnduceerde spanningen kan opleveren.

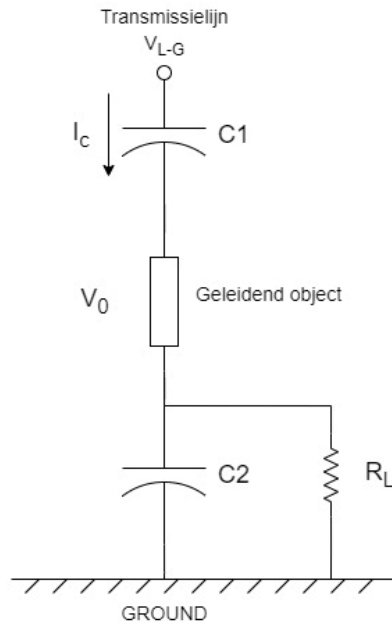
In België heeft Elia geen right-of-way, oftewel een vaste corridor in eigen beheer, onder en langs haar hoogspanningstracé. Deze gronden zijn dus geen eigendom van Elia. D.w.z. dat een eigenaar van landgoed onder of langs het tracé kan bouwen en een (elektrische) installatie kan plaatsen. Hierdoor wordt het steeds belangrijker dat de magnetische velden tot het minimum beperkt worden. Het reduceren van de effecten op externe elektrische installaties start dus bij het ontwerp van de lijnen. Buiten het minimaliseren van de velden in het ontwerp is het belangrijk voor steeds een veilige afstand te respecteren ten opzichte van de transmissielijnen. Dit wordt later in deze thesis ook nog onderbouwd met simulaties.

## 2.5. Capacitieve koppeling

Capacitieve koppeling ontstaat wanneer een geleidend object zich onder of in de nabijheid van een hoogspanningslijn bevindt. De lijn en het object functioneren als geleidende delen met ertussen een isolatiemedium (lucht). De grootte van zowel het potentiaal en de laadstroom van het object naar aarde (bij een gesloten lus) zijn evenredig met de grootte van het lijnpotentiaal. Daarom zal het belang van het effect toenemen met de stijgende spanningsniveau van hoogspanningstransmissielijnen [14].

Hoge waarden, van open circuitspanning op een geleidend voorwerp, kunnen leiden tot vonken van het object naar de aarde, met een explosief vermogen in aanwezigheid van vluchtige gassen. Referentie [8] legde een kwantitatief verband tussen elektrische stroom en zijn effect op de mens. Hier werd de "let-go threshold" gedefinieerd als de maximale stroom die een mens kan verdragen. Dit wanneer hij een geleider vasthoudt in een hand en nog steeds kan loslaten door de spieren te gebruiken die direct worden gestimuleerd door die stroom. Het stroomniveau, dat is gemeten van voorwerpen naar de aarde onder HS-lijnen, ligt in het algemeen onder de "let-go" drempelwaarde [14].

Figuur 24 toont een eenlijnsmodel voor de berekening van het potentiaal en de laadstroom naar een niet geaard voorwerp dat zich onder een transmissielijn bevindt. Het kennen van de relatieve grootheden van de impedanties is cruciaal om dit effect te verklaren. De capacitieve lijn-naar-object impedantie is veel groter dan de impedantie van het object naar aarde. Dus de transmissielijnspanning en de lijn-naar-object impedantie kunnen onder deze omstandigheden worden voorgesteld als een stroombron. De parallelle lekweerstand en de impedantie van het object naar de aarde zijn beide over het algemeen veel groter dan de weerstand van een menselijk lichaam. Dus bijna de hele stroom van de bron zou vloeien door een persoon die zowel het voorwerp als de aarde aanraakt. Onder deze omstandigheden zou de constante spanning op het object ongeveer bepaald worden door de resistieve spanningsval van het menselijk lichaam [14].



Met:

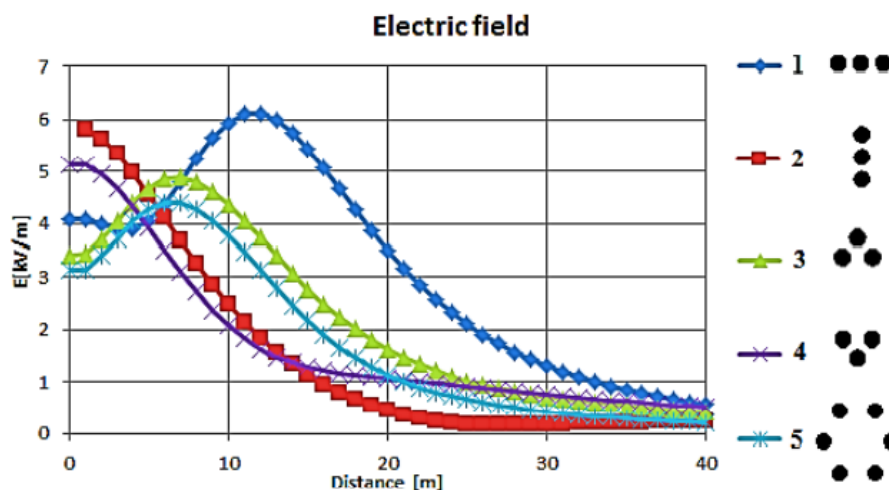
- $C_1$  = Lijn - object capaciteit
- $C_2$  = object - ground capaciteit
- $R_L$  = object - ground lekweerstand
- $V_{L-G}$  = fasespanning
- $V_0$  = object - ground spanning
- $I_c$  = laadstroom

*Figuur 24: Eenlijnsmodel voor het berekenen van  $V_{o.c.}$  (open circuit spanning) en de laadstroom van een object onder een HS lijn [14, p. 769]*

De spanning van de bovengrondse transmissielijn creëert een in de tijd variërende ladingsverdeling op de geleiders. De aanwezigheid van deze ladingen creëert een elektrisch veld dat de positie van de ladingen op nabijgelegen geleiders verandert. De verticale elektrische velden geproduceerd door de bovengrondse transmissielijnen aan en nabij het aardoppervlak zijn gemeten en berekend voor verschillende lijnhoogtes en lijnspanningen. Algemene methoden [15] zijn beschikbaar waarmee dit verticale elektrische veld wordt berekend voor verschillende gangbare configuraties van transmissielijnen. Computerondersteunde berekeningen gebaseerd op strikte veldtheorie die goed overeenkomen met de metingen zijn ook gemaakt. Dergelijke benaderingen kunnen de doorhang van de lijnen, masten [16] en grondgeleidingseffecten in rekening brengen. Terwijl de werkelijke velden een complexe functie zijn van de geometrie van de lijnhoogte, grootte en scheiding van de geleiders [8].

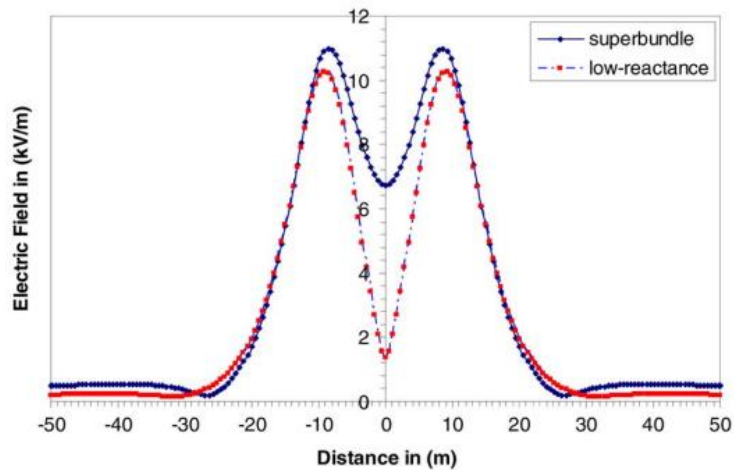
Ook bij capacatieve koppeling is de spanning op het object, ten gevolge van het elektrisch veld, afhankelijk van verschillende parameters. Een significante vermindering van de elektrische en magnetische velden in de omgeving van de lijnen is mogelijk door de keuze van de juiste configuratie van geleiders van de transmissielijn. In [10] zijn er berekeningen uitgevoerd voor een hoogspanningsverbinding van 400 kV. De laagste geleiders hangen op een hoogte van 11,6 m. De afstand tussen de bundels is 10,4 m. Er zijn verschillende configuraties onderzocht, te beginnen met de horizontale configuratie (1), een verticale configuratie (2), de "delta"-configuratie (3), de

"omgekeerde delta"-configuratie (4) en de "ton"-configuratie (5), zoals weergegeven in Figuur 25. Tijdens de berekening zijn de hoogtes van de laagste fasegeleiders en interfaseafstanden gelijk gehouden voor alle configuraties gelijk gehouden. Het elektrisch veld wordt beïnvloed door de geometrie en de verdeling van de geleiders in het systeem. Bij een horizontale lijnconfiguratie bevinden de geleiders zich op hetzelfde horizontale vlak. Dit resulteert in een elektrisch veld dat voornamelijk horizontaal is gericht. Het elektrisch veld kan zich uitstrekken over een groot gebied langs de geleiders. Bij een verticale lijnconfiguratie bevinden de geleiders zich op hetzelfde verticale vlak. Dit creëert een verticaal georiënteerd elektrisch veld. Het elektrisch veld kan zich verticaal verspreiden langs de geleiders. Een delta-configuratie is een configuratie waarbij de geleiders in een driehoekige vorm zijn verbonden. Deze configuratie creëert een complex elektrisch veld dat zowel horizontaal als verticaal componenten bevat. Het elektrisch veld is sterker geconcentreerd in de buurt van de delta-configuratie. In een tonconfiguratie wordt het elektrisch veld in de lus of ring grotendeels geconcentreerd binnen de omtrek van de lus.



Figuur 25: Elektrisch veld voor verschillende lijnconfiguraties [10, p. 231]

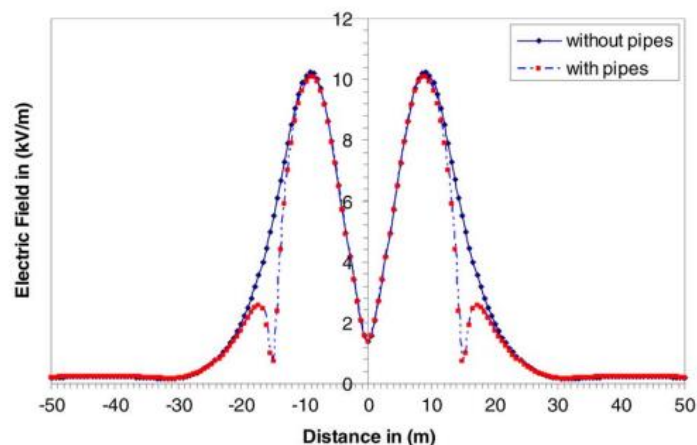
Referentie [17] toont het verschil van het elektrisch veld bij een lijn met een superbundel configuratie en een lage reactantie bundel. De metingen werden hier gedaan voor een 275 kV transmissielijn waarbij een lage reactantie faseconfiguratie is toegepast. Bij deze configuratie worden de fasegeleiders opgehangen volgens 'ABCABC' (klokwijz gelezen). Bij een superbundel worden de gelijke fases van het linker en het rechter draadstel op dezelfde hoogte gehangen (ABCCBA, klokwijz gelezen) zie pagina 32. Figuur 26 toont de verdeling van het elektrisch veld aan het grondoppervlak. Dit voor de superbundel en met lage reactantie faseconfiguratie. Uit de figuur blijkt duidelijk dat het elektrisch veld aan het grondoppervlak voor de superbundelopstelling hoger is dan die van de opstelling met lage reactiviteit [17].



*Figuur 26: Elektrisch veld op aardoppervlak van een “low reactance bundle” & “super bundle” voor een 275 kV transmissielijn line “ [17, p. 2468]*

Het WHO (World Health Organization) stelt de limiet waarde voor kortstondige blootstelling aan een elektrisch veld op 5 kV/m [18]. Men ziet dat links en rechts van de lijnen de maximale waarde overstijgt tot zelfs maximumpieken van +/- 11kV/m bij de superbundel. Vanaf een afstand van 20m t.o.v. de mast ligt de blootstellingswaarde onder de maximale waarde opgelegd door het WHO en de Belgische wetgeving [19]. Let wel op, bovenstaande Figuur 26 geldt voor een 275 kV verbinding.

In bron [17] onderzoekt men ook de invloed van het elektrisch veld wanneer er een geleidend object onder de transmissielijnen wordt geplaatst (bv. een pijpleiding). Figuur 27 toont het elektrisch veld aan het aardoppervlak in functie van de afstand van het middelpunt van de mast wanneer er aan iedere kant van de mast een geleidend object geplaatst is. Uit de grafiek blijkt dat de aanwezigheid van de pijpleiding een effect heeft op zowel de maximale veldspanning. De waarden van de veldspanningen in de figuren zijn piekwaarden en geen RMS-waarden.

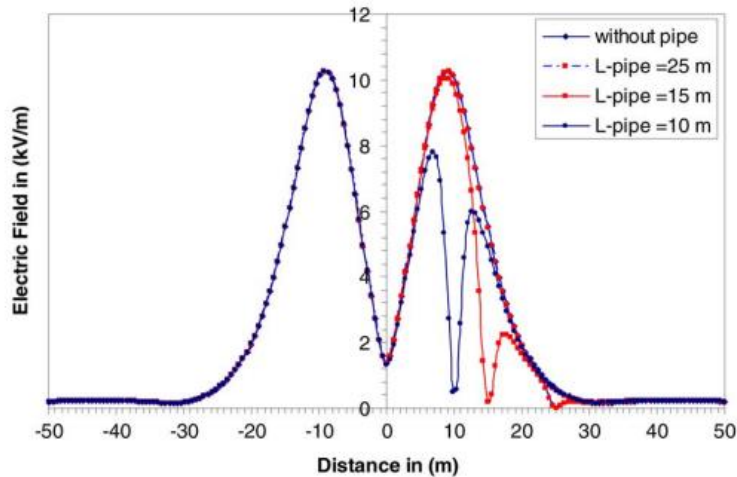


*Figuur 27: Elektrisch veld op het grondoppervlak voor een lage reactantie opstelling met 2 pijpleidingen (1 aan elke kant van de pyloon) [17, p. 2468]*

Figuur 28 toont de veldverdeling aan het grondoppervlak zonder en met pijpleidingen met een verschillende lengte. Uit de figuur blijkt duidelijk dat er een verandering van zowel de veldspanning als de ROW-breedte is als de lengte van de pijpleiding verandert. Hoge elektrische velden, die door hoogspanningslijnen worden opgewekt, kunnen mensen en dieren treffen door het ontstaan van een

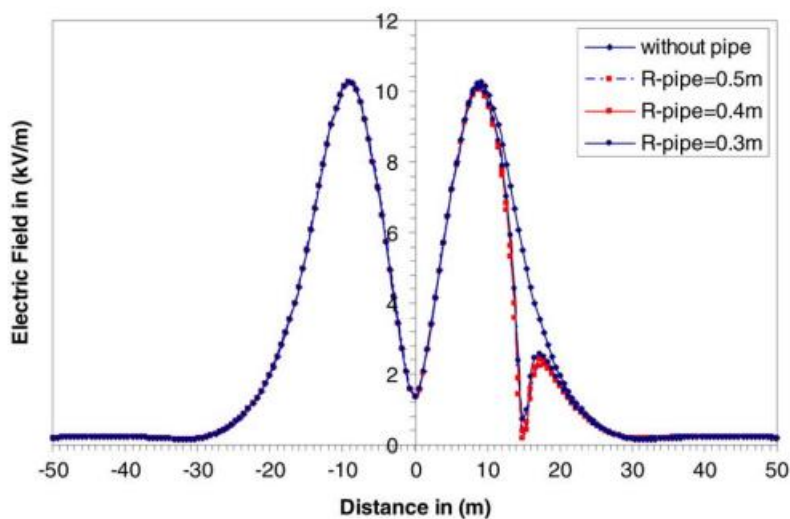


potentieel gevaar voor elektrische schokken. Daarom wordt er van corridors of right-of-way (ROW) grenzen gesproken aan beide zijden langs de route van transmissielijnen. Naarmate de effectieve lengte van de pijpleiding verandert, ziet men zowel de maximale waarde van de veldspanning en de ROW-breedte voor bepaalde gespecificeerde waarden, aan de rand van het tracé, aanzienlijk afnemen [17].



*Figuur 28: Elektrisch veld aan het grondoppervlak (lage reactantiebundel) met de afstand van een pijpleiding tot de geleiders als parameter [17, p. 2469]*

In Figuur 29 werd de afstand van de pijpleiding tot het centrum van de transmissielijn gekozen op 15 m en de straal van de pijpleiding is gevarieerd van 0,5 tot 0,4 m en tot 0,3 m. De verdeling van het elektrisch veld aan het grondoppervlak werd uitgezet in functie van de afstand. Er werd geconstateerd dat naarmate de straal van de pijpleiding toeneemt de maximale waarden van de veldspanning en de ROW-breedten afnemen, maar niet aanzienlijk. Een grotere diameter van de pijpleiding kan het elektrisch veld in de ROW doen verminderen, dit in tegenstelling tot bij de inductieve koppeling. Wegens gewichts- en economische redenen zou het niet realistisch zijn om alle pijpleidingen in de nabijheid van hoogspanningsinfrastructuur te vergroten in diameter [17].



*Figuur 29: Variatie van het elektrisch veld aan het grondoppervlak (lage reactantiebundel) met de aanwezigheid van een pijpleiding met radius  $R_p$  als parameter [17, p. 2470]*

### 2.5.1. Conclusie capacatieve koppeling

Capacatieve koppeling is een fenomeen waarbij een elektrisch veld ontstaat tussen twee geleiders die zich dicht bij elkaar bevinden, wat kan leiden tot ongewenste interferentie in elektrische systemen. In hoofdstuk 2.5. hebben we de invloed van de faseconfiguratie op capacatieve koppeling onderzocht en geanalyseerd. Uit onze bevindingen, uit de literatuur, blijkt dat de faseconfiguratie een significante invloed kan hebben op de mate van capacatieve koppeling. Bij een bepaalde faseconfiguratie (ABCABC of ABCCBA) kunnen de capacatieve koppelingsstromen en -spanningen toenemen of afnemen, afhankelijk van de specifieke omstandigheden. Zo blijkt dat bij een “low-reactance bundle” oftewel een ABCABC (klokwijs gelezen) het elektrisch veld in het midden onder de mast op grondniveau beduidend lager is. De literatuur toont ook aan dat een object onder een transmissielijn de capacatieve koppeling kan vergroten of verkleinen, afhankelijk van verschillende factoren. De geometrie, grootte en elektrische eigenschappen van het object spelen hierbij een belangrijke rol.

### 2.6. Conductieve koppeling

Naast inductieve en capacatieve koppeling is conductieve koppeling ook een belangrijk fenomeen. Conductieve beïnvloeding wordt, in tegenstelling tot inductieve en capacatieve, niet door EM-velden veroorzaakt. Het treedt op wanneer twee of meer geleiders met een verschillend potentiaal direct fysiek contact maken. In deze thesis zullen we ons richten op twee specifieke aspecten van conductieve koppeling in het hoogspanningsnet.

- **Stap- en contactspanningen:** het eerste deel van onze bespreking richt zich op stap- en contactspanningen. Stapspanningen ontstaan wanneer een persoon of object over een geaard oppervlak beweegt en daardoor een potentiaalverschil ervaart. Dit kan resulteren in ongewenste stromen en potentieel levensbedreigende situaties. Daarnaast hebben contactspanningen betrekking op het contact tussen geleidende delen die verschillende potentiaalniveaus hebben.
- **Gevolgen van netwerkincidenten in het hoogspanningsnet:** Het tweede deel van onze bespreking richt zich op de **gevolgen van foutstromen** in het hoogspanningsnet. Foutstromen kunnen ontstaan door een netwerkincident, zoals blikseminslagen of aardsluitingen. Deze stromen kunnen niet alleen significante schade veroorzaken aan apparatuur en infrastructuur in het hoogspanningsnet, maar ook aan elektrische installaties in de directe omgeving.

#### 2.6.1. Stap- en contactspanningen

Stap- en contactspanningen kunnen veroorzaakt worden door de injectie van stroom in de bodem door een aardsluiting van een transmissielijn of een blikseminslag op hoogspanningsinfrastructuur, zoals geïllustreerd in het vereenvoudigde model in Figuur 30. Aangenomen dat de bliksemontlading wordt voorgesteld door een stroombron aan het bodemoppervlak (punt P) en dat het waarnemingspunt O voldoende verwijderd is van punt P, wordt de GPR (Ground Potential Rise) benaderd als [20]:

$$\hat{U}(P, O) = \frac{\rho I}{2\pi r},$$



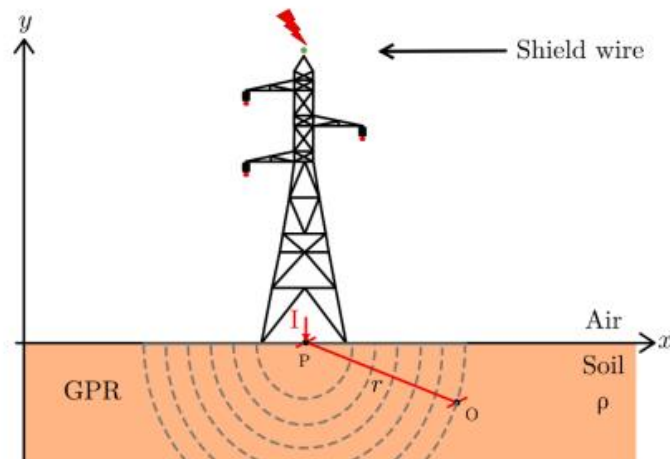
Met:

$\hat{U}(P,O)$  = scalaire potentiaal in punt O geproduceerd door de bron in punt P in Volt

$\rho$  = bodemweerstand in  $\Omega\text{m}$

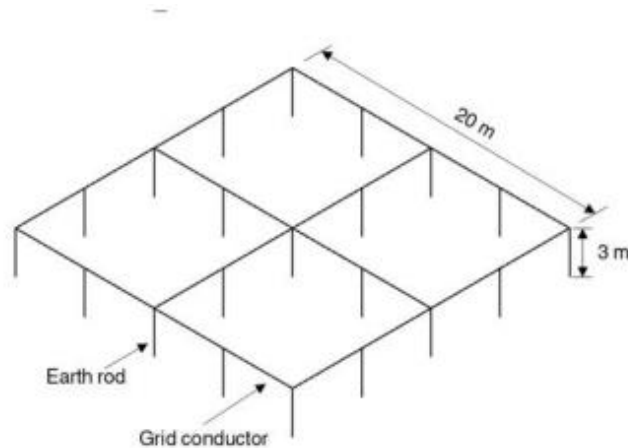
$I$  = ontlaadstroom in Ampère

$r$  = afstand tussen de punten P en Q in meter

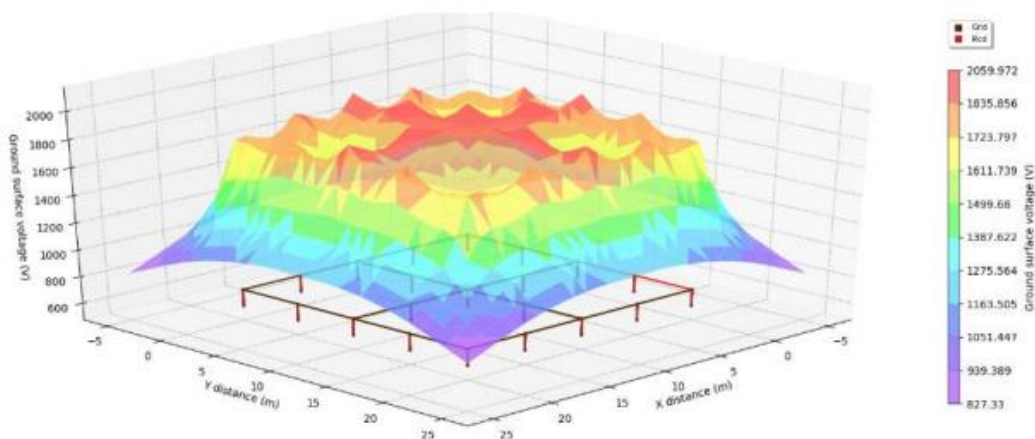


*Figuur 30: Gesimplificeerd model voor de GPR rond een mast onderhevig aan een blikseminslag [20, p. 2]*

De GPR is recht evenredig met de grootte van de stroom die in de bodem wordt geïnjecteerd via het aardingsstelsel. Voor een gegeven injectiestroom is de GPR recht evenredig met de bodemresistiviteit. Daarom is het bij het ontwerpen van een aardingsstelsel van groot belang om betrouwbare (bodem)weerstandsmetingen te hebben en deze uit te voeren op de locatie van een onderstation of een mast, om de bodemeigenschappen vast te stellen. Dit is nodig om het aardingsmodel zo correct mogelijk op te stellen zodat de prestaties van het aardingsstelsel zo nauwkeurig mogelijk ingeschat worden. Voor een gegeven foutstroom is de GPR ongeveer omgekeerd evenredig met de oppervlakte van het aardingsnet. Figuur 31a toont een gegeven vermaasd aardingsnet met "earth rods" (aardingspinnen). Figuur 31b toont de GPR in Volt voor ieder punt binnen de oppervlakte van het aardingsnet. De GPR kan variëren op verschillende punten in het netwerk, afhankelijk van verschillende factoren zoals de stroomsterkte, de weerstand van de aarding en de afstand tot de bron van de fout.



(a) 3D view of example system



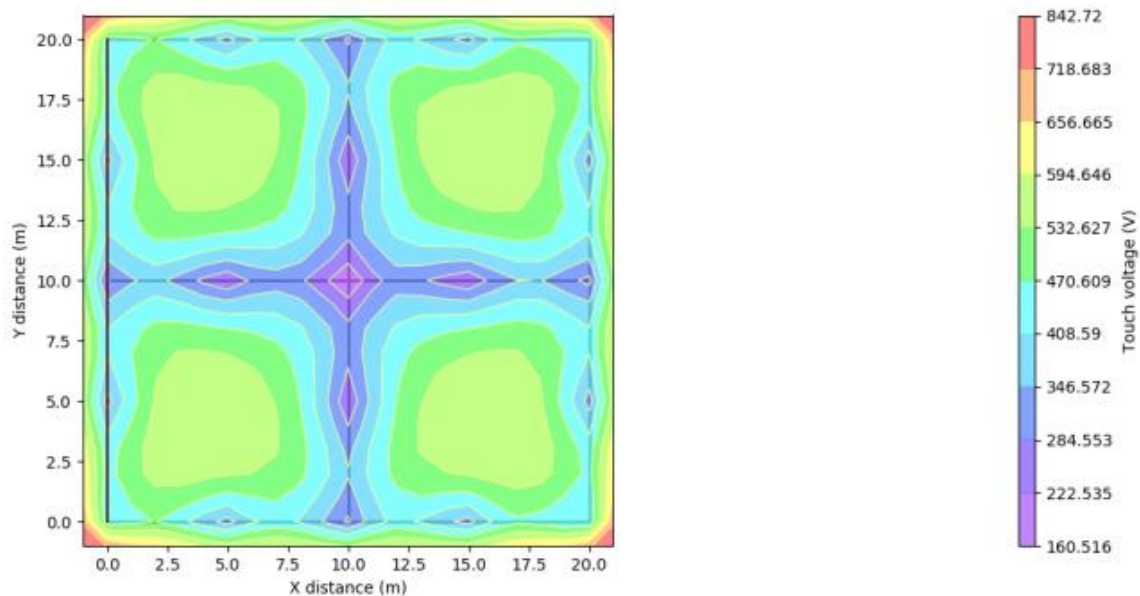
(b) Surface voltages plot of example system

Figuur 31: voorbeeld aardingsnet (a) en voorbeeld spanningsplot (b) [21, p. 2]

Figuur 32 toont dat in het midden van de mazen potentiaaldips optreden. Dit betekent dat een persoon die in het midden van een raster staat en in contact komt met een geleidend voorwerp, dat is aangesloten op het aardingsysteem, zal worden onderworpen aan die verschilspanning tussen GPR en het midden van de maas. Merk op dat aanraakspanning het verschil in elektrisch potentiaal is tussen het aardingsysteem en elke plaats op het aardoppervlak waar een persoon kan staan terwijl hij in contact komt met een onder spanning staand object (aangenomen dat deze zich op hetzelfde potentiaal bevindt als het aardingsysteem) [22]. Het plot in Figuur 32 toont aanraakspanningen binnen en tot op 1 meter afstand van het net. De maximale aanraakspanningen treden op in de hoeken, wat typisch is voor het ontwerp. Dit wordt veroorzaakt door de verdeling van stromen in het aardingsnet en de geometrie van het netwerk. Bij een aardingsnet stroomt er een bepaalde hoeveelheid stroom door de geleiders, die zich door het netwerk verspreidt. Deze stroomverdeling

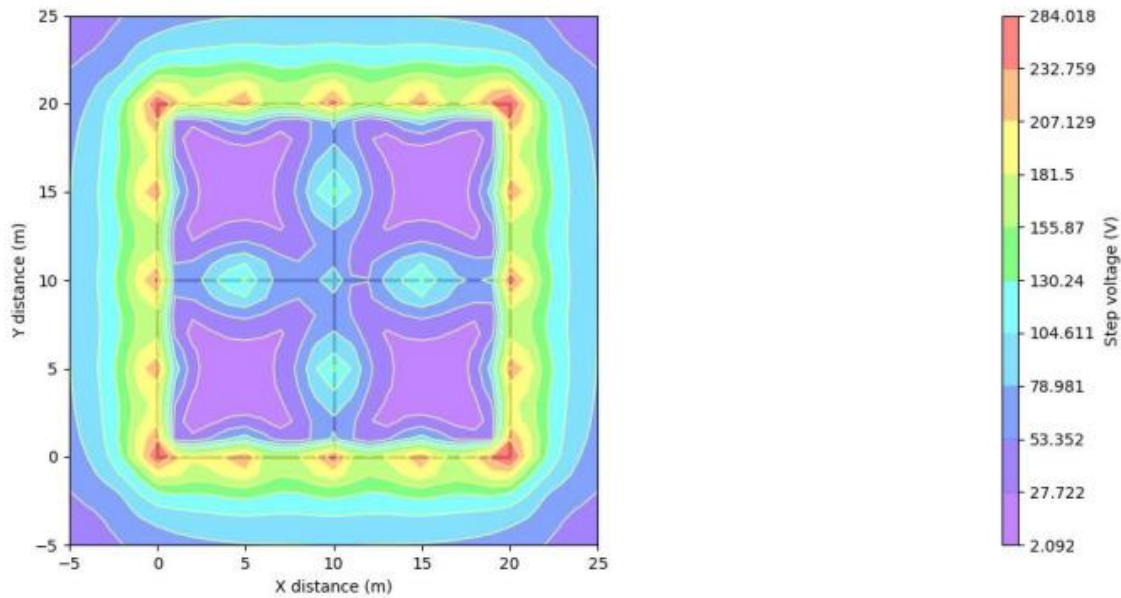
resulteert in een spanningsval over de weerstand van de aardingsgeleiders en de grondweerstand. In de hoeken van het aardingsnet komen verschillende geleiders samen en wordt de stroom verdeeld over verschillende takken van het netwerk. Door deze stroomverdeling kan er een verhoogde spanningsgradiënt ontstaan in de hoeken. Dit betekent dat de spanningsverandering over een kleine afstand in de hoek relatief hoog kan zijn.

Zoals Figuur 32 en Figuur 33 tonen, kan de steile potentiaalgradiënt buiten de omtrek van het aardingsysteem leiden tot een aanzienlijk potentiaalverschil tussen twee aardoppervlak locaties waar de voeten van een persoon zich bevinden. Algemeen wordt aangenomen dat de stap van een persoon niet meer dan 1m zal bedragen en daarom wordt een "stapspanning" gedefinieerd als het potentiaalverschil tussen twee punten op het aardoppervlak die 1m van elkaar verwijderd zijn. Stapspanningen zijn gewoonlijk veel lager dan aanraakspanningen. Daarom kan in het algemeen gesteld worden dat, als veilige aanraakspanningen kunnen worden bereikt voor een ontwerp, dan zouden stapspanningen geen probleem mogen vormen [21]. Let erop dat de schaalverdeling voor de afstand in Figuur 33 verder reikt dan in Figuur 32.



(a) Touch voltages 2D plot of example system

*Figuur 32: Aanraak- en stapspanningen voor een voorbeeld aardingsnet [21, p. 3]*



(b) Step voltages 2D plot of example system

*Figuur 33: : Aanraak- en stapspanningen voor een voorbeeld aardingsnet met steile gradiënt [21, p. 3]*

De aanraak- en stapspanningen zijn, net als bij GPR, recht evenredig met de stroom die in de aarde wordt geïnjecteerd. Bovendien zijn bij een gegeven injectiestroom en een gegeven reeks roosterverhoudingen de aanraak- en stapspanningen recht evenredig met de elektrische weerstand van de aarde [21]. Om de effectiviteit van een aardingsysteem te evalueren, worden de GPR en de aanraak- en stapspanningen die optreden tijdens storingen vergeleken met de maximaal aanvaardbare waarden. Spanningen die optreden tijdens foutcondities worden vergeleken met de maximaal aanvaardbare waarden die ook wel maximaal toelaatbare of aanvaardbare spanningsgrenzen worden genoemd [21]. Deze veilige grenzen worden afgeleid volgens de IEC- en IEEE-standaardmethoden [22].

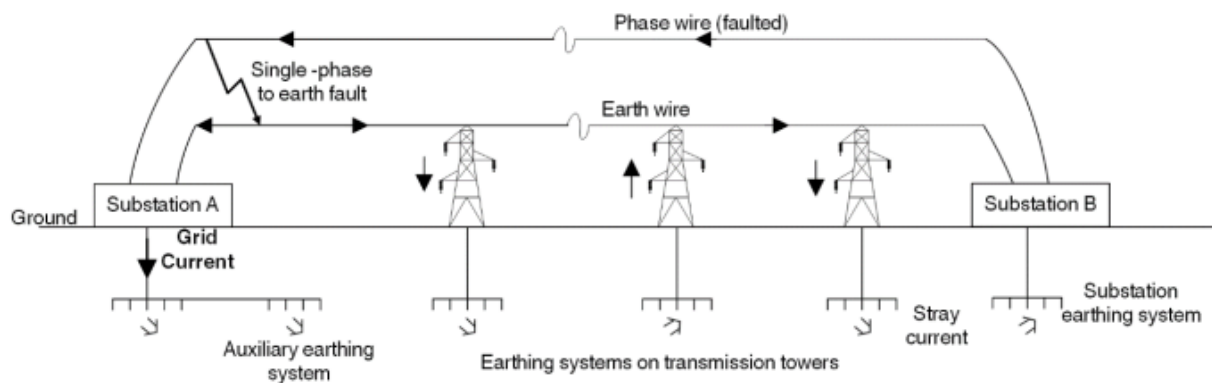
De veilige grenzen worden vergeleken met de werkelijke aanraak- en stapspanningen om te bepalen of het ontwerp veilig is. Er zijn twee belangrijke benaderingen om tot een veilig ontwerp te komen [21]:

- Verminder de werkelijke aanraak- en stapspanningen die op elk punt in het onderstation en de omtrek ervan onder de veilige grenzen liggen. Dit kan o.a. door de grote van de mazen van het aardingsnet aan te passen. Hiermee moet rekening gehouden worden tijdens het ontwerp van het aardingsnet.
- Verhoog de toelaatbare grenzen door een extra laag steenpuin of asfalt op het oppervlak aan te brengen binnen en buiten het onderstation.

## 2.6.2. Invloed van netwerkindenten op externe installaties

### 2.6.2.1. Paden gevolgd door foutstromen

Bij een netwerkindent, zoals een aardfout of "aardlek" (bv. een lijn die afbreekt en op de grond valt of een voorwerp dat contact maakt met een lijn en de grond), in de nabijheid van een substation, kan er een aanzienlijke stroom van de getroffen fasegeleider naar de aarde vloeien als de fout een lage weerstand heeft en de transformator direct geaard is. Deze foutstroom zoekt zijn weg terug naar de bron via alle beschikbare geleidende paden. Figuur 34 toont de mogelijke weg van de foutstromen wanneer er een fout optreedt in de buurt van substation A, die via een bovengrondse transmissielijn verbonden zijn. Substation B is hier de bron. De pijlen geven de richting aan van de foutstroom [21].



Figuur 34: Schematisch diagram voor een aardfout nabij een onderstation [21, p. 5]

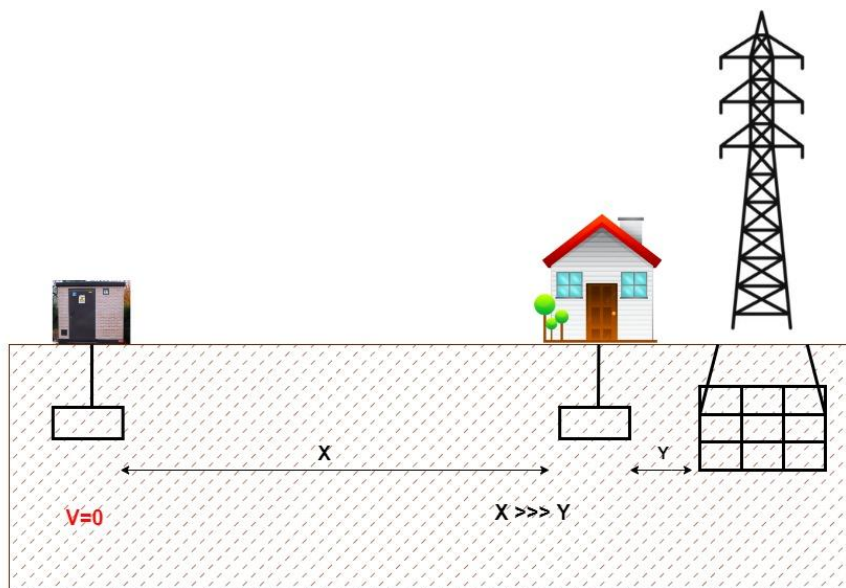
Tijdens een aardsluiting keert de foutstroom terug naar de substation B langs de volgende paden [21]:

- Aardingsdraden: een deel van de foutstroom loopt van de foutlocatie naar de bron volledig via de aarding / waakdraden. Een ander deel van de foutstroom vloeit langs een stuk van de aardingsdraden en wordt vervolgens in de aarde geïnjecteerd via verschillende banen, zoals de aarding van de masten of de aardingsystemen van andere onderstations dan het onderstation dat zich het dichtst bij de fout bevindt.
- Aardingsstelsel van het onderstation: een ander deel van de foutstroom wordt in de aarde geïnjecteerd door het aardingsstelsel van het onderstation in de buurt van de fout. Van daaruit vloeit het door de aarde naar het aardingsstelsel van substation A, vervolgens door het aardingsstelsel van de substation B naar de generator of transformator die de foutstroom levert.
- Hulpaardingsstelsel: als het onderstation een aardingsstelsel heeft naast het stelsel op de locatie van het onderstation, dan wordt een deel van de foutstroom naar dit aanvullende stelsel geleid. Merk op dat het wapeningsstaal in de betonvloer van een gebouw kan worden beschouwd als een hulpaardingsstelsel.

Het deel van de foutstroom dat in het aardingsstelsel van het onderstation wordt geïnjecteerd, wordt gewoonlijk "grid current" genoemd. Die "grid current" zal een verhoging van de potentiaal in het aardingsstelsel veroorzaken. De hoeveelheid foutstroom die langs elke weg zal vloeien, hangt direct af van de relatieve impedanties. Wanneer bijvoorbeeld de aardingsdraden een lage impedantie hebben en geen grote afstand overbruggen tussen het defecte onderstation en de bron. Als gevolg hiervan zullen de aardingsdraden een groter deel van de foutstroom geleiden in vergelijking met de paden met een hoge impedantie. Tevens, als het aardingsstelsel van het onderstation een zeer lage impedantie heeft, dan zal een veel groter deel van de foutstroom geleiden dan wanneer het een hoge impedantie heeft. In de meeste gevallen is de grid current veel kleiner dan de totale foutstroom die door de bron geleverd is. Dit moet blijken uit de ontwerpfase waar men de verdeling van de lekstroom analyseert en , aanvullende informatie over de geleidende paden nodig is [21].

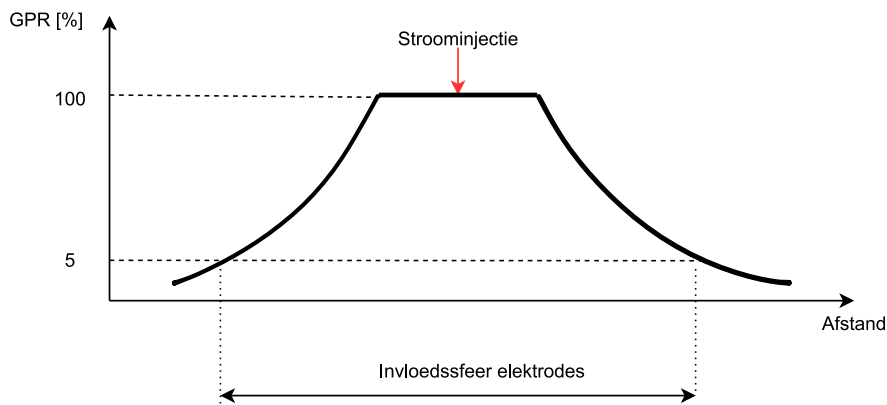
#### 2.6.2.2. Aardingsnetten van pylonen en naburig gelegen huizen

Wanneer een gebouw vlak langs een hoogspanningspyloon staat, bevindt het aardingsnet van dat gebouw zich in de invloedssfeer van het aardingsnet van de pyloon. De invloedssfeer van het aardingsnet is de afstand tot het net waarbij de GPR meer dan 5% van het potentiaal van het net bereikt. Figuur 36 toont de definitie van de invloedssfeer. Figuur 35 toont een woning met aardingslus op een afstand  $Y$  van een HS-mast met een vermaasd aardingsnet. In sommige gevallen wordt de aardelektrode van het huis fysiek gekoppeld met het aardingsnet van de mast. Als ze niet fysiek met elkaar gekoppeld zijn dan kunnen de twee aardingsnetten alsnog elektrisch koppelen. De twee netten met tussenliggende grond vormen een condensator. Bij een hoogfrequente blikseminslag zal de reactantie zodanig afnemen ( $X_c = 1/\omega * C$ ) dat de condensator zal doorslaan en er een elektrische koppeling ontstaat tussen de twee aardingsnetten. De aardelektrode van de distributietransformator van de DNB bevindt zich op een grote afstand  $X$  t.o.v. het huis en de mast. Door de grote afstand is de distributietransformator niet meer in de invloedssfeer van het aardingsnet van de mast en kunnen we spreken van een "verre aarde" op potentiaal 0V.



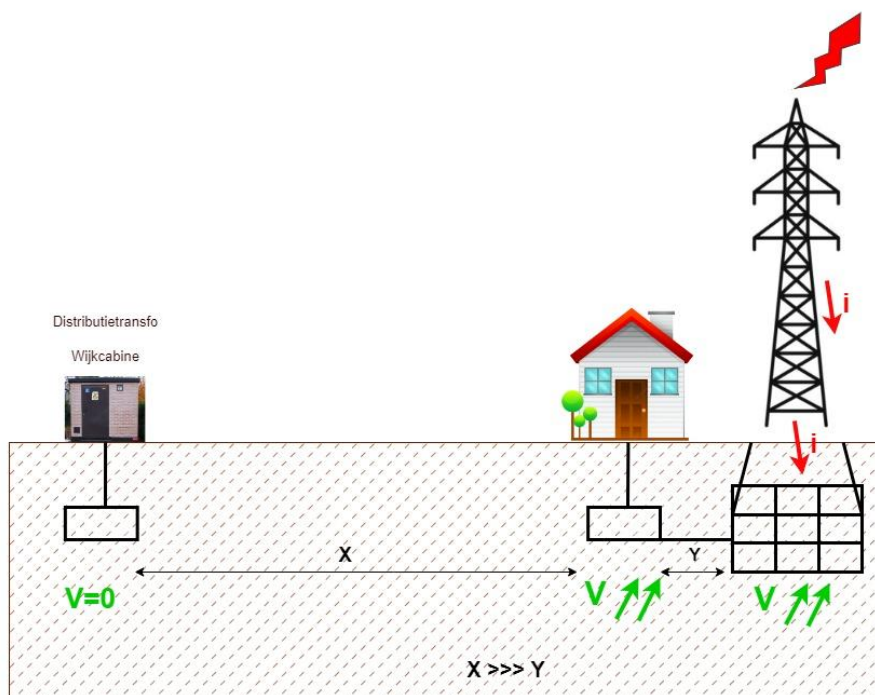
Figuur 35: aarding huis in invloedssfeer van aarding HS-mast





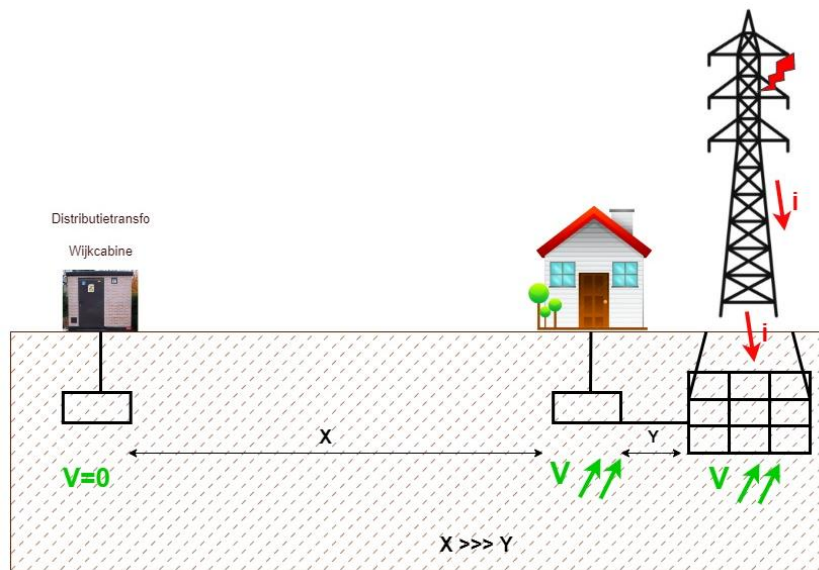
*Figuur 36: Definitie invloedsfeer*

Wanneer er zich een **blikseminslag** voordoet op een pyloon of op de waakdraden zoals getoond in Figuur 37, vloeit de hoogfrequente stroom via de pyloon naar zijn aardingsnet. Een stroom en een weerstand veroorzaakt een spanning op het aardingsnet. Doordat de twee netten fysiek of elektrisch met elkaar gekoppeld zijn, zal het potentiaal op de aarding van het gebouw ook naastliggend stijgen. Het potentiaal van het aardingsnet van de distributietransformator blijft 0 V (=verre aarde). Bij hoogfrequente transiënten, zoals blikseminslagen is de impedantie van de aarding vooral inductief ( $R < X_L = j\omega * f$ ) en over een kort stuk geleider komt er veel spanningsval te staan door de hoge impedantie. Voor hoge frequenties is het verbinden van de twee aardingsnetten vaak nutteloos tenzij de verbindingen zeer korte kabellengtes betekenen. Niet verbinden is daarentegen een capaciteit en die krijgt dan weer een zeer lage impedantie omdat  $X_c = 1 / (C * j\omega)$  dus die isolatie zal wellicht doorslaan bij bliksem of transiënten.



*Figuur 37: stroom en potentiaalverhoging aarding t.g.v. blikseminslag op HS-mast*

Figuur 38 toont een **enkelfasige kortsluiting** van de bovenste lijn met de mast. Hetzelfde gebeurt hier als bij de blikseminslag. De foutstroom vloeit naar het aardingsnet via de pyloon en zet het aardingsnet van de pyloon en het gebouw op een verhoogd potentiaal. Merk wel op dat de foutstromen in dit geval laag frequentie transiënten zijn (50Hz en enkele harmonischen), hierdoor gedraagt het aardingsnet zich minder inductief ( $X_L = j\omega \cdot f$ ). De tijd van een kortsluiting is over het algemeen groter dan de tijd van een blikseminslag. Dit zorgt ervoor dat er meer energie wordt overgedragen naar de aarde in vergelijking met een blikseminslag. De maximale tijd van de foutstroom is beperkt tot 150ms bij normale werking van het beveiligingssysteem. Binnen deze tijd nemen de overstroombeveiligingen de foutstroom waar en schakelen deze uit.



*Figuur 38: Foutstroom en potentiaalverhoging aarding t.g.v. één fase kortsluiting*

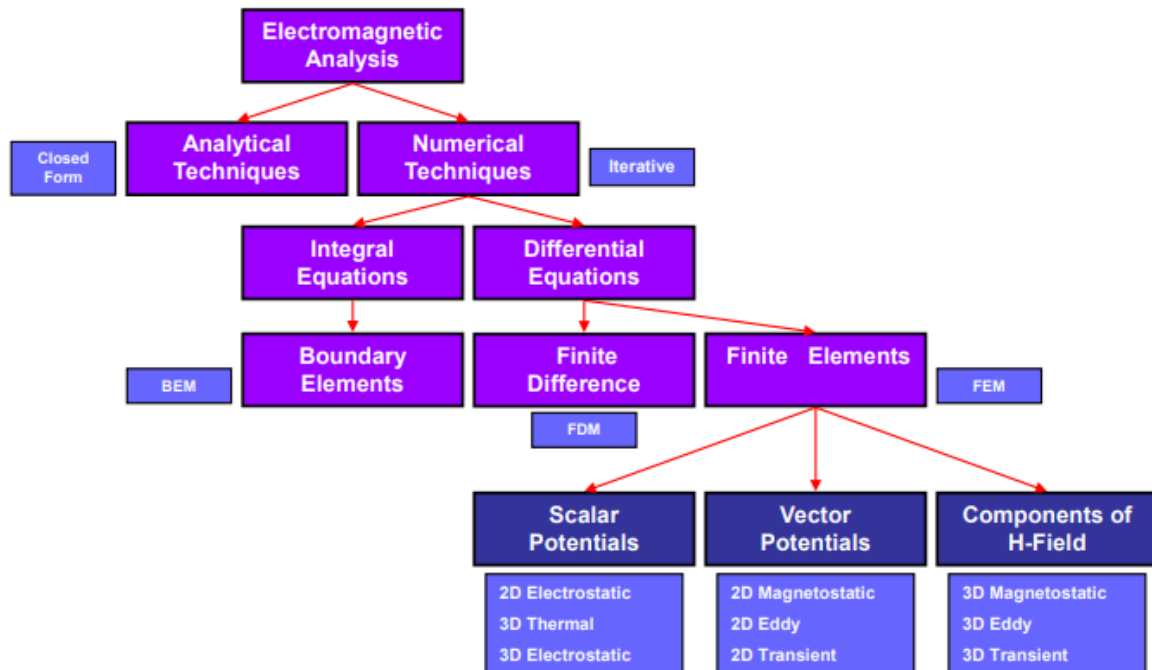
In beide gevallen heeft de aarding van het huis dus een potentiaal gerelateerd aan de potentiaal van de aarding van de pyloon en dat is een ander potentiaal dan de aarding van de transformator in de cabine (distributietransformator). Alle fasen van de voedingskabels in het huis hebben een potentiaal gerelateerd aan de aarding van de cabine (verre aarde 0 V). Doordat er nu een hoog potentiaalverschil ontstaat tussen de het koper van de fasen en het koper van de PE geleider (door een netwerkincident op het HS-net) ontstaat er diëlektrische stress van mogelijks meerdere duizenden volt tussen de lijndraden en aarding of tussen neuter en aarding in huis. Dit moet voorkomen worden door een kortstondige verbinding tussen de actieve geleiders en de aarde m.b.v. van bliksembeveiligingsapparatuur. Belangrijk is dat in en rond het huis de stap- en contactspanningen binnen de veilige grenzen blijven, deze grenzen zijn beschreven in het AREI.



### 3. Simulaties

#### 3.1. EM-analysetechnieken

Figuur 39 toont de verschillende methodes voor het uitvoeren van ruimtelijke elektromagnetische analyses.



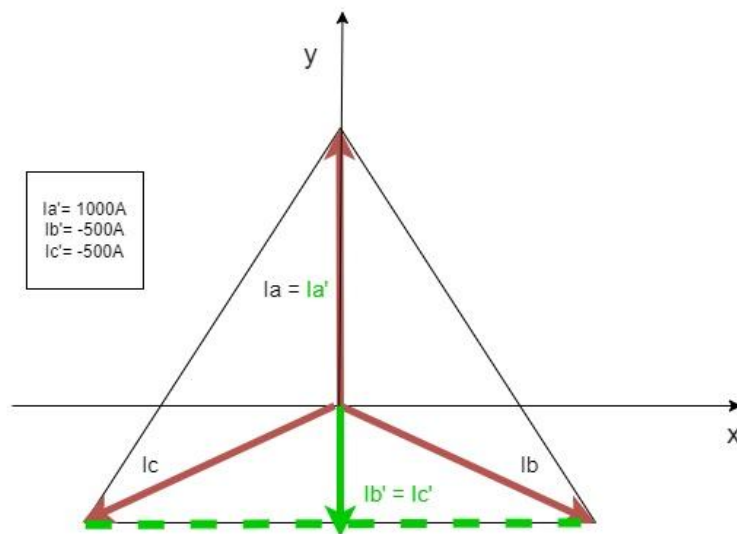
Figuur 39: Verschillende methodes voor elektromagnetische analyses [23]

Voor het simuleren van inductieve en capacatieve koppeling wordt in deze thesis gebruikgemaakt van een eindige elementensoftware, oftewel FEM (Finite Element Methode). De eindige elementenmethode is een rekenmethode waarmee partiële differentiaalvergelijkingen en integraalvergelijkingen benaderend kunnen worden opgelost. In deze methode wordt een constructie of medium opgedeeld in een (eindig) aantal elementen en koppelt deze elementen aan elkaar door middel van knooppunten (nodes). Aan deze koppelingen wordt, afhankelijk van het soort element, een aantal eisen (randvoorwaarden) gesteld. Het bepalen van de knooppunten en koppelingen komt overeen met het bepalen van een rooster (mesh) [24]. Er is gekozen om het softwarepakket MAXWELL 2D van ANSYS te gebruiken. Voor de conductieve geleiding doen we beroep op BEM (Boundary Element Methode). De grens-elementenmethode (BEM) is een numerieke rekenmethode voor het oplossen van lineaire partiële differentiaalvergelijkingen die geformuleerd zijn als integraalvergelijkingen. In deze techniek stellen we randvoorwaarden op aan de gemaakte grenzen (boundaries). Binnen deze grenzen wordt het materiaal als homogeen beschouwd hierdoor vereenvoudigen de partiële differentiaal vergelijkingen sterk en gelden lineaire integraalvergelijkingen. In onderstaande tabel 1 een vergelijking tussen FEM en BEM.

### 3.2. Inductieve koppeling

In dit subhoofdstuk simuleren we de inductieve koppeling aan de hand van FEM. Hierdoor krijgen we betere inzichten voor later onderbouwde maatregelen te kunnen formuleren.

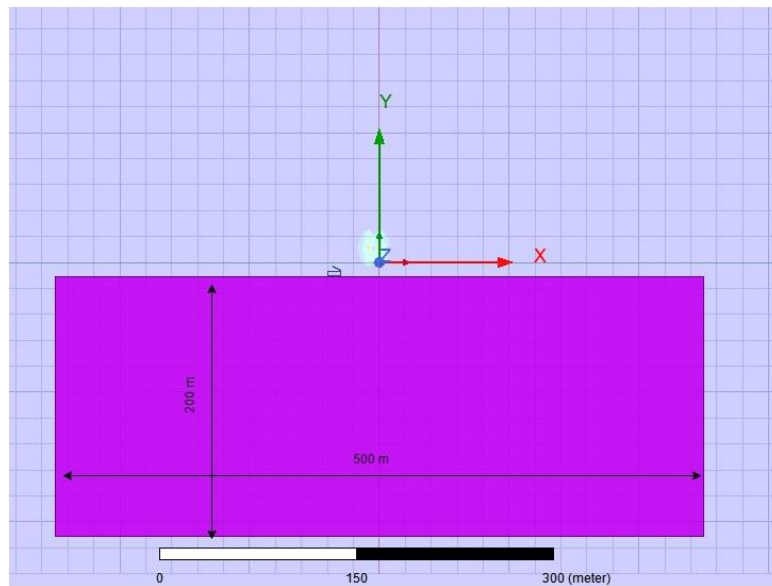
De inductieve koppeling wordt veroorzaakt door het magnetisch veld van de hoogspanningslijnen. Het is een wisselend veld waarvan de grootte evenredig is met de stroom die door de geleiders vloeit en de zin afhankelijk is van de stroomrichting. De simulaties worden uitgevoerd voor een hoogspanningslijn van 380 kV met twee draadstellen, bestaande uit 3 aluminium lijndraden. De fasoren en ogenblikkelijke waarden de stromen van het drie fasen systeem worden voorgesteld in onderstaande Figuur 40. Er wordt verondersteld dat in de twee draadstellen de amplitude en de fasevolgorde van de stromen hetzelfde zijn. De diameter van de fasegeleiders is 3 cm. De afstanden van de onderlinge geleiders en van de geleiders tot op de grond worden voorgesteld in Figuur 42.



Figuur 40: 3 fasen stromen op  $t=0$

De aarde wordt gedefinieerd als een homogene blok. De dimensies van de grond in de FEM moeten beduidend groter zijn dan de afmetingen van de pyloon om de interactie met de omgeving goed te modelleren, randeffecten te verminderen en de stabiliteit en betrouwbaarheid van de simulatie te waarborgen. Daarom zijn de afmetingen van  $L = 500$  m en  $H = 500$  m gekozen. De eigenschappen zijn:

- Geleidbaarheid:  $\sigma = 0,01$  S/m (dit komt overeen met een gemiddelde soortelijke grondresistiviteit  $\rho = 100$  Ohm.m)
- Relatieve permeabiliteit:  $\mu_r = 1$
- Potentiaal:  $V = 0$  V



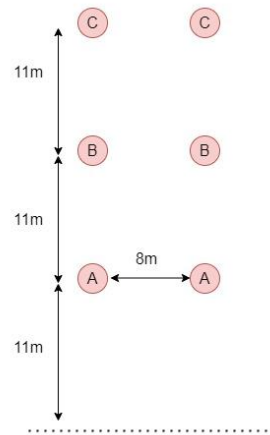
*Figuur 41: definitie grond*

De onderstaande stappen moeten steeds doorlopen (in respectievelijke volgorde) worden bij het doorvoeren van een FEM simulatie:

- Modelling van het object: het geometrisch model van het object moet worden opgedeeld in kleinere elementen om een vermazing “mesh” te creëren.
- Definiëren van het magnetisch veld: het magnetisch veld waaraan een object wordt blootgesteld, wordt gedefinieerd door o.a. de stroomsterkte per fasegeleider, richting en fasehoek.
- Materialen & eigenschappen: de magnetische eigenschappen, zoals permeabiliteit, van alle materialen (lucht, metaal, aluminium, ...) moet gedefinieerd worden.
- Simulatie: de software voert de berekeningen uit en berekent de interactie tussen het magnetisch veld en het object.
- Resultaten: na het voltooien van de simulatie worden de resultaten geanalyseerd. Dit kan door het visualiseren en kwantificeren van het magnetische veld in en rond het object. Met deze waarden kunnen we aan de slag gaan voor het analyseren van de effecten ervan op het object.

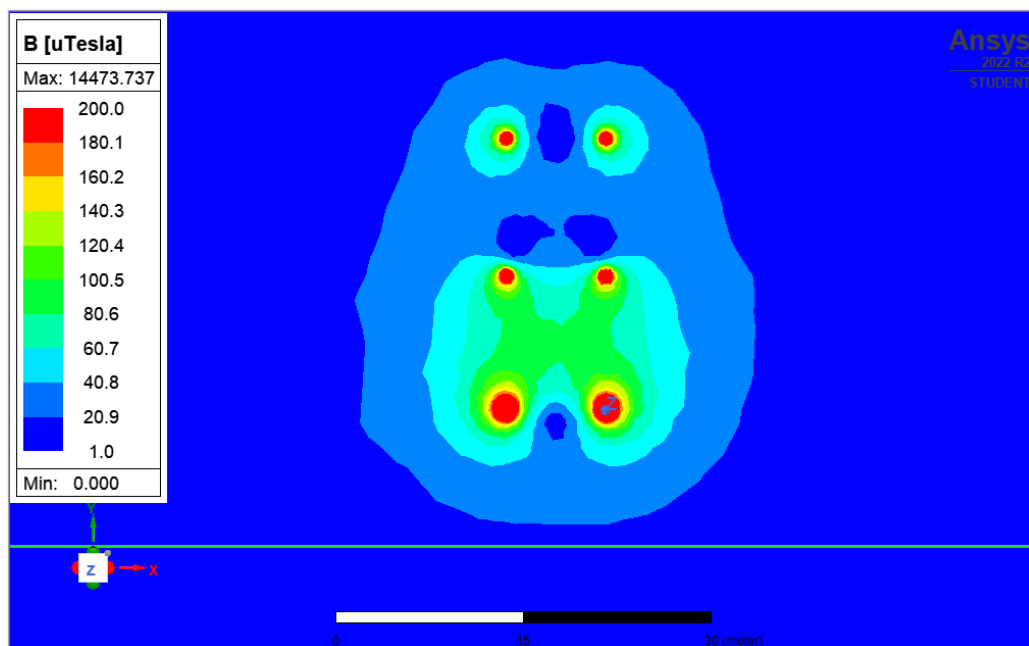
### 3.2.1. ABCCBA faseconfiguratie

Figuur 42 toont een doorsnede van de geleiders met faseconfiguratie ABCCBA (deze configuraties worden klokwijs gelezen). De waakdraden / bliksemafleiders zijn niet in rekening genomen. Ze zullen de effecten van de EM-velden onder of langs lijnen maar heel weinig tot niet beïnvloeden, omdat de stroom hierdoor minstens 50 à 100 keer kleiner en dus verwaarloosbaar is.



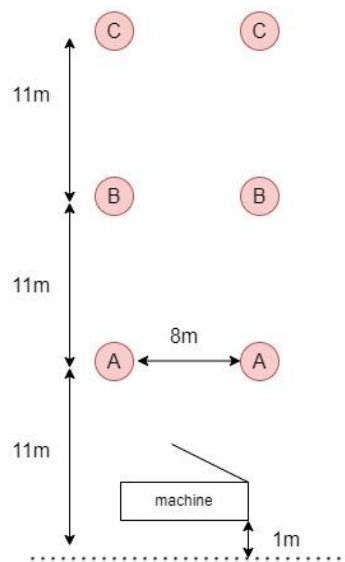
Figuur 42: dwarsdoorsnede van HS-verbinding met 2 draadstellen ABCCBA faseconfiguratie

Figuur 43 toont de magnetisch fluxdichtheid of magnetische inductie rond de geleiders. De magnetische fluxdichtheid  $B$ , uitgedrukt in Tesla, is het hoogst bij de geleiders met de grootste stroomsterkte. Bij deze geleiders liggen de veldlijnen dicht bij elkaar. De veldlijnen afkomstig van de onderste geleiders (fase A) interageren met de veldlijnen van fase B en vormen zo samen 1 veld.

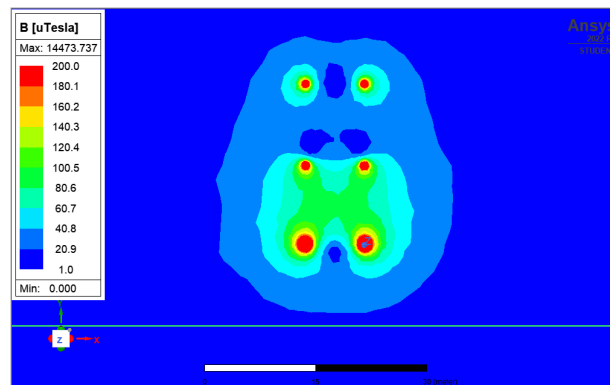
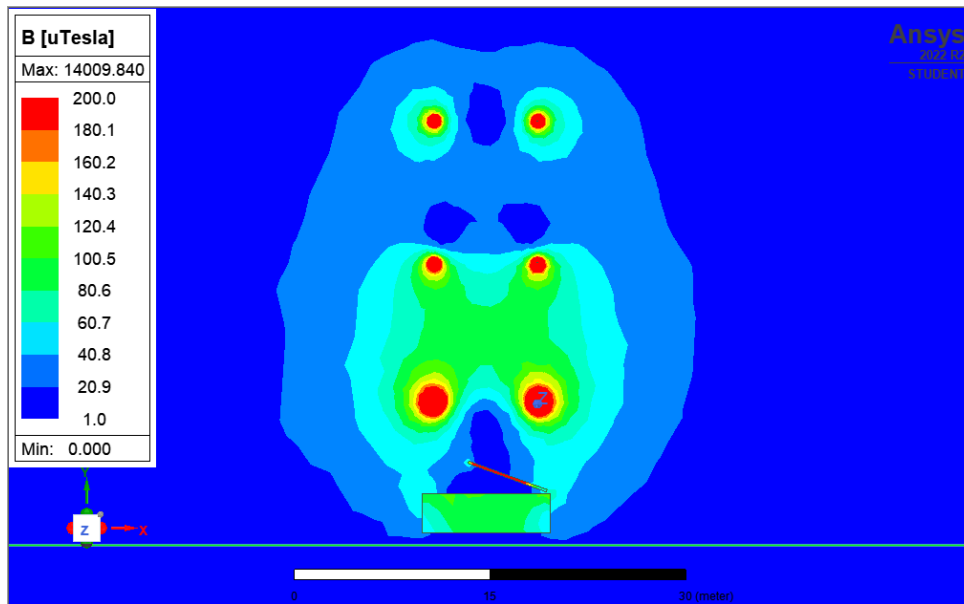


Figuur 43: Simulatie magnetisch veld ABCCBA faseconfiguratie

Figuur 45 toont de magnetische fluxdichtheid onder en langs de geleiders wanneer een object zich in die zone bevindt. In deze simulatie veronderstellen we een machine met een hefarm. Figuur 44 toont de afstanden van de machine t.o.v. de geleiders en de grond. Figuur 45 toont dat het magnetisch veld ongeveer  $\pm 90 \mu\text{T}$  bedraagt onder de lijnen. We merken op dat boven en onder de arm van de machine een verzwakking is van magnetische veld. Door het inductie-effect zullen er in het metaal van de machine wervelstromen ontstaan, als het gevolg van een geïnduceerde spanning, die op hun beurt een magnetisch veld opwekken. Dit veld wordt gezien als tegenwerkend aan het magnetisch veld afkomstig van de hoogspanningslijnen. Door deze tegenwerking is de som van magnetische fluxdichtheid lokaal beduidend lager ( $\pm 10 \mu\text{T}$ ) en ontstaat er een afscherming voor wat zich onder de hefarm bevindt. De afscherming is het grootste op de plaats waar in de hefarm de grootste wervelstromen vloeien (rood). Dit is het principe van afscherming tegen EM-velden of EMC-afscherming “shielding”. In de afscherming moet altijd een stroom kunnen vloeien, zodat er een magnetisch veld ontstaat die het hoofd-magnetisch veld tegenwerkt.



*Figuur 44: dwarsdoorsnede van HS-verbinding met 2 draadstellen ABCCBA faseconfiguratie met machine*

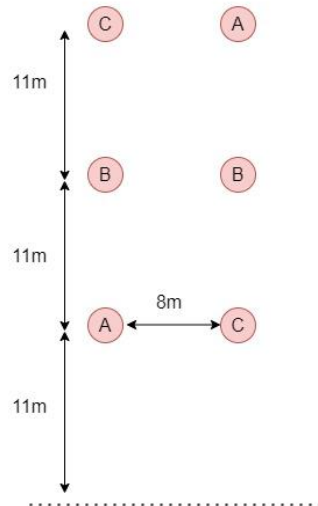


Figuur 45: Simulatie fluxdichtheid met machine midden

Het modelleren van een machine onder een hoogspanningslijn als twee metalen blokken is niet ideaal. Doordat we in een 2D-simulatie werken, kan de software geen onderscheid maken tussen een smal object en een lange plaat in de Z-richting. Hetzelfde geldt voor de hefarm. Deze twee worden gezien als metalen blokken of platen die volgens de z-as oneindig lang zijn terwijl in de praktijk deze een beperkte dikte hebben in de Z-richting. In realiteit zal er dus een kleinere afscherming zijn dan in de simulaties.

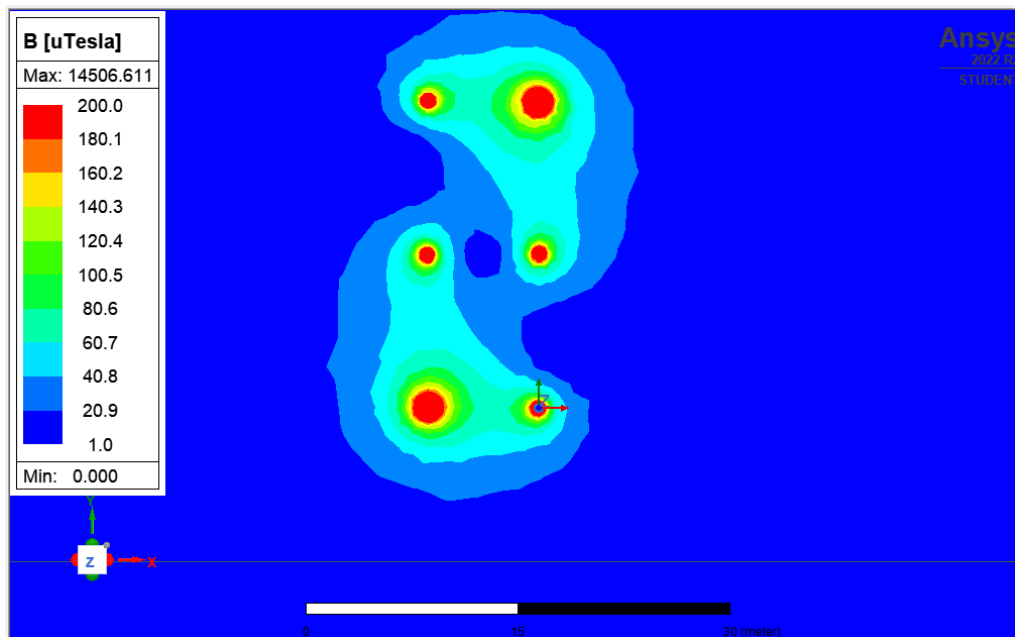
### 3.2.2. ABCABC faseconfiguratie

Figuur 46 toont een doorsnede van de geleiders met faseconfiguratie ABCCBA (klokwijz gelezen). De waakdraden / bliksemafleiders worden ook hier niet in rekening genomen omdat ze de effecten van de EM-velden niet zullen beïnvloeden op onder of langs lijnen.



*Figuur 46: dwarsdoorsnede geleiders ABCABC faseconfiguratie*

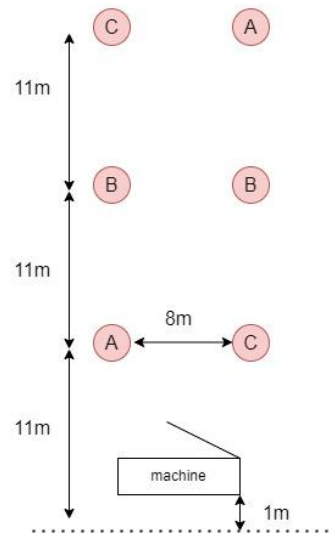
Figuur 47 toont de simulatie van magnetische fluxdichtheid voor een ABCABC faseconfiguratie. De magnetische velden van de geleiders met de grootste stroom zullen zich koppelen met de velden van de omliggende geleiders. Doordat in deze configuratie de twee geleiders met de grootste stroom (1000 A) niet onderaan op gelijke hoogte hangen, wordt er een kleiner magnetisch veld gevormd onder de lijnen dan bij de ABCCBA faseconfiguratie.



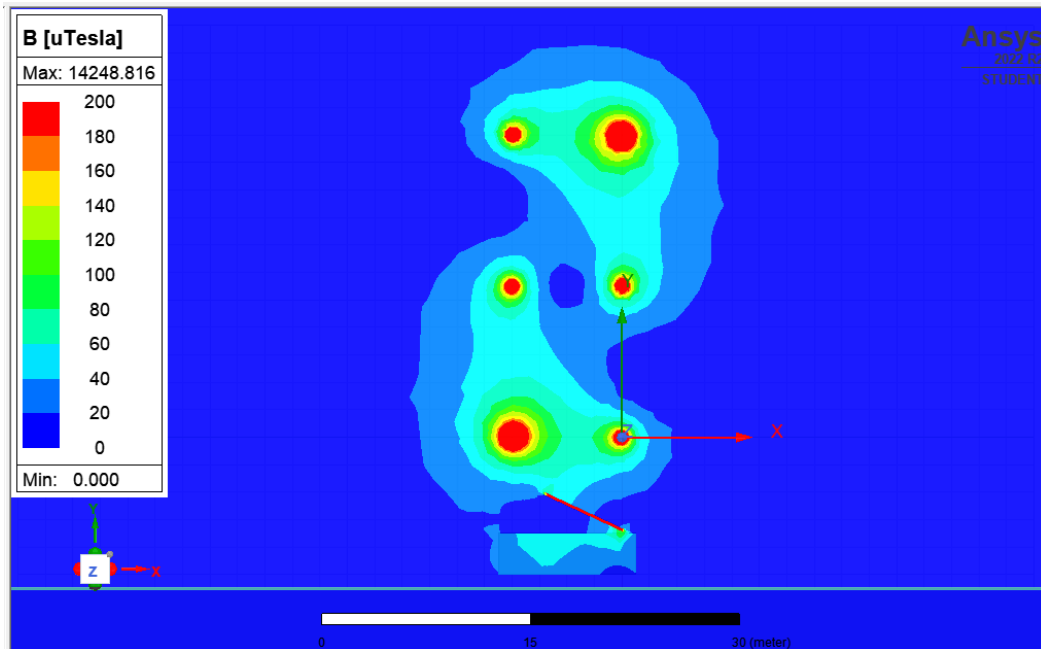
*Figuur 47: Simulatie van magnetische fluxdichtheid voor een ABCABC faseconfiguratie*

Figuur 48 toont de dwarsdoorsnede van de geleiders en de machine met de afstanden t.o.v. elkaar en de grond bij een ABCABC faseconfiguratie. Figuur 49 en Figuur 50 tonen dat het magnetisch veld op de machine kleiner is dan bij de ABCCBA faseconfiguratie. De afscherming onder de hefarm is er nog steeds. We kunnen dus een gebied creëren waar het magnetische veld lager is door gebruik te maken van een afscherming. Deze afscherming bestaat hier uit een metalen object (arm) waarin de wervelstromen, als gevolg van de geïnduceerde spanningen, een magnetisch veld opwekken dat

tegenwerkt aan het magnetische veld van de hoogspanningsgeleiders. Hierdoor wordt het magnetische veld verminderd in dat specifieke gebied. Merk wel op dat als men machine volledig zou willen afschermen, de afscherming de volledige machine moet omsluiten. In deze afscherming moet de wervelstromen kunnen vloeien.

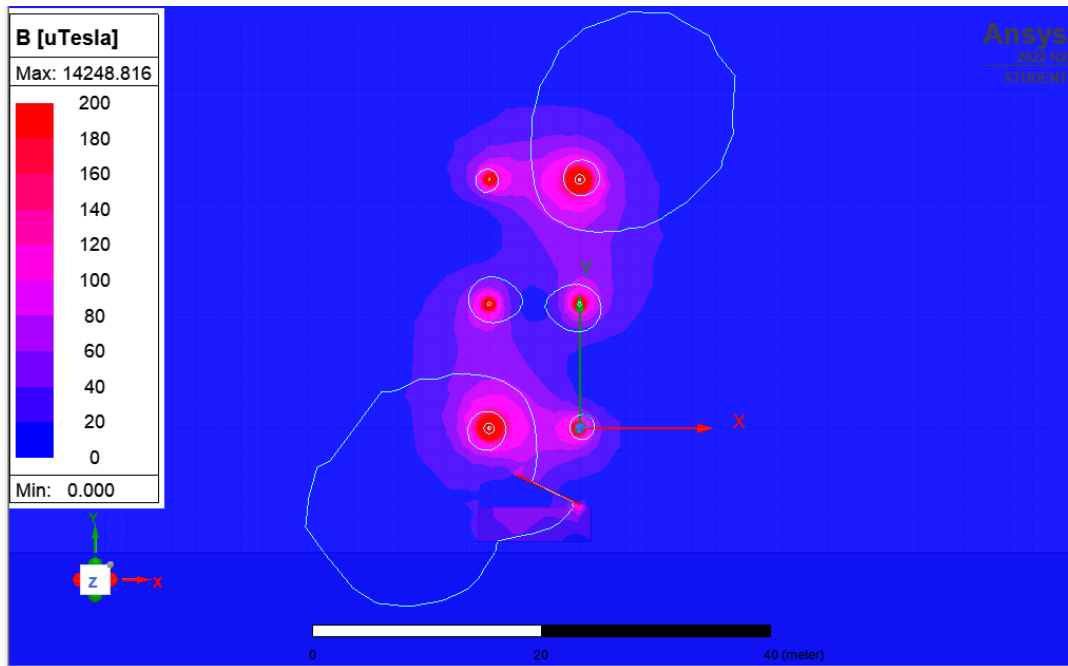


*Figuur 48: dwarsdoorsnede geleiders ABCABC faseconfiguratie met machine*



*Figuur 49: Simulatie van magnetische fluxdichtheid voor een ABCABC faseconfiguratie met machine*

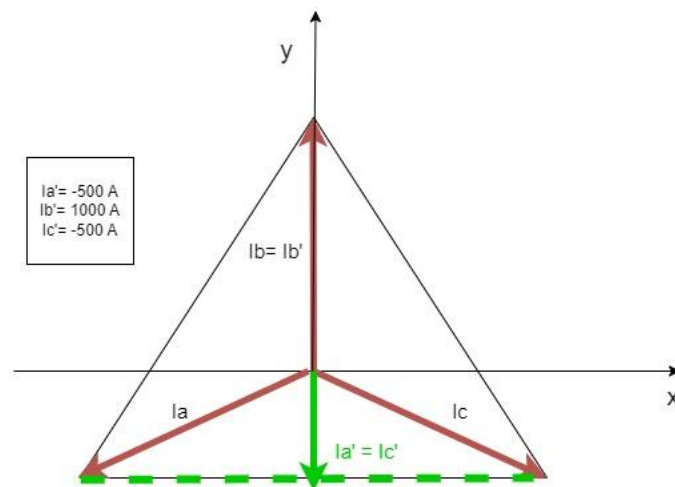




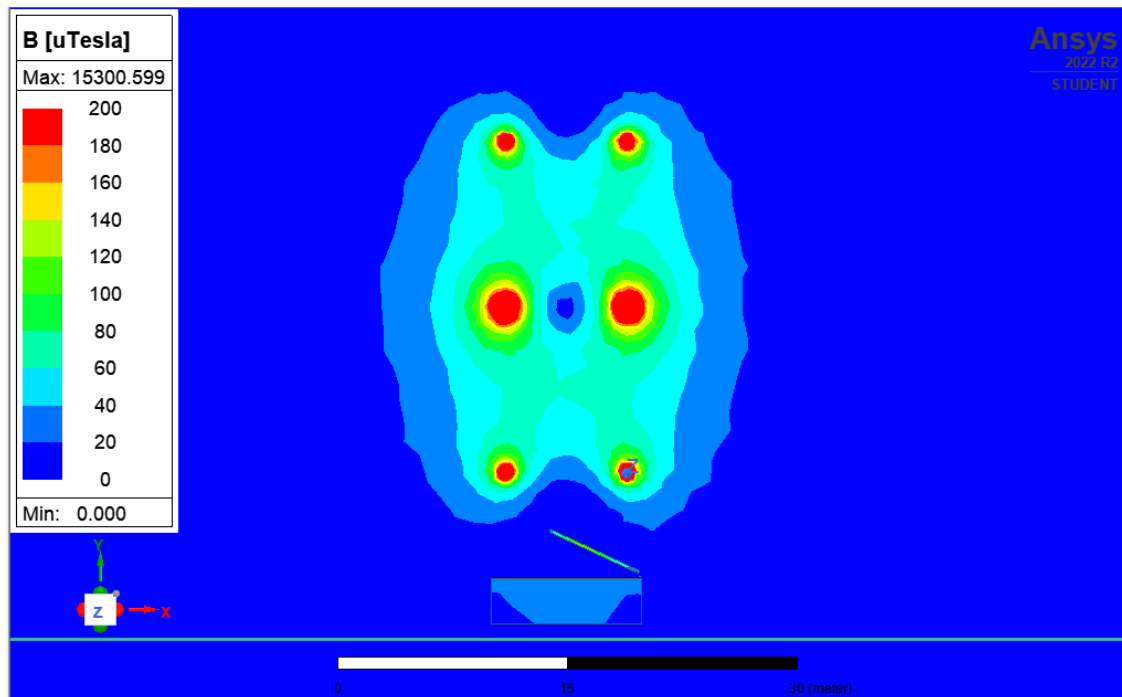
Figuur 50: Simulatie van magnetische fluxdichtheid en fluxlijnen voor een ABCABC faseconfiguratie met machine

### 3.2.3. Invloed van fasehoek op magnetisch veld

De stromen door de lijnen variëren voortdurend in amplitude en in hoek. In vorige configuraties veronderstelde we telkens dat minstens een van de onderste lijnen maximaal belast werd. Hierdoor krijgen we de “worst case scenario’s”, namelijk de momenten waar het magnetisch veld aan de grond het grootst is. We nemen nu een ander moment in de tijd waar de middelste fase (lijn B) het zwaarst belast wordt zoals voorgesteld op Figuur 51. Figuur 52 toont dat het magnetisch veld aan de grond kleiner is dan een moment waarbij een onderste lijn maximaal belast wordt. Het gemiddeld magnetisch veld aan de grond zal over de tijd variëren tussen dit minimum aan het maximum van Figuur 45.



Figuur 51: 3 fasen stromen op t=1



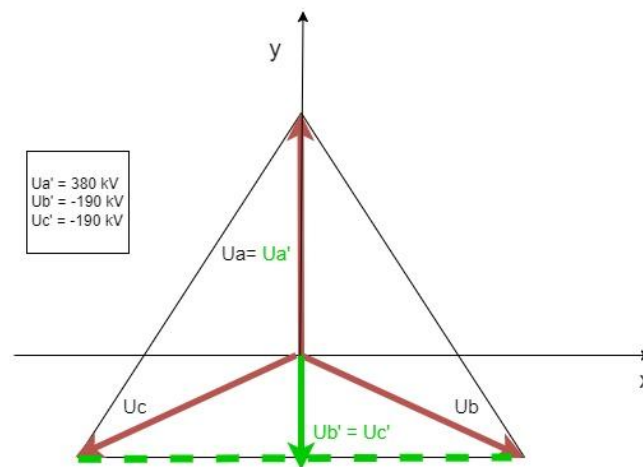
Figuur 52: Simulatie van magnetisch veld bij nieuwe fasehoeken

#### 3.2.4. Conclusie FEM inductieve koppeling

De software die gebruikt werd, legt verschillende beperkingen op. Omdat we in de simulatie werken met een momentopname, kunnen we geen RMS waarden van het magnetisch veld tonen. Dit maakt dat we een onder- of overschatting maken van de situatie in de praktijk. In deze software moeten de parameters voor iedere configuratie opnieuw handmatig ingesteld worden. Hierdoor kunnen we geen reeks oplossingen aanbieden. Dit zou wel mogelijk zijn met andere, dure softwarepakketten. Bij de simulaties met de machines worden deze objecten gezien als platen die in de Z-richting doorlopen. Dit veroorzaakt een grotere afscherming van magnetisch veld onder de hefarm. In de realiteit zal een kleiner deel afgeschermd worden door de beperkte breedte van de arm. De faseconfiguratie en fasehoek zijn duidelijk doorslaggevende parameters voor het beperken van het magnetisch veld aan de grond. Dit wordt bevestigd in de literatuurstudie. Het is belangrijk op te merken dat de simulaties toch/desondanks een waardevol hulpmiddel zijn gebleken om inzicht te krijgen in de effecten van inductieve koppeling en om mogelijke oplossingen te onderzoeken. Ze bieden de mogelijkheid om verschillende scenario's te analyseren en de impact van verschillende parameters te evalueren voordat daadwerkelijke implementaties plaatsvinden.

### 3.3. Capacitieve koppeling

Capacitieve koppeling wordt veroorzaakt door het elektrisch veld dat afkomstig is van de hoogspanningsgeleiders. Het elektrisch veld is een dynamisch veld dat evenredig is met de spanning van de hoogspanningsgeleiders. De simulaties werden uitgevoerd voor een hoogspanningsverbinding van 380 kV met twee draadstellen bestaande uit aluminium lijndraden. Figuur 53 toont de fasoren en ogenblikkelijke waarden van het drie fasen systeem op een momentopname  $t=0$ . Er wordt verondersteld dat de volgorde van de fasen in de tijd en amplitude van de overeenkomstige lijnspanningen van de twee draadstellen hetzelfde zijn. De diameter van de fasegeleiders is 3cm. De afstanden tussen de onderlinge geleiders en van de geleiders tot op de grond worden voorgesteld in Figuur 54.



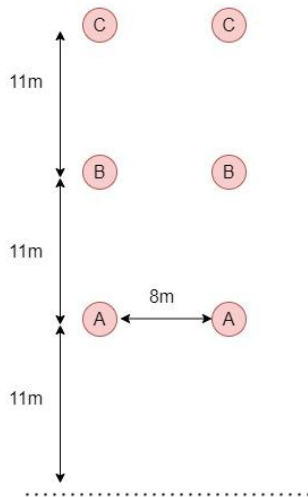
Figuur 53: 3 fasen spanningen

De grond is gedefinieerd als een oneindig groot homogeen blok op potentiaal 0 V zoals in Figuur 41 weergegeven. Ook bij de capacitieve koppeling moeten onderstaande stappen steeds doorlopen (in respectievelijke volgorde) worden bij het uitvoeren van een FEM simulatie:

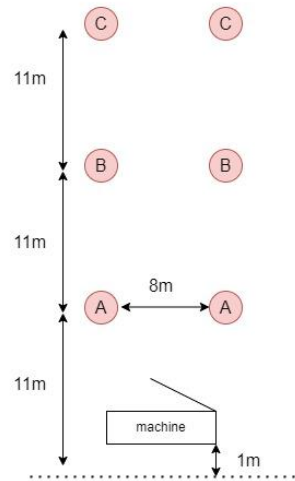
- Modelling van het object: het geometrisch model van het object moet worden opgedeeld in kleinere elementen om een mesh te creëren.
- Definiëren van het elektrisch veld: het elektrisch veld waaraan een object wordt blootgesteld, wordt gedefinieerd door o.a. de spanning per fasegeleider en zijn fasehoek.
- Materialen & eigenschappen: de elektrische eigenschappen, zoals permittiviteit, van alle materialen (lucht, metaal, aluminium, ...) moet gedefinieerd worden.
- Simulatie: de software voert de berekeningen uit en berekent de interactie tussen het elektrisch veld en het object.
- Resultaten: na het voltooien van de simulatie worden de resultaten geanalyseerd. Dit kan het visualiseren van het elektrisch veld rond het object omvatten, evenals het kwantificeren van de capacitieve koppeling en het analyseren van de effecten ervan op het object

### 3.3.1. ABCCBA faseconfiguratie

In de simulaties werden de spanningen  $U_a'$ ,  $U_b'$  en  $U_c'$  gebruikt. Figuur 54 toont de afstanden tussen de geleiders onderling en Figuur 55 tussen de geleiders en de machine. Figuur 57 toont de simulatie van het elektrisch veld. De elektrische veldlijnen staan loodrecht op de 2 geleidende “vlakken” (lijn en grond) en nemen af in de richting van afname van het elektrische potentiaal. Waar bij het magnetisch veld de veldlijnen cirkelvormig waren, zijn ze bij het elektrische veld rechtlijnig. In tegenstelling tot de magnetische veldlijnen snijden de elektrische veldlijnen de grond niet doordat deze fungeert als oneindig grote geleider waarbinnen geen elektrische veldlijnen bestaan.

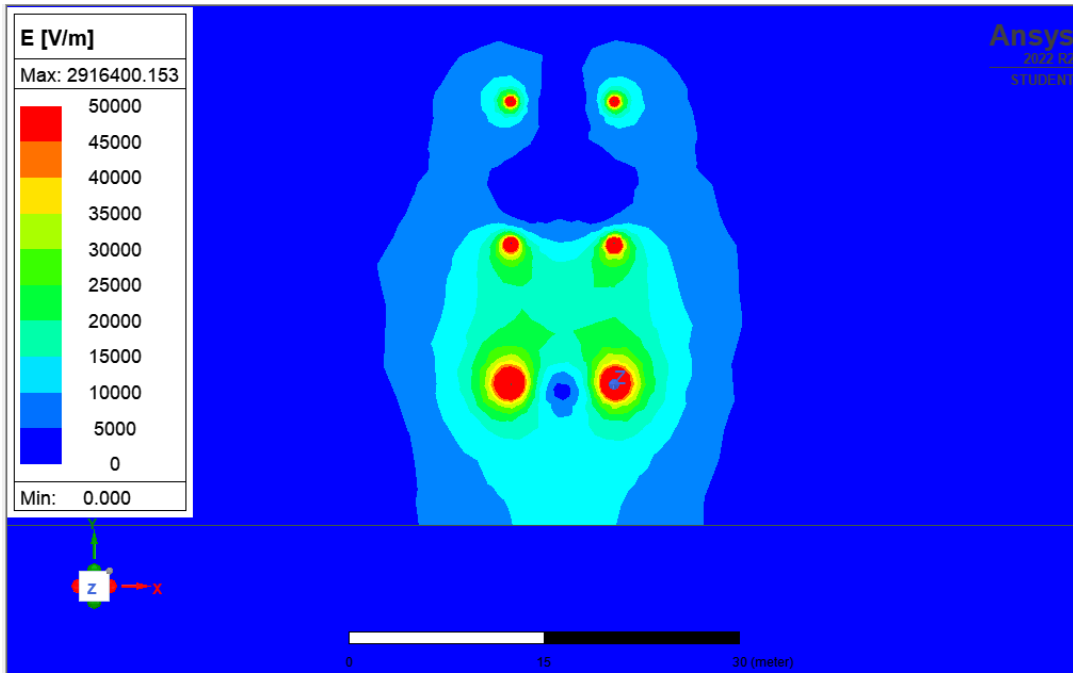


Figuur 54: dwarsdoorsnede

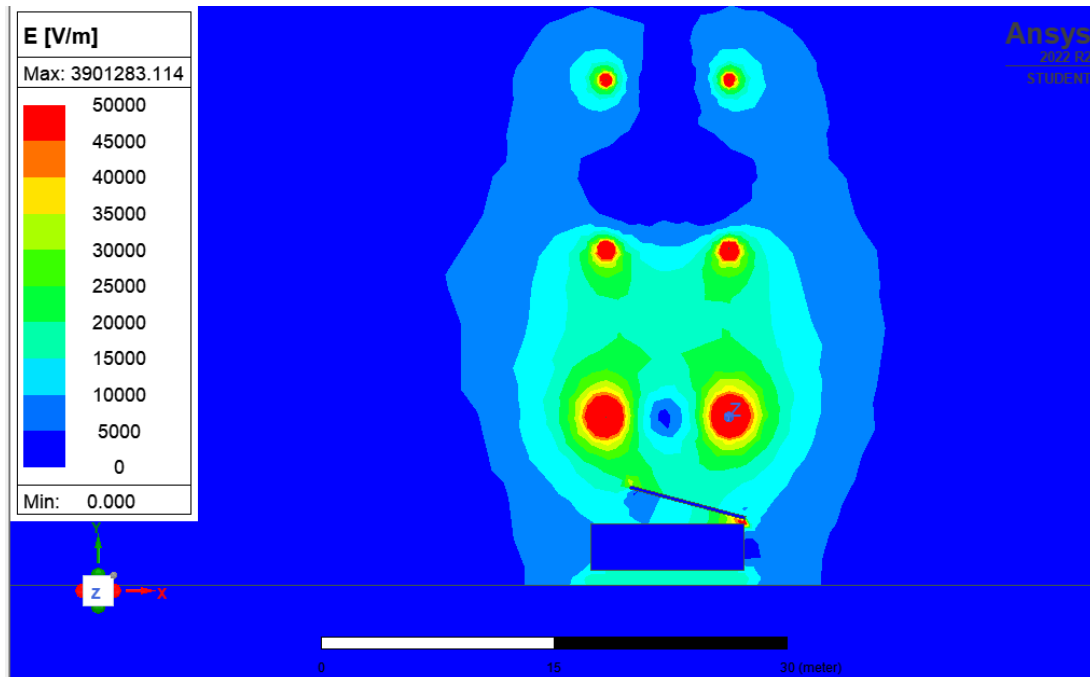


Figuur 55: dwarsdoorsnede ABCCBA configuratie met machine

Figuur 56 toont dat de elektrische veldlijnen de machine volledig omsluiten en niet doordringen. De bestuurder van de machine zal aan de binnenzijde geen effecten waarnemen en zit volledig veilig. Dit effect noemt men ook “de kooi van Faraday”. Als een persoon de machine langs de buitenzijde zou aanraken, kan er wel een stroom vloeien naar de aarde via de persoon en de machine. De machine kan gezien worden als een elektrische weerstand in een elektrisch schema. Zie literatuurstudie hoofdstuk 2.5 Figuur 24.



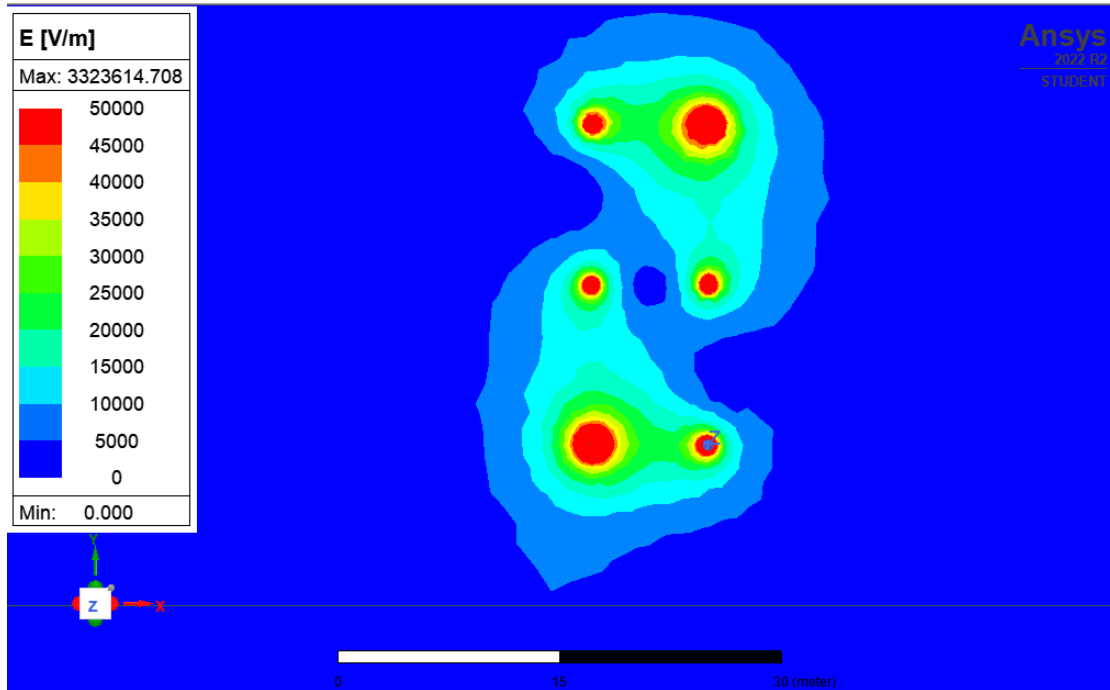
*Figuur 56: Simulatie elektrisch veld*



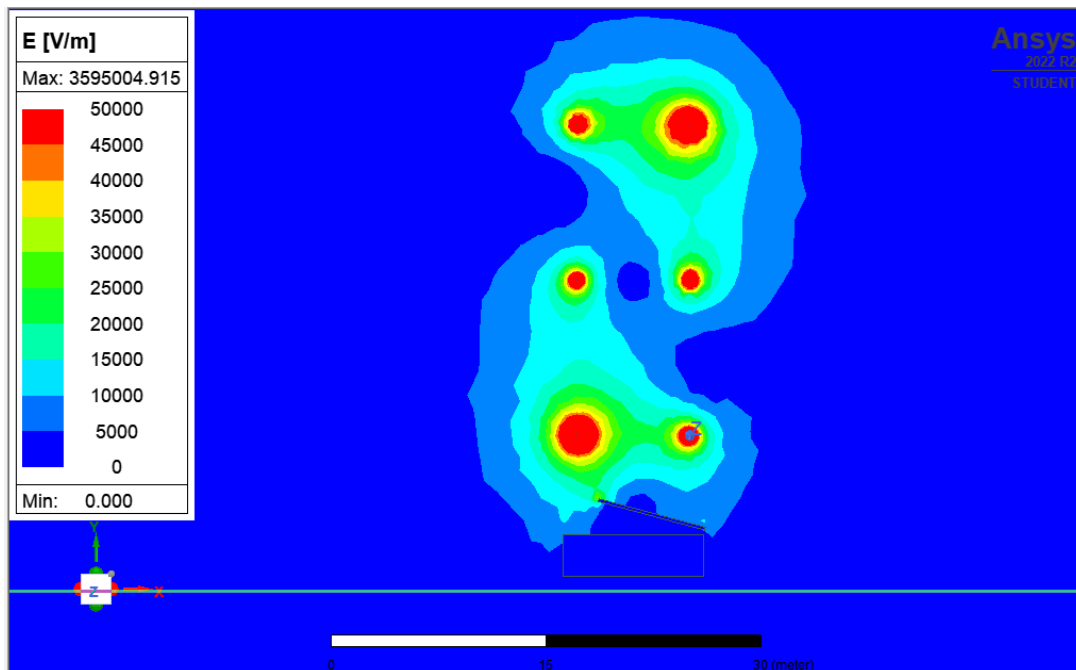
*Figuur 57: Simulatie elektrisch veld met machine*

### 3.3.2. ABCABC faseconfiguratie

Figuur 58 en Figuur 59 tonen dat ook bij de capacatieve koppeling de faseconfiguratie van belang is. De elektrische veldsterkte is een stuk lager ( $\pm 10$  kV/m) dan bij de ABCCBA faseconfiguratie.



Figuur 58: Simulatie elektrisch veld ABCABC faseconfiguratie



Figuur 59: Simulatie elektrisch veld ABCABC faseconfiguratie met machine

### 3.3.3. Conclusie FEM capacitieve koppeling

Ook bij deze simulaties stoten we tegen een aantal beperkingen die ook besproken zijn in hoofdstuk 3.2.4. Door de simulatiemethode kunnen we hier ook geen reeks oplossingen aanbieden, maar slechts enkel minimum en maximum snapshots. Dit is zeker voldoende om een goed beeld te krijgen van de effecten en een inzicht te krijgen in belangrijke parameters die de waarde van het elektrisch veld bepalen aan de grond. Wanneer een persoon in een voertuig of machine zich in de nabijheid van de hoogspanningslijnen bevindt, zullen zij geen effecten waarnemen doordat ze zich in een kooi van Faraday bevinden. Wanneer een persoon zowel de grond als een geleidend object onder een hoogspanningslijn zou aanraken, zal die persoon een schok ervaren doordat er elektrische stroom door het lichaam naar de aarde vloeit. Deze schok is o.a. afhankelijk van de weerstand van het geleidend object en de spanning op de hoogspanningslijnen. Dit fenomeen ligt aan de basis van enkele use cases van Elia, opgenomen in de tabel in hoofdstuk 4.1. Enkele mogelijke oplossing voor elektrische schokken als gevolg van capacitieve koppeling zouden kunnen zijn:

- Afscherming: Het gebruik van **afschermende materialen of kooien** kan helpen om de elektrische velden af te schermen en te voorkomen dat ze invloed uitoefenen op gevoelige gebieden of personen. Dit kan bijvoorbeeld worden bereikt door het installeren van geaarde metalen omhulsels rondom de bronnen van capacitieve koppeling.
- Aarden: Het toepassen van een **goede aarding** is essentieel om de potentiaalverschillen te minimaliseren en de veiligheid te waarborgen. Door geleidende delen correct te aarden, kunnen ongewenste spanningen worden afgevoerd naar de aarde en de kans op elektrische schokken worden verminderd. Bij capacitieve koppeling volstaat een enkelzijdige aarding.

Bovendien kunnen dergelijke simulaties helpen bij het ontwerpen en optimaliseren van de lay-out van elektrische systemen. Ze kunnen helpen bij het identificeren van potentiële gebieden met verhoogde capacitieve koppeling, waar extra voorzorgsmaatregelen nodig kunnen zijn om ongewenste effecten te voorkomen.

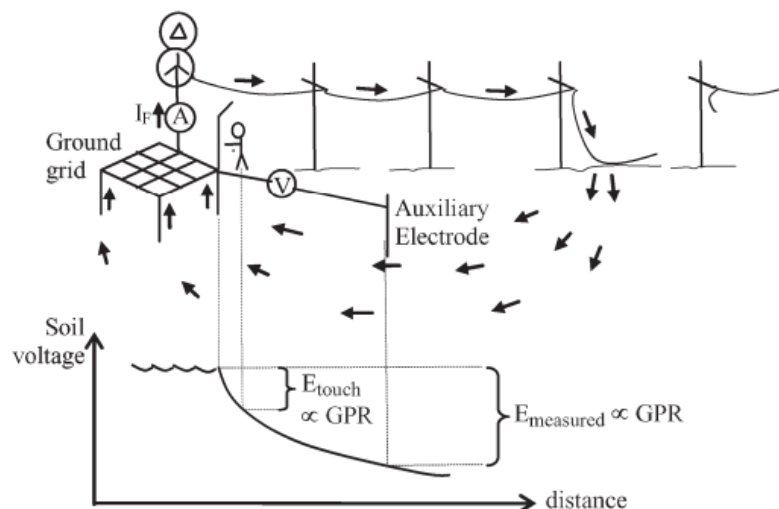
### 3.4. Conductieve koppeling

Een derde beïnvloedingswijze is conductieve koppeling. In tegenstelling tot inductieve en capacitieve fenomenen wordt hier de beïnvloeding niet veroorzaakt door de elektromagnetische velden, maar door een fysiek contact door en tussen verschillende elektrische geleiders. In deze thesis werd dit onderzocht voor een incident op het net van Elia. Incidenten zijn bv. blikseminslagen of aardsluitingen. Bij een enkelfasige aardsluiting zal er een foutstroom afgevoerd worden via de aarde die steeds terug naar zijn voedende bron zal vloeien. Wanneer de foutstroom terug bij de bron aankomt zal deze het aardingsnet ook op een hoger potentiaal brengen. Hierdoor kunnen er gevaarlijke stapspanningen binnen de oppervlakte van het onderstation aanwezig zijn. Binnen de oppervlakte van het aardingsnet en dus ook het onderstation zullen de spanningsverschillen minimaal zijn (afhankelijk van de grootte van de mazen van het aardingsnet).

Het gevaar is er wanneer alle onderdelen van het onderstation, die verbonden zijn met het aardingsnet, **tijdens een incident** op een hoog potentiaal komen te staan. Dit maakt dat wanneer een **persoon die buiten de oppervlakte** van het aardingsnet staat en contact maakt met een van die geleidende delen er een **foutstroom zal vloeien** door die persoon naar de aarde. Wanneer alle (vreemd) geleidende delen met het aardingsnet zijn verbonden, zal de persoon **in het onderstation** geen elektrische schok waarnemen omdat het **potentiaalverschil tussen het object en het aardingsnet nul** en dus veiliger is. Als men bepaalde geleidende objecten binnen het onderstation niet zou aarden, zouden er ook gevaarlijke contactspanningen tijdens een incident kunnen ontstaan omdat er een potentiaalverschil is tussen het aangeraakte object ( $V=0$ ) en het aardingsnet (op hoger potentiaal).

De grootteorde van de potentiaalstijging van de aarding in het onderstation is afhankelijk van plaats waar het incident zich voordoet op het net. Hoe groter de afstand is dat de foutstroom moet afleggen hoe groter de spreidingsweerstand van de bodem en hoe kleiner het effect zal zijn op het aardingsnet van het onderstation. Figuur 60 toont wanneer een persoon buiten het onderstation contact maakt met een geaard deel tijdens een netwerkincident. Er ontstaan grote stap- en contactspanningen.

Wat de gevolgen zijn van deze stijging en welke eigenschappen dit fenomeen kan beïnvloeden wordt besproken in de volgende subhoofdstukken.

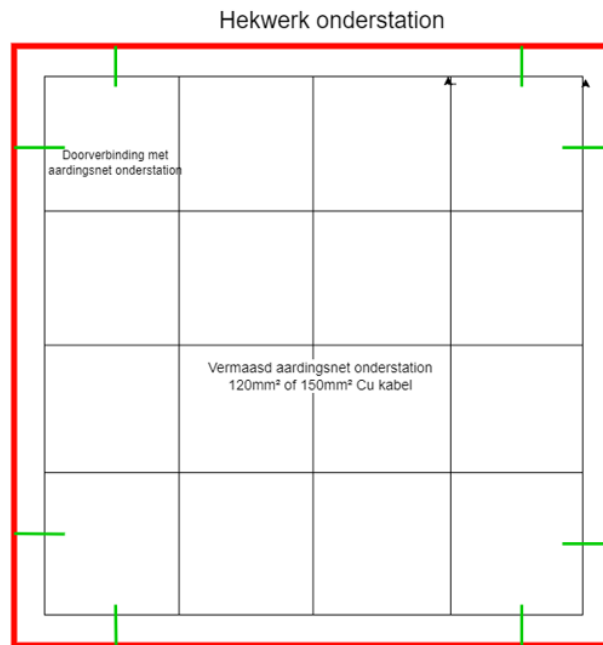


Figuur 60: stap- en aanraakspanningen tijdens een incident op het hoogspanningsnet [25]



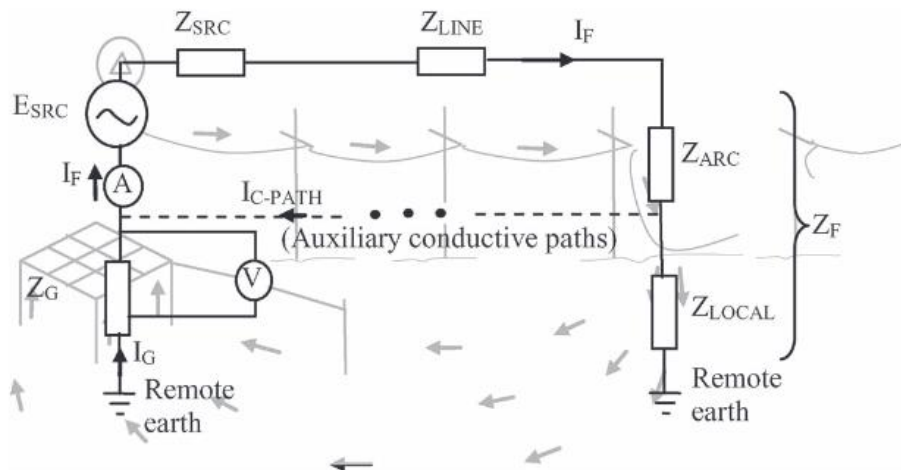
### 3.4.1. Hekwerk rond onderstation verbonden

De aarding van bepaalde geleidende objecten in een onderstation is niet altijd duidelijk beschreven. In dit voorbeeld bekijken we het effect als we het hekwerk van een onderstation zouden verbinden met het globale aardingsnet van het onderstation.



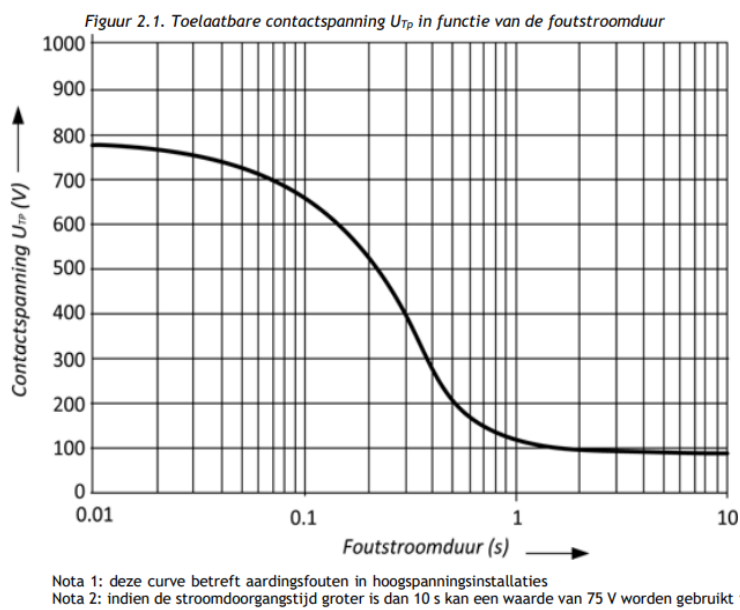
*Figuur 61: vermaasd aardingsnet met doorverbonden aarding hekwerk*

Het is noodzakelijk om de contact- en stapspanningen ten alle tijden onder een veilige waarde te houden. Figuur 63 toont de veiligheidscurve voor contactspanningen door aardingsfouten. Een onderstation heeft een vermaasd aardingsnet met aardingspinnen (rods) over de volledige oppervlakte. Wanneer zich een incident voordoet, zoals bv. een sluiting met de lijn naar de aarde, of met een lijn en de mast zal een grote foutstroom via de aarde worden teruggevoerd naar de voedende transformator in het onderstation. In België zijn alle hoog- en middenspanningsnetten laag impedant geaard. Hierdoor zal de foutstroom steeds groot genoeg zijn en kan de overstroombeveiliging in het onderstation deze detecteren ook al gebeurt de fout op een grote afstand van het onderstation. Figuur 62 toont het retour pad van de foutstroom. Als gevolg zal op het aardingsnet van de onderstation een hoge spanning komen te staan. Dit wordt de GPR (Ground Potential Rise) genoemd.



Figuur 62: Retourpad foutstroom [25]

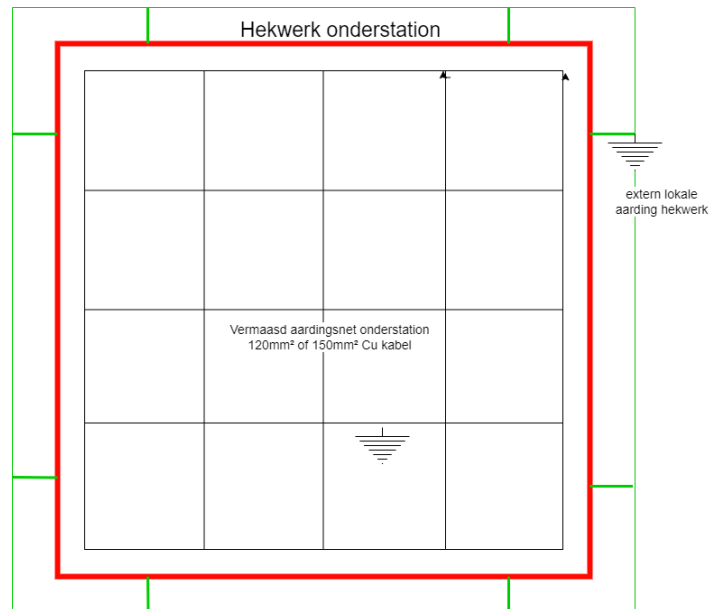
Voor een persoon, die zich tijdens het incident boven het aardingsnet bevindt en een object aanraakt, zal de contactspanning niet gevaarlijk zijn omdat het object en de aarde op dezelfde potentiaal staan tenminste als de vreemde geleidende objecten vakkundig verbonden zijn via equipotentiaalverbindingen met het vermaasd aardingsnet. Wanneer een persoon buiten de perimeter van het aardingsnet met het hekwerk contact maakt, kan er een zeer gevaarlijke situatie ontstaan (tijdens de duur van het incident). De beveiliging in het onderstation zal de foutstroom naar de aarde detecteren en zal uitschakelen.



Figuur 63: veiligheidscurve aanraakspanningen AREI deel 3 pag 18 [26]

### 3.4.2. Hekwerk rond onderstation met externe aarding

Figuur 64 toont opnieuw een vermaasd aardingsnet van een onderstation. Het hekwerk heeft nu een afzonderlijke lokale aarde. Wanneer er zich een incident voordoet, zal de aarding van het hekwerk niet op hetzelfde potentiaal staan als de aarding van het onderstation. Hierdoor zal een persoon die buiten het onderstation staat en het hekwerk vastneemt minder snel in een gevaarlijke situatie terecht komen.

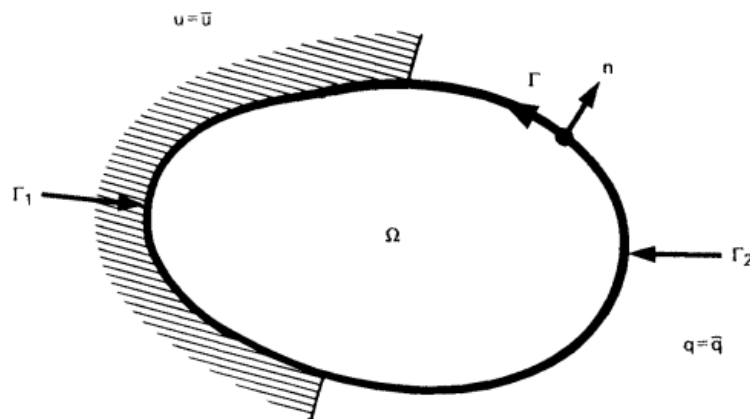


*Figuur 64: vermaasd aardingsnet onderstation met afzonderlijke aarding van hekwerk*

Elia zal in haar onderstations steeds voor een ont koppeling streven tussen het aardingsnet van het onderstation en de aarding van het hekwerk. Zo wordt de potentiaalstijging van het hek lager dan dat van het aardingsnet wat maakt dat het voor mensen buitenaf aanraken minder gevaarlijk tijdens een incident. Voor mensen binnen het onderstation ontstaat nu wel een gevaarlijkere situatie omdat ze in contact kunnen komen met een groter potentiaalverschil. Elia compenseert dit door haar personeel verplicht veiligheidsschoenen te laten dragen, als bijkomende elektrische isolatie. Ook zal een kiezellaag, op plaatsen waar er veel wordt gewerkt, in een onderstation nog voor een extra isolatie zorgen. De hekwerken zullen niet geaard worden, maar de poorten wel, enkel met lokale aardingspinnen. De gemotoriseerde poorten zullen geaard worden met een scheidingstransformator. Hierdoor kan de foutspanning op de aarding de motor van de poort niet beschadigen. De metalen buitendeuren van bijvoorbeeld onderstations in een stad zullen nooit geaard worden zodat hier gevaar voor contactspanningen mogelijk is voor mensen buitenaf.

### 3.4.3. Randelementenmethode (Boundary Element Method - BEM)

De randelementenmethode, of de Boundary Element Method (BEM), is een techniek die wordt gebruikt om de oplossingen van partiële differentiaalvergelijkingen (PDV's) te benaderen. In tegenstelling tot andere numerieke methoden, zoals de eindige-elementenmethode, richt de grenselementenmethode zich alleen op de grenzen/randén van het probleemgebied. We kunnen deze techniek alleen maar toepassen indien het volledige beschouwde gebied binnen de grenzen een homogeen stof/medium is. Concreet betekent dit voor onze opzet dat ieder punt binnen het gebied dezelfde elektrische geleidbaarheid heeft. Het basisidee achter BEM is om het probleemgebied op te delen in een netwerk van grenselementen of segmenten. Elke grenssegment bevat dan informatie over de geometrie en fysische eigenschappen van het element. Ieder segment wordt gedefinieerd, in dit geval absolute spanning en stroom. Figuur 65 toont een gebied waarvan de grens bestaat uit een n-aantal segmenten.

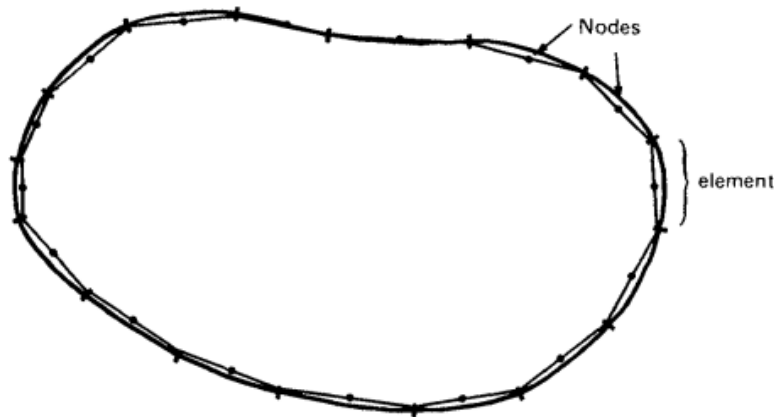


Figuur 65: Homogeen gebied met een gesloten grens [27]

Door de PDV's om te zetten naar integraalvergelijkingen op de grens, kunnen we de waarde van de oplossing op elk punt binnen het probleemgebied bepalen op basis van de waarden op de grens. Deze integraalvergelijkingen worden opgelost met behulp van numerieke integratietechnieken, zoals de methode van Gauss. Deze techniek brengt verschillende voordelen met zich mee. Omdat we bij de randelementenmethode enkel de mesh/opdeling in segmenten moeten bepalen aan de rand en niet over het volledig gebied, maakt BEM sneller en eenvoudiger dan andere technieken.. Deze techniek is zeer geschikt voor grensproblemen (omdat het over alle informatie beschikt over ieder grenselement). Dit maakt BEM geschikt voor het simuleren van conductieve koppelingen omdat dit wordt veroorzaakt door een stroominjectie op de rand van het probleemgebied (grond). Hoewel de grenselementenmethode complexer kan worden naarmate het probleem en de geometrie van de grens ingewikkelder worden, biedt het een krachtige tool voor het benaderen van oplossingen van PDV's op een efficiënte en nauwkeurige manier.

Bij BEM worden de termen "nodes" en "segmenten" gebruikt om de belangrijke onderdelen van het probleemgebied te beschrijven:

- **Nodes:** nodes zijn punten op de grens van het probleemgebied waar de oplossing van de partiële differentiaalvergelijking (PDV) wordt benaderd. Elke node vertegenwoordigt een specifiek punt op de grens en heeft een bijbehorende waarde van de oplossing. Deze waarden worden gebruikt om de integraalvergelijkingen op te stellen en op te lossen. In veel gevallen worden de nodes gelijkmatig verdeeld over de grens, maar er kunnen ook andere verdelingsstrategieën worden gebruikt, afhankelijk van de complexiteit van het probleem. Figuur 66 toont een grens die verdeeld is in  $N$  elementen. In deze thesis maken we gebruik van deze (constant element) techniek. De nodes worden hier in het midden van de elementen genomen.
- **Elementen:** elementen of segmenten, ook wel bekend als grenselementen, zijn de kleinere delen waarin de grens van het probleemgebied wordt opgedeeld. Elk element wordt gedefinieerd door twee aangrenzende nodes en vertegenwoordigt een deel van de grenslijn.



*Figuur 66: Constant elements met  $n$  segmenten [27]*

De keuze van het aantal nodes en segmenten is van invloed op de nauwkeurigheid en efficiëntie van de berekeningen. Een goede verdeling van nodes en segmenten zorgt voor een betere benadering van de oplossing en een efficiëntere berekening van de integraalvergelijkingen. Over het algemeen kan een goede verdeling worden bereikt door een iteratief proces waarbij de mesh wordt verfijnd en aangepast totdat de gewenste nauwkeurigheid wordt bereikt. Dit vereist vaak een combinatie van ervaring, kennis van het probleemgebied en testen om de meest geschikte verdeling te bepalen. Het uiteindelijke doel is om een mesh te creëren die een goede balans biedt tussen nauwkeurigheid en berekeningstijd, zodat snel betrouwbare resultaten kunnen worden verkregen.

We willen via deze techniek de conductieve koppeling tussen de aarding van een hoogspanningsmast en een aarding van bv. een omliggende elektrische (huis)installatie kwantificeren bij een netwerkincident. Door de BEM-methode toe te passen, kan het spanningsprofiel van het aardingsysteem van de mast worden berekend op verschillende punten in de omgeving. Dit biedt inzicht in de potentiaalverdeling rondom de elektrode. Een simulatie van het spanningsprofiel helpt bij het beoordelen van de effectiviteit en veiligheid van de aarding. Ook helpt dit ons een inschatting te maken wat de spanningswaarden zijn die op een aardingsnet van een huis zullen staan t.o.v. de “verre aarde” oftewel de aarding van de distributietransformator (0 V).

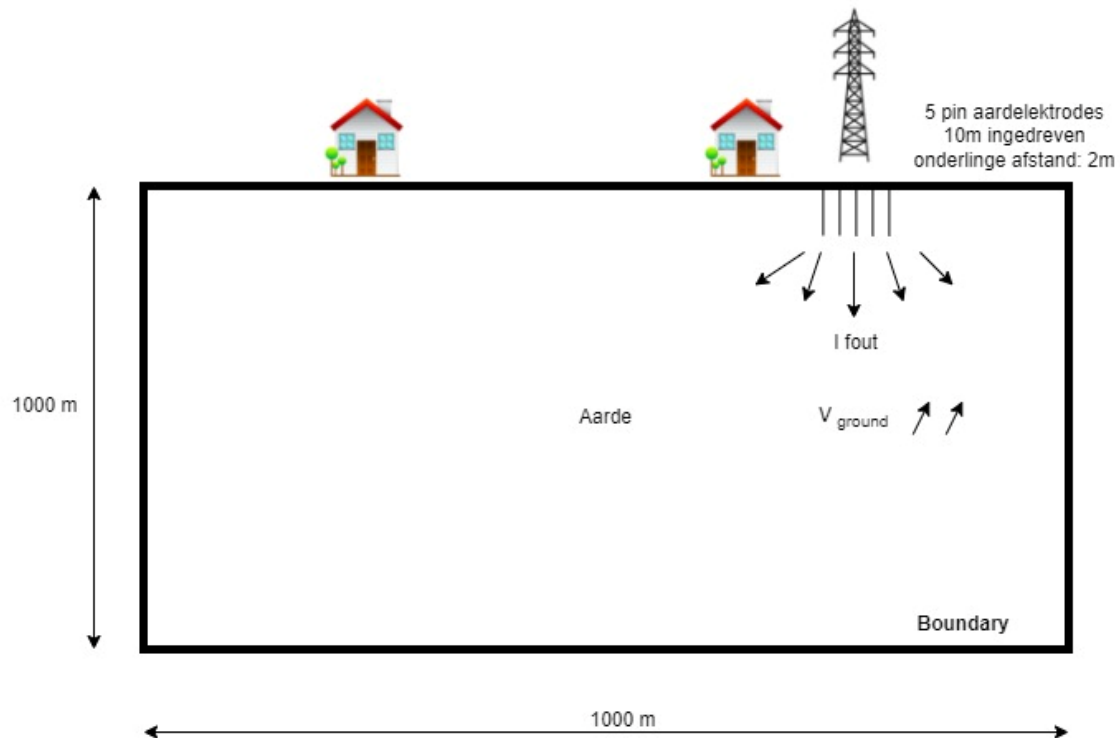
Voor het toepassen van BEM werd gebruikgemaakt van enkele tools zoals een spreadsheet-bestand voor inputs en outputs van de berekeningen in combinatie met een code-script voor de berekeningen, de basis van dit script is origineel FORTRAN code [REF] die in het kader van dit onderzoek werd omgezet naar Python. Het script zal de inputs kunnen importeren vanuit het spreadsheet, de berekeningen worden uitgevoerd en de resultaten worden teruggeschreven naar hetzelfde spreadsheet. Door de gegevens in een gestructureerde indeling te plaatsen, kan de gebruiker gemakkelijk nieuwe waarden invoeren, bestaande waarden wijzigen en de inputs aanpassen aan de specifieke vereisten van het probleem. De inputs en outputs in de simulatie worden weergegeven in tabel 2.

*Tabel 1: Inputs en outputs hulptools*

<b>Inputs</b>	
<b>X</b>	x coördinaat van een grenselement
<b>Y</b>	y coördinaat van een grenselement
<b>k</b>	voorgedefinieerde waarde van de randvoorwaarden. Als $k = 0$ betekent dit dat de potentiaal is voorgeschreven en de stroom ongekwantificeerd is. Als $k=1$ is de stroom voorgeschreven en is de spanning ongekwantificeerd.
<b>v</b>	Waarde van spanning of stroom in een node
<b>Outputs</b>	
<b>s</b>	Oplossing voor de spanning of stroom van een punt binnen het gebied
<b>Xm</b>	x coördinaat van een node
<b>Ym</b>	y coördinaat van een node

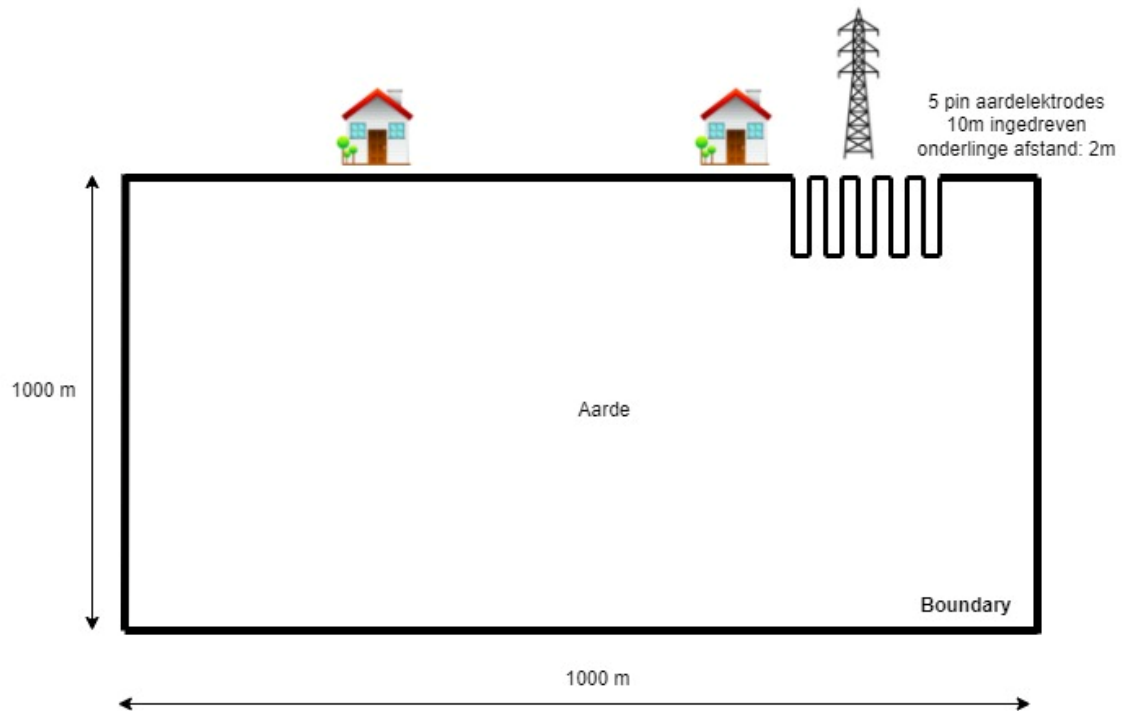
### 3.4.4. Simulaties BEM

De eerste stap bij een BEM-simulatie is het bepalen van de grens. In eerste instantie leggen we de grens vast, zoals getoond in Figuur 67. Wanneer er zich een netwerkincident zoals o.a. een aardsluiting voordoet, zal er een foutstroom in de aarde geïnjecteerd worden. Deze stroom veroorzaakt een spanningsverhoging van de lokale aarding. We willen het spanningsverloop bestuderen in de directe omgeving om zo een inschatting te kunnen maken als een huis, op een bepaalde afstand van de mast, zich al dan niet in de gevaarzone bevindt. Met deze simulatie zouden we ook afstanden willen kwantificeren tot waar die gevaarzone zich strekt.



*Figuur 67: Schematische voorstelling grens BEM simulatie*

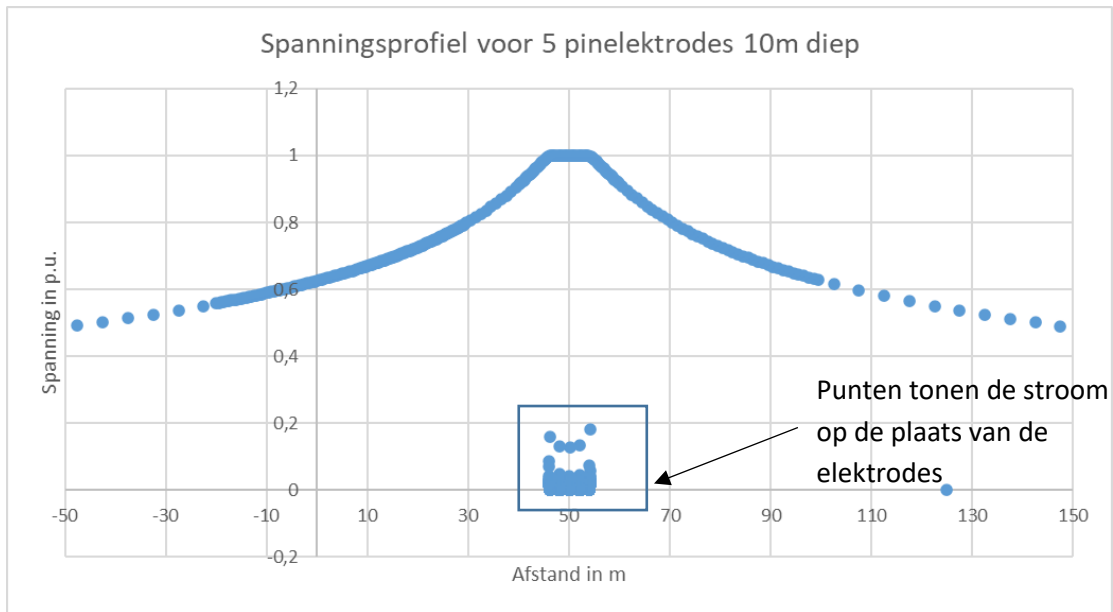
Wanneer een object wordt gemodelleerd met behulp van de BEM, worden de grenzen ervan opgedeeld in kleine elementen. Elk element draagt bij aan de interactie tussen het object (aarde) en de omgeving. Het is van cruciaal belang dat de elementen samen een samenhangend geheel vormen, zodat de wiskundige vergelijkingen en de numerieke oplossingsmethoden correct kunnen worden toegepast. Als de rand wordt doorbroken met een ander materiaal, zoals een koperen geleider (aardelektrode), ontstaan er problemen met de consistentie en integriteit van het model. De interactie tussen het object en de omgeving kan niet langer op een eenduidige en consistente manier worden gemodelleerd. Dit komt omdat de eigenschappen van het koperen materiaal verschillen t.o.v. die van de aarde en de interactie tussen het object en de omgeving verstoord wordt. We lossen dit probleem op door de grens te verleggen rond de aardelektrodes zodat er zich terug een gesloten en homogeen gebied vormt. Figuur 68 toont de nieuwe grens. Wanneer de grens bepaald is, kunnen we ieder grenssegment definiëren met zijn absolute spanning en stroom (toekennen van randvoorwaarden). Dit wordt met de variabelen  $k$  en  $v$  gedaan.



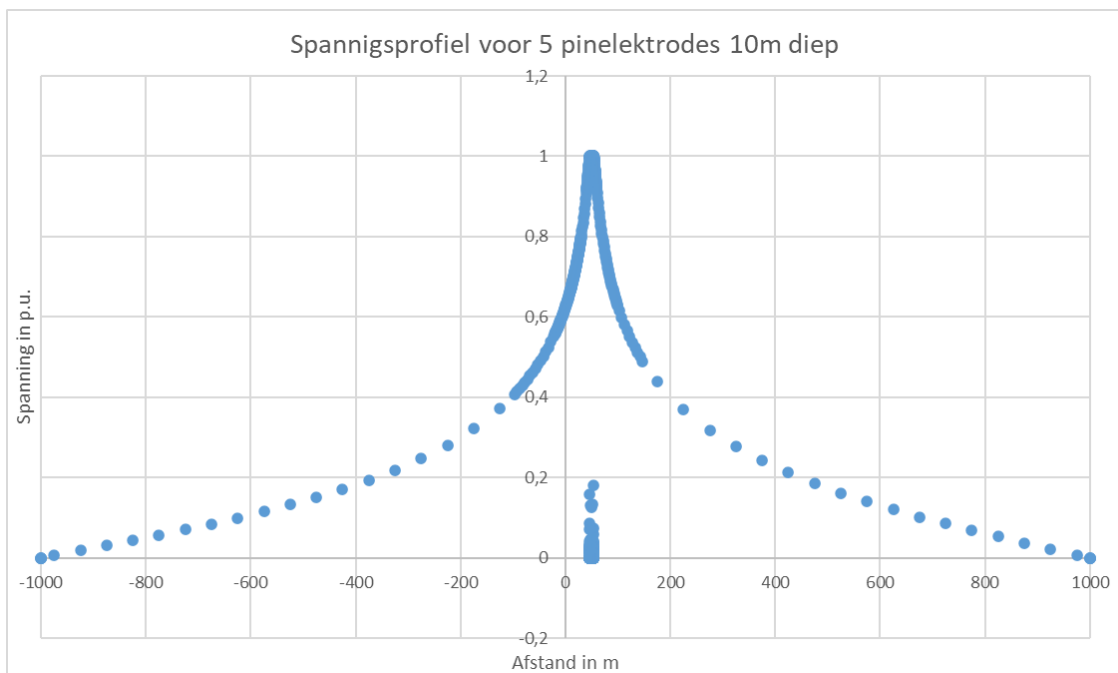
*Figuur 68: Schematische voorstelling nieuwe grens BEM simulatie*

Vervolgens worden alle data van de elementen (coördinaten en randvoorwaarden) ingelezen in het code script. Als eerst worden de nodes berekend. Doordat we gebruik maken van de “constant element BEM” zijn de nodes gelegen in het midden tussen de segmenten. De coördinaten van de nodes liggen in het midden van 2 opeenvolgende segmenten. Daarna worden er 2 matrices opgesteld met als dimensie  $N \times N$  ( $N$  = het aantal segmenten). Deze matrices bevatten informatie (randvoorwaarden) over de elementen. Door deze matrices te combineren kunnen vergelijkingen opgesteld worden die de relatie beschrijven tussen de onbekende punten in het gebied en de bekende punten op de rand. Als laatste worden de vergelijkingen opgelost met behulp van enkele numerieke methodes zoals de Gauss-eliminatie. De coördinaten van de nodes en de oplossingen worden terugschreven naar de spreadsheet waar we de oplossingen kunnen uitzetten in functie van de nodes. Figuur 69 toont de spanning, uitgedrukt in p.u., in functie van de afstand in meter voor vijf verticale pinelektrodes. De elektrodes zijn 10m diep ingedreven. De punten, aangeduid in de kader op Figuur 69, tonen de waarden voor de stroom op de grens tussen de elektrodes en het gebied. Dit komt doordat de randvoorwaarden op die punten van de grens een spanning oplegt. Hierdoor is de oplossing een stroom (zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Dit in tegenstelling tot de overige grenssegmenten waar de stroom wordt opgelegd (=0) en de oplossing een spanning is (spanningsprofiel). Figuur 70 is een uitgezoomde versie van Figuur 69 en toont dat de spanning aan de grens steeds tot 0 herleid wordt (randvoorwaarde). Merk op dat de as van de afstand hier verder reikt dan Figuur 69.



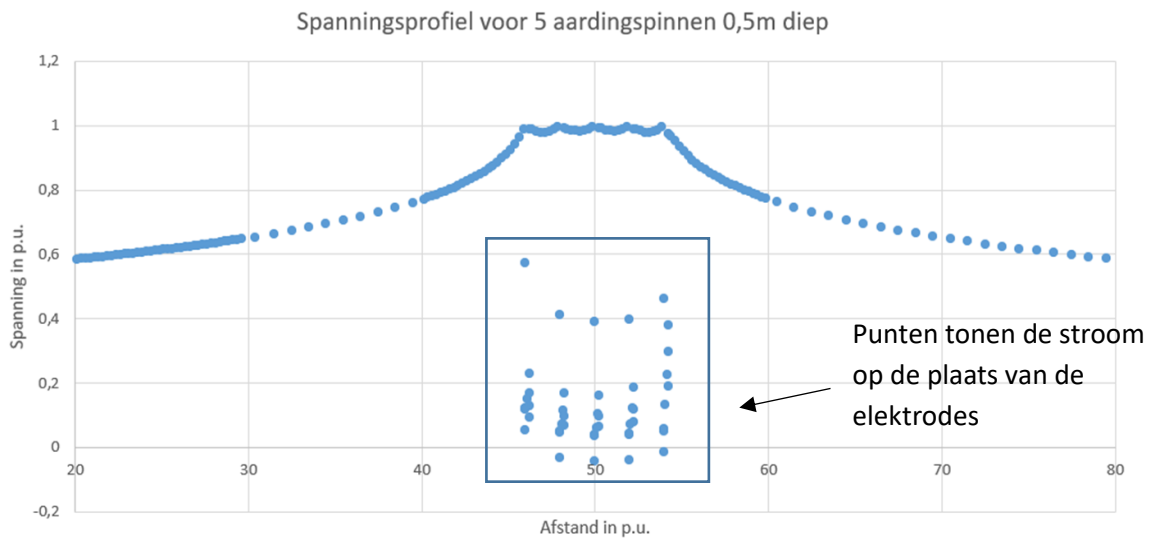


*Figuur 69: Spanningsprofiel 5 pinelektrodes 10m diep ingedreven*



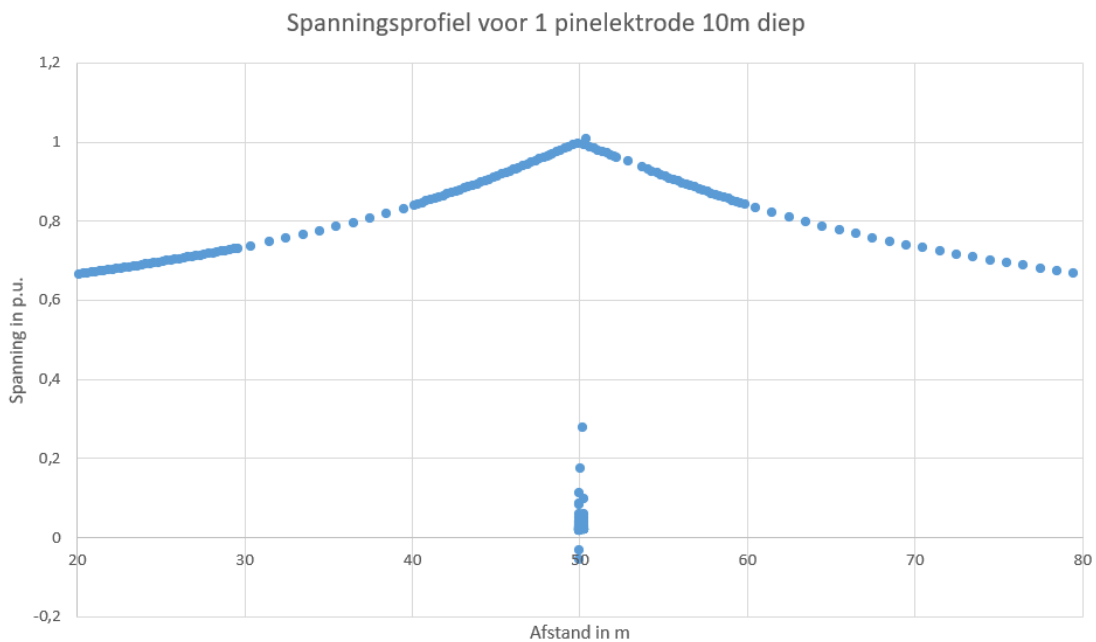
*Figuur 70: Spanningsprofiel 5 pinelektrodes 10m diep ingedreven zoom-out*

Figuur 71 toont het spanningsprofiel voor 5 verticale pinelektrodes, 0,5m ingedreven. Men ziet dat de waarden voor de stroom op de grens tussen de elektrodes en het probleemgebied groter wordt wanneer de elektrodes korter worden. Dit komt doordat dezelfde energie door de kortere als door de langere elektrodes moet worden afgevoerd naar de aarde. Dit maakt dat de stroom per lengte-eenheid van de elektrode zal toenemen. We zien ook dat het spanningsprofiel tussen de elektrodes een rimpel krijgt. Dit is ook een gevolg van de grotere elektrodes.



*Figuur 71: Spanningsprofiel 5 aardelektrodes 0.5m diep ingedreven*

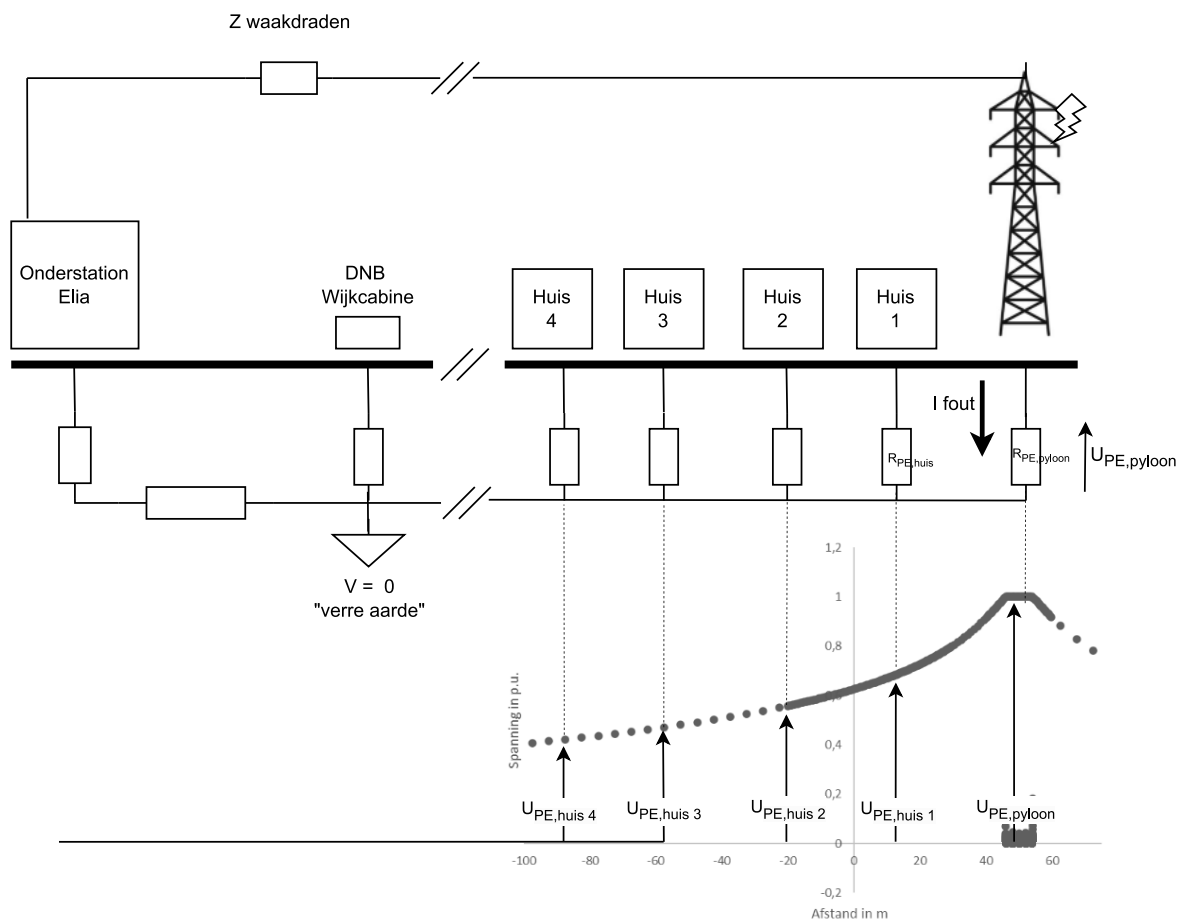
Figuur 72 toont het spanningsprofiel voor één verticale elektrode, 10m ingedreven. Het grote verschil is dat het vlak profiel rondom de elektrode verdwenen is. Hierdoor kunnen er gevaarlijke stap- en contactspanningen optreden binnen de oppervlakte van bv. een onderstation. Hierdoor zal er altijd gekozen worden voor meerdere elektrodes of een aardingsnet.



*Figuur 72: Spanningsprofiel 1 aardelektrode 10m diep ingedreven*

We merken op dat het potentiaal van de lokale aarde rond de mast verhoogd wordt. Wanneer de mast in een wijk staat kan dit zeer gevaarlijke situaties creëren. Op onderstaande Figuur 73 wordt getoond

hoe het lokale potentiaal van de aarde zal afnemen in functie van de afstand. Het huis het dichtst bij de pyloon zal de grootste spanning ( $\pm 0.8 \times U_{PE,pyloon}$  voor  $\pm 30m$ ) zien t.o.v. de nul referentie ("verre aarde"). Naarmate de afstand huis-mast toeneemt zal het percentage van de spanning afnemen. Door de exponentiële afname zal de grootste daling gebeuren rond de mast en verderop zal de spanning zeer traag nog afnemen. Dit zorgt ervoor dat we op een grote afstand ( $\pm 500 m$ ) nog steeds het effect kunnen waarnemen. Een aanzienlijk probleem is dat de voeding van de huizen van een wijkcabine afkomstig is. Die voeding heeft als nul referentie de lokale aarding van de cabine. Deze aarding ligt in de meeste gevallen zodanig ver van de mast dat deze de spanningsverhoging niet zal waarnemen en blijft dus op een 0 V. Figuur 74 toont een stopcontact in een huis in de wijk wat nu wel op een verhoogd potentiaal staat waardoor de spanningen in het huis twee verschillende referenties krijgen.



*Figuur 73: Schematische voorstelling spanningen op aardingssystemen huizen en pyloon*

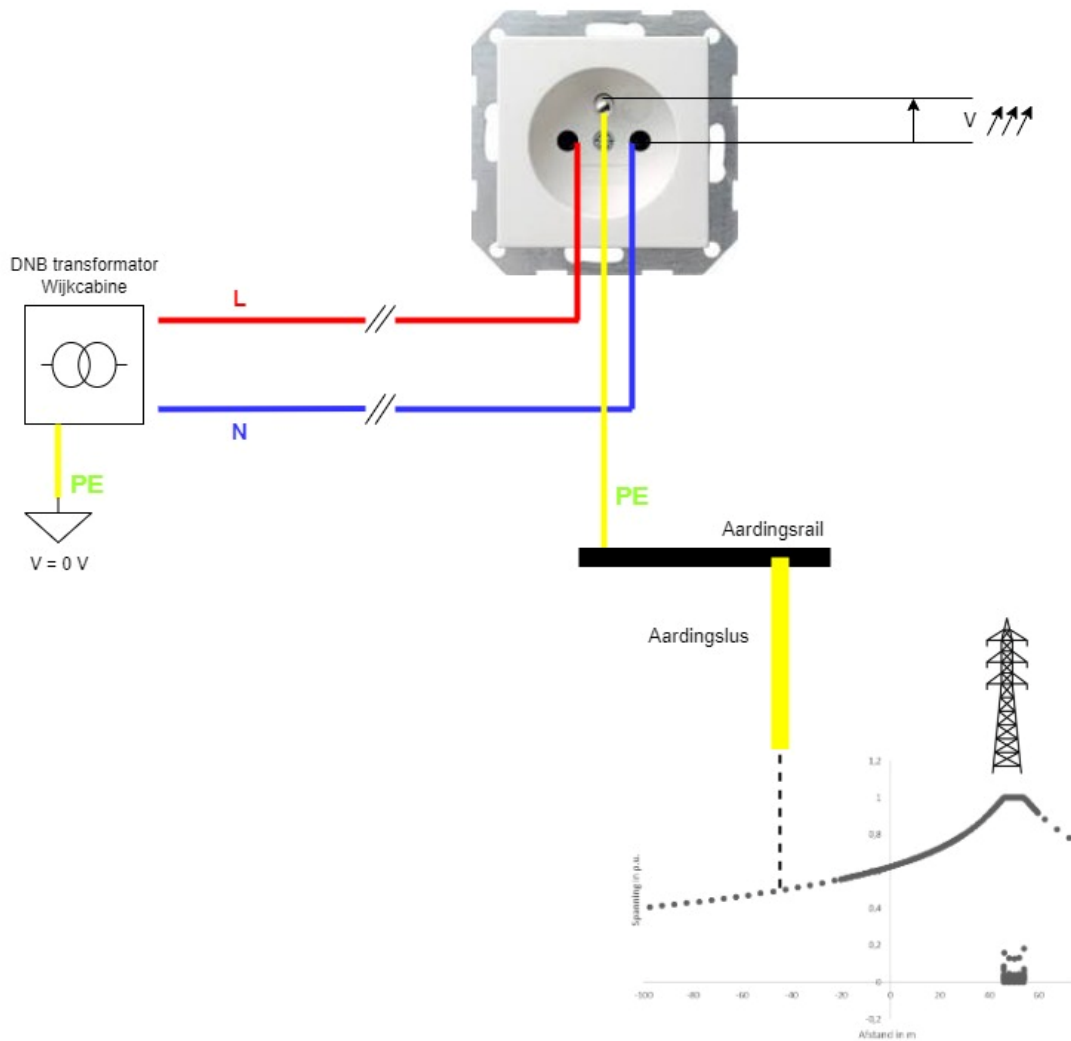
We voeren de berekening uit voor een  $I_{fout}$  van 25 kA en een weerstand van het aardingsysteem van de pyloon ( $R_{PE,pyloon}$ ) van 5  $\Omega$ . A.d.h.v. het spanningsprofiel van Figuur 69 en Figuur 70 kunnen we het percentage van de spanning t.o.v.  $U_{PE,pyloon}$  bepalen voor een aardingsysteem gelegen op een bepaalde afstand van de mast. Tabel 3 geeft de resultaten.

Tabel 2: Rekenvoorbeeld bij een foutstroom  $I_{fout}$  van 25 kA

	$I_{fout}$ (kA)	$R_{pyloon}(\Omega)$	$U_{pe,pyloon}$ (kV)	Afstand tot mast (m)	$U_{pe,huis}$ (p.u.)	$U_{pe,huis}$ (kV)
Huis 1	25	5	125	30	0,8	100
Huis 2	25	5	125	60	0,55	68,75
Huis 3	25	5	125	110	0,45	56,25
Huis 4	25	5	125	160	0,38	47,5
...	25	5	125	...	...	...
Huis n	25	5	125	500	0,15	18,75

De grootte van de spanning die op het aardingsysteem van de pyloon geïnduceerd wordt ( $U_{PE,pyloon}$ ) is afhankelijk van de foutstroom ( $I_{fout}$ ) en is op zijn beurt afhankelijk van de volgende parameters:

- Foutlocatie: de locatie van de aardfout in het hoogspanningsnet is een belangrijke factor. De afstand tot het punt waar de fout optreedt, kan de weerstand van het aardpad beïnvloeden. Hoe dichterbij de fout bij een voedingsbron (transformator in het onderstation) ligt, hoe lager de weerstand van het aardpad kan zijn, waardoor de foutstroom kan toenemen.
- Systeemspanning: de spanning van het hoogspanningsnet heeft ook invloed op de foutstroom. Hoe hoger de systeemspanning, des te hoger het overgedragen vermogen en des te groter de foutstroom kan zijn.
- Aardingsimpedantie: de impedantie van het aardingsysteem speelt een rol bij het bepalen van de foutstroom. Dit omvat de weerstand en de inductieve of capacatieve componenten van de aardingsverbindingen.
- Transformatorparameters: de eigenschappen van de transformator, zoals de serie-impedanties, kunnen de foutstroom (in grote mate) beïnvloeden.
- Netconfiguratie: de fysieke configuratie van het hoogspanningsnet, inclusief de vermazing het aantal en de locatie van de voedingsbronnen en schakelapparatuur, kan de foutstroom beïnvloeden. Verschillende netconfiguraties kunnen leiden tot variaties in de stroompaden tijdens een aardfout.



Figuur 74: Schematische voorstelling van verschilspanning t.g.v. 2 aardreferenties

In gevallen waarbij het huis ver genoeg (afhankelijk van  $U_{PE,pyloon}$  en spreidingsweerstand) verwijderd is van de pyloon kan men een scheidingstransformator plaatsen op de inkomende voeding in een huis. Bij een scheidingstransformator is de primaire zijde aangesloten op de wijkcabine (kabel in de straat) met als referentie “verre aarde” en aan de secundaire zijde is het huis aangesloten. Het sterpunt van de secundaire zijde wordt lokaal geaard en hierdoor heeft de aarding in het huis terug hetzelfde potentiaal als de lokale aarde en niet die van aarding van de wijkcabine. Het gebruik van een scheidingstransformator is alleen mogelijk wanneer de spanning van de lokale aarde niet hoger is dan de doorslagspanning van de scheidingstransformator. Dit is belangrijk om te garanderen dat de isolatie van de transformator adequaat is en dat er geen elektrische doorslag en dus schade optreedt. Als de lokale aardspanning hoger is dan de doorslagspanning van de scheidingstransformator, kan het nodig om andere maatregelen te nemen om de aardingsystemen te scheiden en de veiligheid te waarborgen. Deze maatregelen moeten individueel per situatie onderzocht en bekeken worden door Elia/elektrische installateur. In sommige gevallen kunnen gevaarlijke situaties ontstaan door conductieve koppeling na een netwerkincident, zelfs wanneer er geen directe elektrische installatie in de buurt van een huis is. Door het grote potentiaalverschil na een fout kunnen er gevaarlijke

stapspanningen ontstaan voor mens en dier rond de pyloon. Het is van belang altijd een minimale afstand te respecteren. Dit minimaliseert het risico op stapspanningen en vergroot de veiligheidsmarges.

#### 3.4.5. Conclusie BEM conductieve koppeling

In dit hoofdstuk hebben we de gevolgen van netwerkindidenten zoals o.a. aardsluitingen of blikseminslagen op het netwerk van Elia op elektrische installaties in de directe omgeving onderzocht. We hebben specifiek de conductieve effecten onderzocht van een stroominjectie in het aardingsstelsel van een hoogspanningspyloon na een incident en hebben hiervoor het spanningsprofiel van de lokale aarde opgesteld met behulp van de grens-elementenmethode. Merk op dat er wel een aantal beperkingen zijn aan de randelementenmethode zelf, zoals:

- Beperkingen in dimensionaliteit: BEM is voornamelijk van toepassing op problemen in twee dimensies (2D) of met beperkte toepasbaarheid in drie dimensies (3D). Het kan uitdagend zijn om de methode toe te passen op volledig driedimensionale problemen vanwege de complexiteit van de berekeningen en de benodigde rekenkracht. In de tools die we in deze thesis hebben gebruikt kan men enkel 2D-simulaties uitvoeren.
- Vereiste discretisatie van de grens: BEM vereist de discretisatie van de grens van het probleemgebied. Dit kan leiden tot een verhoogde complexiteit en rekenkosten, vooral bij problemen met grote aantallen grenselementen.

Een van de voorwaarden van de BEM is dat het beschouwde probleemgebied, in deze thesis de aarde, homogeen en consistent moet zijn. Dit wil zeggen dat ieder punt binnen dit gebied over dezelfde elektrische eigenschappen, zoals geleidbaarheid, moet bezitten. Door de grens van het probleemgebied te verleggen rond de aardingselektrodes hebben we terug een homogeen gebied verkregen en konden we de randelementenmethode toch toepassen. Dit maakt dat we, zonder dure softwarepakketten, een snelle en efficiënte benadering konden genereren van spanningsprofielen van verschillende aardingselektrodes. Doordat iedere situatie uniek is, is het moeilijk om generieke aanbevelingen te geven i.v.m. afstanden, beveiligingsmaatregelen, etc. Vanwege de complexiteit en de vele variabelen die de foutstroom kunnen beïnvloeden, is het raadzaam om een gedetailleerde studie aan te vragen bij Elia. Dit zorgt voor een nauwkeurige beoordeling van de specifieke situatie en stelt Elia in staat om op maat gemaakte oplossingen voor te stellen om de veiligheid te verbeteren.

## 4. Overzichtstabel cases

Elia gaf aan nood te hebben aan een document waarin hedendaagse problemen in verband met inductieve, capacatieve of conductieve koppeling eenvoudig, met de nodige wetenschappelijke onderbouwing, verklaard worden. In onderstaande tabel 3 “Cases deel 1”, 4 “Cases deel 2” en 5 “Cases deel 3” zijn verschillende use cases opgenomen die zich hebben voorgedaan in België, maar ook bij de Nederlandse transmissienetbeheerder TenneT [28]. In hoofdstuk 4.1 staan alle use cases samengevat met de verwijzing naar de verklarende tabel in hoofdstuk 4.2. Er zijn ook maatregelen voorgesteld die genomen kunnen worden om de problemen te verminderen/verhelpen.

### 4.1. Cases

Tabel 3: Cases deel 1

Case	Wetenschappelijke verklaring	Concrete maatregelen
<b>Bouwen</b>		
Bouwwerken	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. en cap. koppeling</i>	aanvragen indienen bij TSO <b>aarden</b> van metalen delen volgens voorschriften <b>equipotentiaalverbindingen</b> op metalen constructie elementen aanbrengen ; op de hoekpunten aardelektrodes aanbrengen
Kruisingen van wegen en bouwterreinen	<i>Kans op overslag wanneer de afstand tussen de machine en een actieve lijn te klein wordt. Kans dat machine de actieve lijn raakt -&gt; aardsluiting</i>	<b>fysieke afscherming</b> zoals: een in hoogte beperkte doorrijdconstructie, waarschuwborden, bij (werk)wegen op een afstand van 50 meter buiten de, in de toestemming, aan gegeven begrenzing van de belaste strook, borden plaatsen met de tekst “bak omlaag”
	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. en cap. koppeling</i>	In de toestemming wordt aangegeven wat ter plaatste de <b>maximale vrije werkhoogte</b> is. Geen machines opstellen die in de richting van de lijnen kunnen vallen, Het mechanisch, elektrisch of elektronisch blokkeren van de draaicirkel en de hoogte van de werktuigen is voorgeschreven
(Mechanische) Werktuigen	<i>Zie tabel 'verklaringen' cap. koppeling</i>	<b>aarden van (mobiele) machines via een praktische manier. bv een staalkabel</b> van voldoende dikte of een <b>sleepketting</b> . Hetzelfde voor werktuigen in de nabijheid van de belaste strook. Dit geldt niet voor werktuigen voorzien van stalen rupsen
<b>Gebouwen</b>		
Problemen met elektrische (huis)installatie na incident op het hoogspanningsnet	<i>Zie tabel 'verklaringen' cond. koppeling</i>	Plaatsen van een <b>meertrapse overspanningsbeveiliging</b> aan de inkomende voeding van de elektriciteitskast of plaatsen van een <b>scheidingstransformator</b> voor aarding huis en aarding DNB te scheiden (vanaf minimale afstand)
Geïsoleerde geleidende objecten (dakramen, dakgoten, ...)	<i>Zie tabel 'verklaringen' cap. koppeling</i>	<b>aarden</b> van geleidende objecten

Tabel 4: Cases deel 2

<b>Openbare ruimtes</b>		
Parkeerterrein	<i>Zie tabel 'verklaringen' cap. koppeling</i>	Vermijd dat binnen de belaste strook voertuigen parkeren die ingericht zijn voor en geladen met brandbare en/of explosieve stoffen.
Hoog straatmeubilair	<i>Zie tabel 'verklaringen' cap. koppeling</i>	<b>aarden</b>
Geen voertuigen hoger dan 4m	<i>Kans op overslag wanneer de afstand tussen de machine en een actieve lijn te klein wordt. Kans dat machine de actieve lijn raakt -&gt; kortsluiting</i>	
Kabels en leidingen	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. koppeling</i>	TenneT kan <b>aanvullende eisen</b> stellen voor wat betreft <b>plaats en afmetingen bij de aanleg van kabels en leidingen die parallel lopen</b> aan de hoogspanningsverbinding. overleggen met de verschillende partijen
Metalen pijpleidingen	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. koppeling</i>	tweezijdig <b>aarden</b> van de metalen pijpleiding
De afstand van ondergrondse kabels en leidingen tot de fundatie van een hoogspanningsmast moet in principe vijf meter zijn.	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. en cap. koppeling</i>	
Bepantingen	<i>Kans op overslag wanneer de afstand tussen de beplanting en een actieve lijn te klein wordt. Kans dat de beplanting de actieve lijn raakt -&gt; aardsluiting</i>	<b>geen hoge beplanting</b> in belemmerde strook, regelmatige <b>inspectie</b> , regelmatig snoeiwerk, <b>afgrazen</b>
<b>Industrie</b>		
Opslag	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. koppeling</i>	U mag de belaste strook <b>niet gebruiken voor de opslag van brandgevaarlijke, brandbare of explosieve materialen.</b>
<b>(Elektrische) installaties</b>		
Ervaren van elektrische schokken bij het aanraken van geaarde delen	<i>Zie tabel 'verklaringen' cond. koppeling</i>	<b>Verlagen van stap- en aanraakspanningen</b> een netvormig of diagonale aardelektrodes te plaatsen
Elektrische beïnvloeding	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. en cap. koppeling</i>	Het is van belang dat eventueel aan te schaffen <b>apparatuur voor procesbeheersing voldoet aan de daarvoor geldende normen.</b> Dit om storingen door de aanwezigheid van de hoogspanningsverbinding uit te sluiten
Elektrische storingen / beïnvloeding sensoren	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. en cap. koppeling</i>	Voorzien van EMC bekabeling en de sensor volgens de geldende EMC klasse afschermen
Vonken op katrollen tijdens het trekken van nieuwe hoogspanningslijnen	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. en cap. koppeling</i>	Nieuwe lijn en katrollen <b>aarden</b> tijdens de werken



Tabel 5: Cases deel 3

<b>Agrarisch</b>		
Afrasteringen en hekwerken	<i>Zie tabel 'verklaringen' cap. koppeling</i>	Het is van belang dat metalen hekdelen binnen de belaste strook altijd <b>onderling met elkaar worden doorverbonden</b> en volgens de regels van goed vakmanschap worden <b>geaard</b> .
	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. koppeling</i>	Parallel lopende afrasteringen van ongeveer <b>100 meter of langer onder verdelen in secties. Deze secties afzonderlijk aarden.</b>
		Het is niet toegestaan elektrisch geleidbare afrasteringen en hekwerken mechanisch met een hoogspanningsmast te verbinden.
Schrikdraadapparatuur en beïnvloeding hoogspanningsverbinding	<i>Zie tabel 'verklaringen' ind. en cap. koppeling</i>	<b>Schrikdraadapparatuur</b> in de directe nabijheid van de hoogspanningsverbinding <b>kan geaard worden om geïnduceerde spanningen af te leiden, ook als deze uitgeschakeld is</b>
Gebruik beregeningsinstallaties		Het is van belang een beregeningsinstallatie altijd deugdelijk te <b>aarden</b> .
		Overleggen met TSO, Naast de spanning van de verbinding zijn de druk aan de spuitmond, de spuithoek, de geleidbaarheid van het water en de nozzle-diameter, van belang.
<b>Recreatie</b>		
	<i>Zie tabel 'verklaringen' cap. koppeling</i>	
Evenementen	<i>Kans op overslag wanneer de afstand tussen de (tijdelijke) structuren en een actieve lijn te klein wordt. Kans op contact met actieve lijn -&gt; aardsluiting</i>	Onafhankelijk van de vergunning van de gemeente voor het houden van een evenement is het van belang dat de organisatie <b>toestemming vraagt bij TSO</b> voor het houden van een evenement binnen de belaste strook. Voor eventueel te plaatsen feesttenten is het van belang om deze buiten de belaste strook te plaatsen en stormvast te verankeren.

## 4.2. Verklaringen

Tabel 6: Verklaringen

	Inductieve inkoppeling		Capacitieve inkoppeling		Conductieve inkoppeling
<b>Oorzaak</b>	magnetisch veld van HS-lijnen		elektrisch veld van HS-lijnen		Grote foutstromen worden afgeleid naar het aardingsnet -> Hoge spanningen op aardingsnetten
<b>Gevolg</b>	Geïnduceerde spanningen op lange objecten parallel met HS infrastructuur zoals bv. pijpleidingen, omheiningen, ...		Spanningen op objecten naast of onder HS infra		Alle geleidende objecten die via een equipotentiaalverbinding met het hetzelfde aardingsnet of met een aardingsnet in de omgeving van het geïmpacteerde ligt, komt op een verhoogde spanning te staan
<b>Wetgeving*</b>	<b>Europese aanbevelingen voor maximale blootstelling</b>		<b>Belgische wetgeving voor maximale blootstelling</b>		<b>Geen</b>
	limiet magnetisch veld blootstelling publiek (Elia)	100 $\mu$ T	in de woon- of woonbestemmingszones op de sectorale plannen	5 kV/m	
	interventiewaarde (Elia)	20 $\mu$ T	over wegen	7 kV/m	
	Contactstroom	500 $\mu$ A	op andere plaatsen	10 kV/m	
			Contactstroom	500 $\mu$ A	
<b>Waarneming</b>	Elektrische schok bij het aanraken van geleidende objecten in de <b>directe nabijheid en parallel</b> met hoogspanningsinfrastructuur		Elektrische schok bij het aanraken van objecten geplaatst onder hoogspanningsinfrastructuur		Bij een incident of een fout (aardsluiting lijn, kortsluiting, blikseminslag) worden hoge spanningen op de aarding in een (huis)installatie in de directe omgeving van hoogspanningsinfrastructuur gemeten
	Geïnduceerde spanningen op parallelle meetapparatuur leiden tot meetfouten of storingen		Geïnduceerde spanningen op meetapparatuur onder hoogspanningsinfrastructuur leiden tot meetfouten of storingen		Hoge stap- en contactspanningen op alle geaarde delen boven het aardingsnet
<b>Maatregelen</b>	Tweezijdig aarden van geleidend object		aarden van object		integreren van meertrapse overspanningsbeveiliging voor externe elektrische installaties (vonkbrug, varistor)
	Beschermen van gevoelige geleiders met een EMC-shielding		minimale afstand respecteren		Plaatsen van een scheidingstransformator vanaf een minimale afstand t.o.v. de pyloon
	minimale afstand respecteren				

\*[29]; [30]

## 5. Conclusie

In deze masterproef is onderzoek gedaan naar de verschillende beïnvloedingswijzen van hoogspanningsinfrastructuur op externe elektrische installaties in de directe nabijheid. Het onderzoek begon met een grondige literatuurstudie om inzicht te krijgen in de materie en de bestaande kennis op dit gebied te verzamelen. Vervolgens lag de focus op het onderzoeken van inductieve, capacitieve en conductieve koppeling.

Om de effecten van inductieve en capacitieve koppeling te analyseren, zijn simulatiemodellen opgesteld met behulp van de eindige-elementenmethode in Ansys Maxwell. Deze simulaties boden de mogelijkheid om de verspreiding van elektromagnetische velden, stromen en spanningen in externe elektrische installaties te bestuderen en te kwantificeren. De resultaten van de simulaties hebben laten zien hoe inductieve koppeling elektrische stromen en spanningen kan genereren in externe installaties, terwijl capacitieve koppeling elektrische velden en het gedrag van elektrische componenten kan beïnvloeden. Door variabelen zoals afstand, geometrie en elektrische eigenschappen te variëren, konden verschillende maatregelen worden voorgesteld om de beïnvloedingseffecten te verminderen en de elektromagnetische compatibiliteit te waarborgen. Enkele belangrijke conclusiemaatregelen zijn:

- Afstand en positionering: Het vergroten van de fysieke afstand tussen de hoogspanningsinfrastructuur en de externe installaties kan helpen de inductieve en capacitieve koppeling te verminderen. Door de juiste positionering van de apparatuur en componenten kunnen de beïnvloedingseffecten worden verminderd.
- Afscherming of EMC-shielding: Het gebruik van afschermende materialen en technieken kan helpen om elektromagnetische velden te blokkeren of te verminderen bij gevoelige installaties. Dit kan onder andere worden bereikt door het gebruik van metalen omkastingen of afgeschermd kabels met geschikte elektromagnetische eigenschappen.
- Aardingsmaatregelen: Een goede, korte, laag-impedante aarding kan helpen bij het afvoeren van ongewenste stromen en het minimaliseren van potentiaalverschillen.

In deze thesis werden ook simulaties uitgevoerd voor conductieve koppeling. Het doel was om te onderzoeken hoeveel spanning een extern aardingsnet, zoals die van een huis, zou ervaren langs of op een afstand van een pylloon na een netwerkincident. Zonder dure softwarepakketten slaagden we erin om dit te bereiken door gebruik te maken van de grens-elementenmethode (BEM). We definieerden de grens van het probleemgebied op een zodanige manier dat het gebied consistent en homogeen bleef, waardoor we gebruik konden maken van deze techniek. Dit maakt dat we snelle en efficiënte benaderingen konden genereren van spanningsprofielen van verschillende aardingselektrodes. De resultaten tonen dat wanneer er gebruik gemaakt wordt van meerdere, diep ingedreven verticale elektrodes, het spanningsniveau tussen de elektrodes constant bleef. Dit vermindert het gevaar op stap- en contactspanningen na een stroominjectie. Dit onderzoek toonde ook aan dat op een afstand van 110m vanaf de pylloon, de spanning van de lokale aarde nog 45% was van de spanning geïnduceerd op het aardingsnet van de pylloon na een netwerkincident. Het ander gevaar van conductieve koppeling tijdens een netwerkincident, is dat zich twee verschillende spanningsreferenties vormen in de elektrische (huis)installatie. Mogelijke oplossingen zijn het integreren van een overspanningsbeveiligingssysteem of gebruik te maken van een scheidingstransformator. Men moet wel rekening houden dat de laatste optie enkel toepasbaar is, wanneer de spanning op het aardingsnet

van het huis lager is dan de doorslagspanning van de scheidingstransformator. Met andere woorden, moet het huis zich ver genoeg van de pyloon bevinden. Omdat ieder netwerkincident anders is, is het niet mogelijk generieke aanbevelingen te doen voor een specifieke situaties omtrent conductieve koppeling. Er wordt dan ook aangeraden een detailstudie aan te vragen bij Elia, wanneer de installatie geplaatst is in de directe omgeving van hoogspanning.

Tenslotte is er een samenvattende tabel opgemaakt waarin oorzaken, gevolgen, wetenschappelijke verklaring en te nemen maatregelen overzichtelijk worden weergegeven. Dit kan dienen als referentiekader voor het ontwikkelen van de brochure die Elia kan publiceren om techniekers te ondersteunen in hun werkzaamheden.

Dit onderzoek draagt bij aan de kennis op het gebied van elektromagnetische compatibiliteit en biedt waardevolle inzichten voor netbeheerders, ontwerpers en ingenieurs die verantwoordelijk zijn voor het ontwikkelen en beheren van elektrische installaties in de nabijheid van hoogspanningsinfrastructuur. De bevindingen dragen bij aan een beter begrip van de beïnvloedingsmechanismen en kunnen worden gebruikt als basis voor het opstellen van richtlijnen en normen om de impact van hoogspanningsinfrastructuur op elektrische installaties te minimaliseren. Aanvullend onderzoek kan zich richten op het verfijnen van de simulatiemodellen, het uitbreiden van de studie naar andere typen externe installaties en omgevingscondities of het uitvoeren van praktische experimenten ter validatie en het onderzoeken van alternatieve berekeningsmethodes.

Met deze conclusies kunnen verdere stappen worden genomen om de elektromagnetische compatibiliteit tussen hoogspanningsinfrastructuur en externe elektrische installaties te verbeteren, en zo te zorgen voor een efficiënte en betrouwbare werking van het elektrische installaties in de toekomst.

## Referentielijst

- [1] V. Slido, J. Rimez, D. De Bie, en J. Hoeffelman, 'Elektrische risico's van het hoogspanningsnet'.
- [2] kennisplatform.nl, 'Uit welke onderdelen bestaat het elektriciteitsnetwerk?'
- [3] hoogspanningsnet.com, 'Techniek hoogspanningsdraden'.  
<https://www.hoogspanningsnet.com/techniek/draden/> ( geraadpleegd 24 november 2022).
- [4] Wikipedia, 'Transmissielijnmodel'. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Transmissielijn> ( geraadpleegd 7 februari 2023).
- [5] De Raad van de Europese Unie, 'betreffende de beperking van blootstelling van de bevolking aan elektromagnetische velden van 0 Hz — 300 GHz', Brussel, 1999.
- [6] World Health Organization, 'Electromagnetic fields'.  
<https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/electromagnetic-fields> ( geraadpleegd 24 november 2022).
- [7] M. Kokoruš, S. Delić, A. Mujezinović, M. Muratović, en A. Čaršimamović, 'Analysis of the possible solutions for the reduction of electric and magnetic fields near 400 kV overhead transmission lines', mei 2014, pp. 225–236. doi: 10.2495/EID140191.
- [8] J. E. Bridges en V. C. Formanek, 'Coupling and Corona Effects Research Plan for Transmission Lines Final Report', jun. 1976.
- [9] R. Djekidel en D. Mahi, 'Calculation and analysis of inductive coupling effects for HV transmission lines on aerial pipelines', *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 90, nr. 9, pp. 151–156, aug. 2014, doi: 10.12915/pe.2014.09.39.
- [10] M. Kokoruš, S. Delić, A. Mujezinović, M. Muratović, en A. Čaršimamović, 'Analysis of the possible solutions for the reduction of electric and magnetic fields near 400 kV overhead transmission lines', *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 181, pp. 225–236, 2014, doi: 10.2495/EID140191.
- [11] D. D. Micu, G. C. Christoforidis, en L. Czumbil, 'AC interference on pipelines due to double circuit power lines: A detailed study', *Electric Power Systems Research*, vol. 103, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1016/j.epsr.2013.04.008.
- [12] G. Mazzanti, 'The role played by current phase shift on magnetic field established by AC double-circuit overhead transmission lines - Part I: Static analysis', *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, nr. 2, pp. 939–948, apr. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.859273.
- [13] G. Mazzanti, 'The role played by current phase shift on magnetic field established by double-circuit overhead transmission lines - Part II: Dynamic analysis', *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, nr. 2, pp. 949–958, apr. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.859271.

- [14] J. D. Tranen en G. L. Wilson, 'Electrostatically induced voltages and currents on conducting objects under EHV transmission lines', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-90, nr. 2, pp. 768–776, mrt. 1971, doi: 10.1109/TPAS.1971.293104.
- [15] General Electric Co., *EPRI Transmission Line Reference Book 34*. 1972.
- [16] R. J. Spiegel, 'Electromagnetic fields in the near vicinity of transmission line towers', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, nr. 6, pp. 1863–1871, 1976, doi: 10.1109/T-PAS.1976.32287.
- [17] H. M. Ismail, 'Effect of oil pipelines existing in an HVTL corridor on the electric-field distribution', *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, nr. 4, pp. 2466–2472, okt. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.905368.
- [18] WHO, 'Electric fields limits voor low-frequency fields', 2017. [https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/electric-field-\(kv-m\)](https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/electric-field-(kv-m)) (geraadpleegd 6 december 2022).
- [19] FOD Volksgezondheid, 'Elektromagnetische velden en gezondheid Uw wegwijzer in het elektromagnetische landschap', Brussel, 2014.
- [20] A. G. Martins-Britto, C. M. Moraes, en F. V. Lopes, 'Transient electromagnetic interferences between a power line and a pipeline due to a lightning discharge: An EMTP-based approach', *Electric Power Systems Research*, vol. 197, aug. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107321.
- [21] Elektrotechnik, 'SafeGrid TM Earthing Article', 2020. [Online]. Beschikbaar op: [www.elek.com.au](http://www.elek.com.au)
- [22] IEEE Power Engineering Society. Substations Committee. en IEEE-SA Standards Board., *IEEE guide for safety in AC substation grounding*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [23] Jayson Joseph, 'Introduction to the Finite Element Method', 2018.
- [24] Wikipedia, 'Eindige-elementenmethode'. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Eindige-elementenmethode> (geraadpleegd 15 mei 2023).
- [25] M. B. Bastian, W. D. Carman, en D. J. Woodhouse, 'Real-time monitoring of substation ground potential rise and grounding system impedance using power system faults', *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 51, nr. 6, pp. 5298–5304, nov. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2425361.
- [26] FOD Economie, 'Algemeen reglement op de elektrische installaties - Boek 3 - 01.06.2020', 2016.
- [27] W. I. of T. U. and J. D. C.A. Brebbia, *Boundary Elements An Introductory Course*, 2de dr. University of Seville, Spain, 1994.
- [28] TenneT TSO, 'Uw Veiligheid en de ongestoorde werking van de bovengrondse hoogspanningsverbinding', 2017.

- [29] FOD Volksgezondheid, 'Elektromagnetische velden en gezondheid Uw wegwijzer in het elektromagnetische landschap', 2014.
- [30] R. Matthes, J. H. Bernhardt, A. F. McKinlay, en International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection., *Guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation : a reference book based on the guidelines on limiting exposure to non-ionizing radiation and statements on special applications*. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1999.