

TECHNOLOGIESTUDIE

Februari 2019

Inhoudsopgave

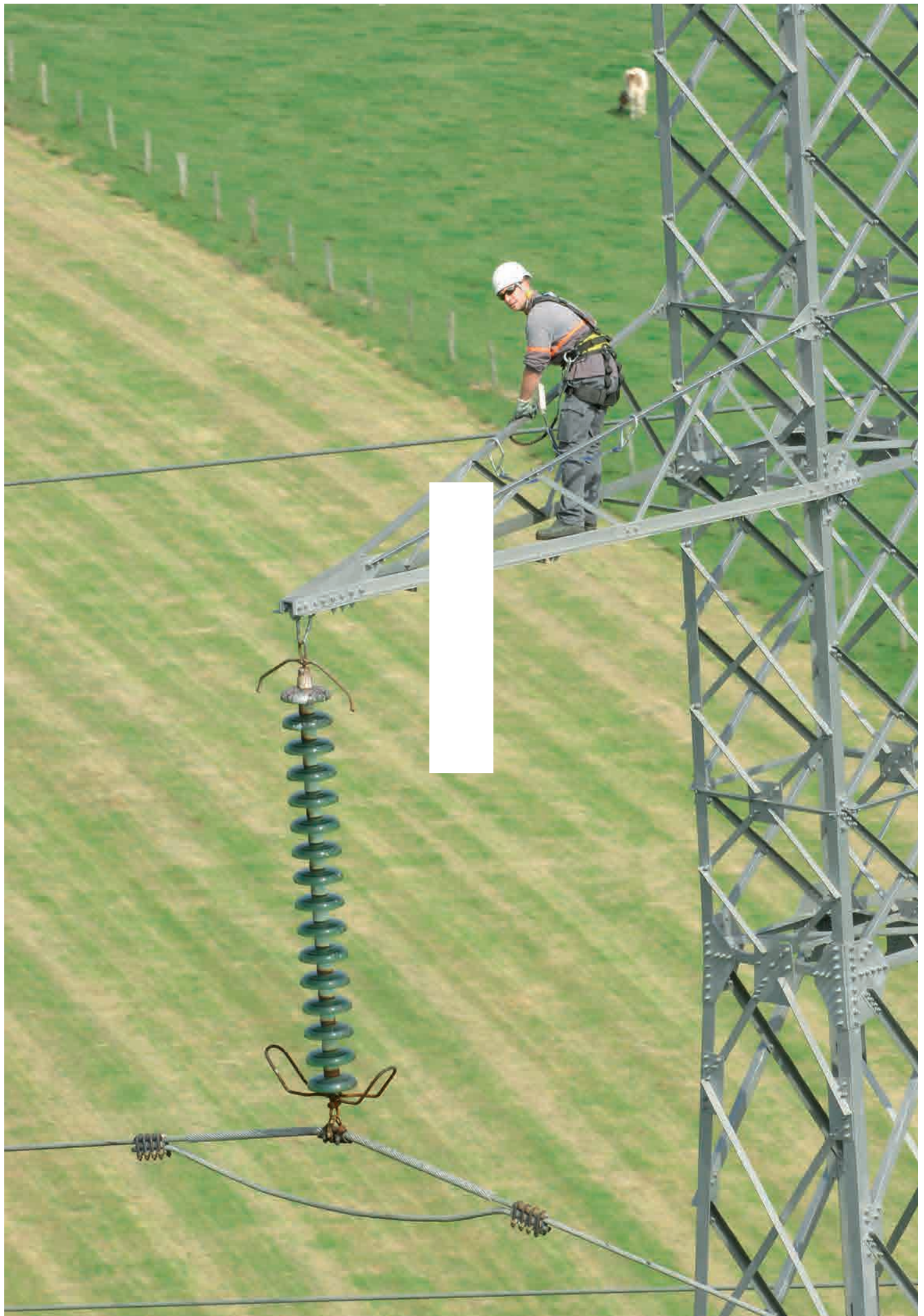
Overzicht

1	→ NIET-TECHNISCHE SAMENVATTING	7			
2	→ INLEIDING EN DOELSTELLING	17			
3	→ USE CASE	19			
3.1	– Stevin-Avelgem (“Ventilus”)	20	4.1.2.2	– GIL	36
3.2	– Avelgem-Centrum (“Boucle du Hainaut”)	21	4.1.2.2.1	– Toepassing op case study	37
3.3	– Eigenschappen van de verbinding	21	4.1.2.3	– Supergeleider	37
3.3.1	– Vermogen	21	4.1.2.4	– Toepassing technologie op case study	38
3.3.2	– Spanning	23	4.2	– DC-technologie	38
3.3.3	– Afstand	23	4.2.1	– Conversiestations	39
3.3.4	– Belasting	23	4.2.1.1	– Topologieën	40
4	→ BESTUDEERDE TECHNOLOGIEËN	25	4.2.1.2	– Vermogen	41
4.1	– AC-technologie	26	4.2.1.3	– Impact van een luchtlijn	41
4.1.1	– Bovengronds – luchtlijn	26	4.2.1.4	– Technologie toegepast op case study	41
4.1.1.1	– Geleiders	27	4.2.2	– Bovengronds – luchtlijn	42
4.1.1.2	– Masten	28	4.2.2.1	– Algemeen	42
4.1.1.2.1	– Functies van de masten	29	4.2.2.2	– Mastsilhouet	42
4.1.1.2.2	– Types van masten	30	4.2.2.3	– Technologie toegepast op case study	43
4.1.1.2.3	– Hoogte	31	4.2.3	– Ondergronds	44
4.1.1.3	– Technologie toegepast op de case study	31	4.2.3.1	– Kabel	44
4.1.2	– Ondergronds	31	4.2.3.2	– Technologie toegepast op de case study	45
4.1.2.1	– Kabel	31	4.2.3.3	– GIL	45
4.1.2.1.1	– Vermogen	32	4.2.3.4	– Supergeleider	45
4.1.2.1.2	– Reactieve energie bij AC-kabels	33	5	→ EVALUATIECRITERIA	47
4.1.2.1.3	– Spanningsopbouw en spanningsprongen	35	5.1	– Technisch	48
4.1.2.1.4	– Resonantie	35	5.1.1	– Betrouwbaarheid & beschikbaarheid	48
4.1.2.1.5	– Technologie toegepast op case study	36	5.1.2	– Impact op de netuitbating	48
			5.1.3	– Maturiteit	49
			5.1.4	– Flexibiliteit en aftakkingen	49
			5.1.5	– Opportuniteiten	49
			5.2	– Economisch	50
			5.2.1	– Investeringskost	50
			5.2.2	– Onderhoudskost	51
			5.2.3	– Netverliezen	51
			5.3	– Impact op milieu & omgeving	51

5.3.1	— Grondinname tijdens en na werken	51	6.4.1.1	— Luchtlijn	67
5.3.2	— Visuele impact	51	6.4.1.2	— Kabel	67
5.3.3	— Geluid	52	6.4.1.3	— GIL	67
5.3.4	— Magnetische velden	52	6.4.1.4	— Supergeleiders	67
5.3.5	— Broeikasgasemissies	53	6.4.2	— DC-technologie	67
6	→ TECHNISCHE ANALYSE	55	6.4.2.1	— VSC	67
6.1	— Betrouwbaarheid & beschikbaarheid	56	6.4.2.2	— LCC	68
6.1.1	— AC-technologie	56	6.4.3	— Conclusie	68
6.1.1.1	— Luchtlijn	56	6.5	— Opportuniteiten	69
6.1.1.2	— Kabel	57	6.5.1	— AC-technologie	69
6.1.1.3	— GIL	58	6.5.1.1	— Luchtlijn	69
6.1.1.4	— Supergeleiders	58	6.5.1.2	— Kabel	69
6.1.1.5	— PST	58	6.5.1.3	— GIL	69
6.1.2	— DC-technologie	58	6.5.1.4	— Supergeleiders	69
6.1.2.1	— LCC	58	6.5.2	— DC-technologie	69
6.1.2.2	— VSC	59	6.6	— Conclusie	71
6.1.2.3	— Verbinding	59	7	→ ECONOMISCHE ANALYSE	75
6.1.3	— Conclusie	59	7.1	— Investeringskost	76
6.2	— Impact op netuitbating	59	7.1.1	— Basisveronderstellingen AC-technologie	76
6.2.1	— AC-technologie	59	7.1.1.1	— Eindstations	76
6.2.1.1	— Luchtlijn	59	7.1.1.2	— Luchtlijn	76
6.2.1.2	— Kabel	60	7.1.1.3	— Kabel	76
6.2.1.3	— GIL	61	7.1.1.3.1	— Tunnel	77
6.2.1.4	— Supergeleiders	61	7.1.1.3.2	— Reactieve compensatie	77
6.2.1.4.1	— Complexiteit	61	7.1.1.3.3	— Tussenstations	77
6.2.1.4.2	— Netfenomenen	61	7.1.1.3.4	— Transformatie naar 220kV	78
6.2.1.4.3	— Kortsluitstroom	61	7.1.1.4	— GIL	78
6.2.1.4.4	— Netopbouw	62	7.1.2	— Basisveronderstellingen DC-technologie	78
6.2.2	— DC-technologie	62	7.1.2.1	— Conversiestations	78
6.2.2.1	— Conversiestations	62	7.1.2.2	— Luchtlijn	80
6.2.2.2	— Verbinding	63	7.1.2.3	— Kabel	80
6.2.3	— Conclusie	63	7.1.3	— Conclusie	80
6.3	— Maturiteit	64	7.2	— Jaarlijkse kost: netverliezen & onderhoudskost	82
6.3.1	— AC-technologie	64	7.2.1	— AC-technologie	82
6.3.1.1	— Luchtlijn	64	7.2.1.1	— Luchtlijn	82
6.3.1.2	— Kabel	64	7.2.1.2	— Kabel	82
6.3.1.3	— GIL	64	7.2.1.3	— GIL	83
6.3.1.4	— Supergeleiders	64	7.2.1.4	— PST	84
6.3.2	— DC-technologie	65	7.2.2	— DC-technologie	84
6.3.2.1	— Conversiestations	65	7.2.2.1	— Conversiestations	84
6.3.2.2	— Luchtlijn	65	7.2.2.2	— Luchtlijn	84
6.3.2.3	— Kabel	66	7.2.2.3	— Kabel	85
6.3.2.4	— GIL	66	7.3	— Totale annuïteit	86
6.3.2.5	— Supergeleiders	66			
6.3.3	— Conclusie	66			
6.4	— Aftakkingen	67			
6.4.1	— AC-technologie	67			

8	→ IMPACT OP MILIEU & OMGEVING	89
8.1	— Grondinname tijdens & na de werken	90
8.1.1	— AC-technologie	90
8.1.1.1	— Luchtlijn	90
8.1.1.2	— Kabel	90
8.1.1.3	— GIL	93
8.1.1.4	— PST	93
8.1.2	— DC-technologie	93
8.1.2.1	— Conversiestations	93
8.1.2.2	— Luchtlijn	93
8.1.2.3	— Kabel	93
8.1.3	— Overzicht	93
8.2	— Visuele impact	94
8.2.1	— AC-technologie	94
8.2.1.1	— Luchtlijn	94
8.2.1.2	— Kabel	95
8.2.1.3	— GIL	96
8.2.2	— DC-technologie	96
8.2.2.1	— Conversiestation	96
8.2.2.2	— Luchtlijn	96
8.2.2.3	— Kabel	97
8.3	— Geluid	97
8.3.1	— AC-technologie	97
8.3.1.1	— Luchtlijn	97
8.3.1.2	— Kabel	97
8.3.1.3	— GIL	97
8.3.2	— DC-technologie	97
8.3.2.1	— Conversiestation	97
8.3.2.2	— Luchtlijn	98
8.3.2.3	— Kabel	98
8.4	— Magnetische velden	98
8.4.1	— AC-technologie	98
8.4.1.1	— Luchtlijn	98
8.4.1.2	— Kabel	101
8.4.1.3	— GIL	102
8.4.2	— DC-technologie	102
8.5	— Broeikasgasemissies	102
8.5.1	— Elektrische verliezen	102
8.5.2	— SF ₆	102

9	→ HYBRIDE SYSTEMEN	105
9.1	— Technologie voor plaatselijk ondergronds brengen van AC-luchtlijn	106
9.1.1	— DC-kabels	106
9.1.2	— AC-GIL	106
9.1.3	— 220kV-kabels	107
9.1.4	— 380kV-kabels	107
9.2	— Afstand van de ondergrondse AC-kabelverbinding	107
9.2.1	— Beperkt overgangsstation	107
9.2.2	— Volledig overgangsstation	109
9.2.3	— Hoeveel keer ondergronds?	110
9.3	— Conclusie	111
10	→ CONCLUSIE	113
11	→ LIJST MET AFKORTINGEN	115



Niet-technische samenvatting

- 3.1 | Stevin-Avelgem (“Ventilus”)
- 3.2 | Avelgem-Centrum (“Boucle du Hainaut”)
- 3.3 | Eigenschappen van de verbinding
 - 3.3.1 | Vermogen
 - 3.3.2 | Spanning
 - 3.3.3 | Afstand
 - 3.3.4 | Belasting



Niet-technische samenvatting

PROCES

Deze technologiestudie werd door Elia opgesteld vanuit haar expertise als transmissienetbeheerder. Elia heeft over de inhoud van voorliggende technologiestudie van gedachten gewisseld met andere netbeheerders in het kader van organisaties zoals ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) en CIGRE¹. Er vonden ook uitwisselingen plaats - voornamelijk confidentiële - met de belangrijkste leveranciers van de bestudeerde technologieën.

De studie werd ook voorgelegd aan een academische stuurgroep samengesteld uit professoren van de KULeuven, UGent, Université Catholique de Louvain, UMons en de Université Libre de Bruxelles. In een tweede fase zal Elia over deze technologiestudie een formeel advies inwinnen. Hierna volgt de niet-technische samenvatting van deze studie.

INLEIDING

Voor België is de energietransitie een opportuniteit om naar een Europees geïntegreerd elektriciteitssysteem te evolueren met een groeiend aandeel hernieuwbare energiebronnen, waarbij het volledige binnenlandse potentieel wordt gevaloriseerd en wordt aangevuld met elektriciteit die via extra interconnecties wordt ingevoerd. Om de voordelen van de energietransitie volop te benutten, is het belangrijk dat Elia de netinfrastructuur tijdig kan opleveren. Dat vraagt een netontwikkeling die op trends anticipeert en op de nodige ondersteuning kan rekenen.

Deze proactieve netontwikkeling berust op diverse projecten. Bij deze technologiestudie gaat de aandacht naar twee verbindingen die voor de verdere uitbouw en

versterking van de interne backbone (de autosnelweg van het elektriciteitsnet) zullen zorgen:

- De versterking van de as westen-centrum door de aanleg van een nieuwe verbinding vanuit Avelgem naar het centrum, de zogenoemde *Boucle du Hainaut*, die noodzakelijk is om interne bottlenecks te vermijden en de verdere integratie van hernieuwbare energie met intensieve uitwisselingen over de grenzen zal mogelijk maken.
- De nieuwe verbinding, *Ventilus*, tussen Stevin en Avelgem met als doel de nieuwe offshore windparken aan te sluiten, het netwerk robuuster te maken, nieuwe onshore productie aan te sluiten in West-Vlaanderen en een tweede onderzeese verbinding met het Verenigd Koninkrijk mogelijk te maken.

Deze twee verbindingen worden samen met de bijhorende achterliggende hypothesen gedetailleerd toegelicht in een afzonderlijke ambitienota alsook in het Federaal Ontwikkelingsplan². Voorliggende technologiestudie vergelijkt verschillende technologieën op basis van diverse beoordelingscriteria en bepaalt op het einde welke technologie geschikt is voor *Ventilus* en *Boucle du Hainaut*.

De verbindingen die in deze studie aan bod komen, hebben elk een afstand die schommelt tussen de 50 km à 100 km. De afstand kan variëren vermits de definitieve tracés tot op heden nog niet gekend zijn. Verder heeft elke verbinding ook een capaciteit van 6GW. De verbindingen maken ook deel uit van de Belgische backbone (de belangrijkste hoogspanningsverbindingen) en spelen dus een cruciale rol voor het transport van grote vermogens die aan een duurzaam, betrouwbaar en betaalbaar energiesysteem bijdragen.

1

CIGRE is een wereldwijde organisatie die zich inzet voor de gemeenschappelijke ontwikkeling en het delen van expertise op het gebied van energiesystemen. Voor meer informatie: <https://www.cigre.org/GB/about/introducing-cigre>

2

www.elia.be/~media/files/Elia/publications-2/Public-Consultation/2018/FDP/181008_BOOK_ELIA_NL_BrochurePlanFederal.pdf maart 1981.

Zowel de Ventilus als de “Boucle du Hainaut” hebben dezelfde karakteristieken en de analyse is voor beide verbindingen gelijklopend. In deze studie spreken we over de usecase, en die verwijst ofwel naar de “Ventilus”, ofwel naar de “Boucle du Hainaut”. Wanneer we beide verbindingen samen in beschouwing nemen, wordt dit expliciet vermeld.

De analyses zijn alleen voor de usecases van toepassing en kunnen niet veralgemeend worden naar andere projecten. De analyse gebeurt ook op basis van de elementen die vandaag gekend zijn en het resultaat van de analyse is dan ook de technologie die op dit ogenblik het meest geschikt is voor Ventilus en Boucle du Hainaut.

DE BESTAANDE TECHNOLOGIEËN

De bestudeerde technologieën worden opgedeeld in twee families: de AC-(wisselstroom)- en DC-(gelijkstroom)technologie. Het Europese en dus ook het Belgische elektriciteitsnet is gebaseerd op wisselstroom, waarbij stroom en spanning 50 keer per seconde heen en weer wisselen van richting (50Hertz). Een AC-netwerk kan op eenvoudige en efficiënte wijze (door middel van transformatoren) de spanning transformeren van hoge spanningen, geschikt voor het transport van elektriciteit, naar lagere spanningen, geschikt voor machines en huishoudelijke toestellen. Het AC-netwerk wordt driefasig uitgevoerd, dat wil zeggen dat elk circuit uit drie van elkaar geïsoleerde geleiders (kabels/lijnen) bestaat.

Bij DC of gelijkstroom vloeien de stroom steeds in dezelfde richting en blijft de spanning constant³. Dit impliceert dat gelijkstroom moet worden omgezet in wisselstroom (AC), omdat het Europese (en dus ook Belgische) net uitgebaat wordt in wisselstroom. De omzetting van DC naar AC en vice versa gebeurt in een conversiestation. Een DC-netwerk wordt tweefasig

uitgevoerd, elk circuit bestaat uit twee van elkaar geïsoleerde geleiders (kabels/lijnen).

De studie bestudeert twee types van conversiestations namelijk de VSC (Voltage Source Converters) en de LCC (Line Commutated Converters). Een LCC-conversiestation maakt aftakkingen (analogie met autostrade: op- en afritten) quasi onmogelijk, neemt een dubbel zo grote oppervlakte in en produceert meer geluid dan het VSC-station. Bijkomend werkt het LCC-conversiestation niet bij zwakkere netten (bv. netten die een doodlopend einde hebben), is het minder betrouwbaar en beschikbaar door onderhoud en herstellingen. In de technologiestudie komt het LCC-conversiestation uitvoerig aan bod maar in deze samenvatting ligt de focus op het VSC-station.

Binnen beide technologieën (AC en DC) wordt een onderscheid gemaakt tussen enerzijds een bovengrondse luchtlijn en anderzijds ondergrondse technologieën zoals kabels, GIL (Gas Insulated transmission Lines) en supergeleiders.

Bij de luchtlijn fungeert lucht als isolator en kenmerkend is de aanwezigheid van masten/pylonen waaraan verschillende circuits (verschillende sets van 2 of 3 geleiders bij respectievelijk DC en AC) kunnen hangen. De afstand tussen de geleiders is afhankelijk van het gebruikte spanningsniveau. Bij hogere spanningsniveaus moeten de geleiders dus verder uit elkaar worden geplaatst omdat er meer elektrische isolatie nodig is.

De ondergrondse kabel wordt meestal geïsoleerd door XLPE (cross linkedpolyethyleen). Bij verbindingen op het land is bij hoogspanning voor elke fase een afzonderlijke kabel nodig. Kenmerkend bij AC-kabels is dat er veel reactieve energie geproduceerd wordt die gecompenseerd dient te worden. Dit gebeurt door middel van het plaatsen van shuntreactoren (spoelen) op de uiteinden en in tussenstations. DC-kabels genereren geen reactief vermogen en daarom zijn shuntreactoren en de bijhorende tussenstations niet noodzakelijk.

3

Opmerking: dit geldt enkel zolang de te transporteren energie in dezelfde richting moeten vloeien. Indien deze omkeert, zal ofwel de stroom van richting veranderen, ofwel de spanning ompolen.

De GIL bestaat uit met gas gevulde buizen die in een tunnel worden geplaatst. De isolatie gebeurt met een gasmengsel dat uit 20% SF₆ en 80% N₂ bestaat. Bij de AC-technologie zijn er drie buizen per circuit en bij de DC-technologie twee buizen.

Bij zeer lage temperaturen wordt de elektrische weerstand van sommige materialen quasi nul en kunnen deze dan een groot vermogen transporteren. Dit fenomeen wordt suprageleiding genoemd. Een supra-geleider kan hierdoor in theorie op eenzelfde spanning grotere vermogens transporteren dan een klassieke kabel. Om de lage temperaturen te bereiken (+/- 200°C onder nul) moet continu vloeibaar stikstof of zelfs vloeibaar helium door de kabel worden gepompt. Voor de isolatie kan een vast materiaal zorgen, net zoals bij klassieke kabels, maar ook vloeibare stikstof kan als isolatie fungeren.

EVALUATIECRITERIA

Allereerst wordt een technische analyse uitgevoerd, vervolgens een economische en tenslotte wordt de impact van de technologieën op het milieu en de omgeving beschreven. Op basis van de technische vereisten wordt bepaald of een of een technologie op dit moment technisch haalbaar is en of deze geschikt is voor de use-case (Ventilus of Boucle du Hainaut). Onder de technische analyse vallen volgende criteria:

- Betrouwbaarheid & beschikbaarheid: doen er zich vaak incidenten voor en hoe hoog is de beschikbaarheid van de technologie?
- Impact op de netuitbating: kan het net op een zekere, efficiënte en veilige manier uitgebaat worden?
- Maturiteit: werden/worden er gelijkaardige projecten (afstand en vermogen) gerealiseerd?

- Aftakkingen: kunnen er “eenvoudig” nieuwe bouwblokken langsheen de verbinding in het net bijgeplaatst worden, bijvoorbeeld een injectie naar een lager spanningsniveau

Voor de use-case wordt gekeken of een technologie aan deze criteria kan voldoen.

Vervolgens wordt een economische analyse uitgevoerd. Hierbij wordt gekeken naar de investerings- en onderhoudskost alsook naar de kost van de netverliezen voor de volledige verbinding. Voor de volledigheid worden er ook technologieën vermeld die technisch niet geschikt zijn voor deze use-case.

De impact op het milieu en de omgeving wordt beschreven aan de hand van criteria zoals grondinname (zowel tijdens als na realisatie), de visuele impact, het geluid, de aanwezigheid van magnetische velden en de broeikasgasemissies. Dit milieu en omgevingsaspect wordt niet in aanmerking genomen om de geschikte technologie voor de use-case te bepalen.

CONFIGURATIE VAN DE TECHNOLOGIEËN

Per technologie worden volgende configuraties verondersteld:

- AC-luchtlijn: de verbinding bestaat uit compacte masten en wordt uitgebaat op 380kV en heeft 2 circuits (2 x 3 geleiders) van 3GW (cfr. gebruikte technologie bij het Stevin project).
- DC-luchtlijn (met VSC-conversiestation):
 - Om te kunnen werken met 2 circuits van elk twee geleiders (2x2 geleiders) en rekening houdend met het gevraagde vermogen is er een spanning nodig van ±500kVdc. In dit geval kan een gelijkaardige mast als voor de AC-luchtlijn gebruikt worden en zijn 4 conversiestations nodig.

- Ook een variant op een lagere spanning, nl. ± 320 kVdc wordt bestudeerd in de technologiestudie, maar dan zijn er 8 conversiestations en 2 mastenrijen nodig (of één complexe mast) om het vermogen te bereiken, wat gelet op de impact op de omgeving en economisch gezien niet interessant is. In deze samenvatting wordt hierop dan ook niet in detail ingegaan.
- **AC-kabels:**
 - De transportcapaciteit van AC-kabels is beperkt en daarom zijn op 380kV 6 circuits (dus 6 x 3 geleiders/kabels) nodig die op een zeker afstand van elkaar onder de grond worden geplaatst. Tussenstations en shuntreactoren zijn noodzakelijk om het reactief vermogen van de kabels te compenseren.
 - In de technologiestudie wordt ook een kabelverbinding op 220kV bestudeerd. Omdat het reactief vermogen minder is bij een lagere spanning, kunnen de tussenstations bijna dubbel zo ver uit elkaar geplaatst worden. Er zijn dan wel 10 circuits (10 x 3 geleiders) nodig en aan beide uiteinden transformatoren, wat een belangrijke impact heeft op het ruimtegebruik. In deze samenvatting gaan we hier niet dieper op in.
- DC-kabels zijn net als AC-kabels beperkt in vermogen. Om het aantal parallelle systemen te beperken wordt enkel ± 500 kV bestudeerd. Hierdoor zijn 4 circuits (4 x 2 kabels) nodig om 6 GW te bekomen. Er moeten 4 conversiestations worden voorzien waarbij de circuits 2 per 2 gebundeld worden.
- AC-/DC-GIL: twee circuits met 3 en 2 geleiders voor respectievelijk de AC- en DC-GIL zullen voldoende zijn om de 6GW te kunnen realiseren, op voorwaarde dat deze in een gekoelde tunnel worden geplaatst.
- Supergeleiders: hypothetisch gezien zouden hiervoor 2 circuits nodig (2x3 geleiders en 2x2 geleiders).

TECHNISCHE ANALYSE

Als er een nieuwe verbinding gebouwd wordt over 50 à 100km met een capaciteit van 6GW en 3GW gegarandeerd bij onderhoud of incident, is het van belang dat deze verbinding goed functioneert, een hoge beschikbaarheid heeft, zo weinig mogelijk risico's met zich meebrengt voor de netuitbating, betrouwbaar is en dus voldoet aan de criteria die vooropgesteld worden.

Het technische aspect wordt in de technologiestudie meer in detail uitgewerkt. Aangezien de informatie voor elke technologie die aan bod komt, zeer specifiek is en de nodige nuancering vraagt, worden hier alleen de hoofdboodschappen opgenomen. We benadrukken nogmaals dat de analyse ook alleen van toepassing is voor de use-case en niet veralgemeend kan worden naar andere projecten.

Voor de AC- en DC-supergeleiders en de DC-GIL stellen we vast dat deze nog niet beschikbaar zijn op de markt voor onze use-case en ook de AC-GIL nog zeer onmatuur is. Labo-onderzoek is nog lopende, er werden hooguit nog maar enkele pilotprojecten op lagere spanning, met kleinere capaciteit en/of voor een kortere afstand gerealiseerd. Door de beperkte maturiteit en onbestaande kennis over deze technologieën is het dan ook niet aanvaardbaar en technisch haalbaar om deze te integreren in onze backbone. Bijgevolg zullen deze technologieën in deze samenvatting niet meer worden besproken.

De AC-kabel werd tot op heden nog niet gerealiseerd voor een dergelijke afstand (50 à 100km) en/of dergelijk vermogen (6GW). Voor het Stevin-project werd een afstand van 10km gerealiseerd voor een kleiner vermogen. De combinatie van kabels en shuntreactoren zorgt voor fenomenen (zoals harmonische frequenties) die in

het systeem optreden en de stabiliteit van het net in gevaar kunnen brengen. Gelet dat deze verbinding deel zal uitmaken van onze backbone primeert de veilige netuitbating. Op basis van de technische criteria is deze technologie niet haalbaar voor de use-case.

Een DC-verbinding heeft een aantal voordelen: zo is er bijvoorbeeld nauwelijks een limiet op de lengte van een ondergrondse kabel en kan het vermogen volledig gestuurd worden in de gewenste richting. Voor andere Elia-projecten worden deze technologieën al ingezet zoals bij Alegro en de SuedOstLink (Duitsland). De karakteristieken (vermogen, afstand, functionaliteiten, aftakkingen, ...) van deze projecten zijn echter niet te vergelijken met deze van de use-case.

Specifiek voor deze use-case zijn de bevindingen van deze studie dat een DC-verbinding (luchtlijn of kabel) met de huidige stand van de technologie geen geschikte oplossing is en dit om verschillende redenen: te weinig flexibiliteit om aftakkingen (o.a. verbindingen met lokale netten) te realiseren, een lagere beschikbaarheid en risico's op netfenomenen.

De AC-luchtlijn is een gekende technologie die wereldwijd al verschillende decennia wordt gebruikt en dus een hoge maturiteit heeft. Vermits het Belgische hoogspanningsnet alsook het Europese net bijna volledig is opgebouwd uit uitrustingen op basis van AC-technologie, is het integreren van een bijkomende AC-luchtlijn relatief eenvoudig te realiseren. Bovendien hebben deze verbindingen een goede betrouwbaarheid en beschikbaarheid. Verder zijn aftakkingen zeer eenvoudig te realiseren, wat resulteert in een hoge flexibiliteit voor de toekomst.

Uit de technische analyse en gebaseerd op de technische criteria, kunnen we concluderen dat de AC-luchtlijn, gelet op de stand van zaken van de technologie, de geschikte technologie is voor de use-case. We herhalen nogmaals dat de technologie specifiek is

voor Ventilus en Boucle du Hainaut en dus voor de volledige verbinding. Een technologie kan wel geschikt zijn voor een korte/lagere afstand en/of beperktere capaciteit maar niet voor de beschouwde verbinding.

ECONOMISCHE ANALYSE

De economische analyse geeft een overzicht van de investerings- en onderhoudskost alsook de kost van de netverliezen³ per jaar voor een 6GW-verbinding over 75km (gemiddelde afstand genomen voor de verbinding). Ter illustratie wordt er in de studie ook een inschatting gemaakt van de kosten voor de technologieën die technisch niet haalbaar zijn. De cijfers opgenomen zijn inschattingen van de technologieën in hun goedkoopste samenstelling.

Voor de volledigheid wordt de investeringskost van de DC-kabel en -luchtlijn ook berekend en deze ligt respectievelijk 11 maal en 9 maal hoger dan de AC-luchtlijn die technisch te verkies is voor deze use-case. Bij de DC-technologie wordt de hoge kostprijs voornamelijk verklaard door de aanwezigheid van de conversiestations (2/3de van de prijs). De AC-kabel en de AC-GIL, waarvoor de technische analyse ook ongunstig is, hebben een investeringskost die respectievelijk 6 tot 7 keer hoger ligt dan deze van de AC-luchtlijn. Voor de AC-kabel werd er bovendien uitgegaan van het best-case scenario waarbij er maar één tussenstation nodig zou zijn.

De AC-luchtlijn heeft in vergelijking met alle technologieën de laagste onderhoudskost en kost voor netverliezen. Bij de DC-luchtlijn en -kabel liggen deze aanzienlijk hoger dan bij de AC-luchtlijn omdat de conversiestations meer onderhoud met zich mee brengen en voor grote netverliezen zorgen.

De AC-luchtlijn komt dus globaal gezien als goedkoopste technologie uit de vergelijking.

4

Bij transport van elektriciteit gaat altijd een (klein) deel van de elektriciteit verloren. Dit verlies wordt onder andere veroorzaakt door de weerstand in de geleiders en in de hoogspanningsuitrustingen.

OMGEVING & MILIEU

Een nieuwe verbinding heeft uiteraard ook een impact op de omgeving en het milieu. In de studie worden verschillende aspecten beschreven zonder hieraan een beoordeling van “beste” technologie te koppelen vermits zo’n beoordeling moeilijk te objectiveren valt. De impact van elke technologie wordt ter informatie beschreven niettegenstaande dat uit de technische en economische analyse voortvloeit dat de AC-luchtlijn de toe te passen technologie is voor de use-case.

→ Grondinname en gebruik van de corridor

De grondinname tijdens en na de werken is sterk verschillend voor de technologieën. Bij de AC-kabel is er nood aan een werfzone van 70 meter terwijl een DC-kabel ongeveer 40 meter is. Bij de AC- en DC-luchtlijn wordt een werfzone van 50m op 50m voorzien rond de pylonen.

Na de werken zal bij de AC-en DC-luchtlijn een blijvende grondinname zijn door de pylonen. Bij de DC-technologieën nemen de conversiestations blijvend een aanzienlijke ruimte in. Voor deze verbinding zijn langs elke zijde van de verbinding 2 conversiestations nodig (dus 4 in totaal). Langs elke zijde zal dit 6ha tot 9ha in beslag nemen of dus in het totaal tussen de 12ha à 18ha (of 24 à 36 voetbalvelden).

Bij de AC-kabel zal het tussenstation met de 42 shuntreactoren ook de nodige ruimte in beslag nemen. Afhankelijk van het spanningsniveau waarop de AC-kabel wordt uitgebaat, zal een totale oppervlakte vanaf 12ha tot 33ha (24 tot 66 voetbalvelden) nodig zijn.

Na de werken wordt het gebruik van de corridor bij een luchtlijn beperkt door de aanwezigheid van de pylonen. Maar onder de corridor zelf kan landbouw doorgaan en kan er gebouwd worden indien de pylonen voldoende verhoogd zijn. Er moet wel gewaarborgd worden dat de bomen niet te dicht bij de luchtlijn komen. Bij de AC – en

DC-kabel is het grondgebruik na het plaatsen van de kabel gelimiteerd: op het terrein dat erboven ligt, mag niet meer gebouwd of gestapeld worden en ook verscheidene landbouwactiviteiten zijn niet meer mogelijk en dit voor een breedte van respectievelijk 20, 5 en 6 meter.

→ Visuele impact

Indien een DC-luchtlijn op hogere spanning ($\pm 500\text{kV}_{\text{dc}}$) wordt uitgebaat, is de minimale afstand tussen de geleiders groter dan bij de AC-luchtlijn. Ondanks het feit dat er bij DC maar 2 geleiders per circuit zijn, blijft een $\pm 500\text{kV}_{\text{dc}}$ mast dus minstens even groot als een 380kV_{ac} mast. Voor een $\pm 320\text{kV}$ DC-luchtlijn zijn de afstanden tussen de geleiders vergelijkbaar met een 380kV AC-luchtlijn maar om de 6GW te leveren, zijn er 4 circuits (4 x 2 geleiders) nodig, wat 2 mastenrijen impliceert of één zeer brede mast. Ongeacht of het AC- of DC-luchtlijnen zijn, schommelt de hoogte van de mast rond 50 meter.

Bij de DC-technologieën zorgen de grote conversiestations (4 in totaal) voor een aanzienlijke visuele impact. De stations zijn een 20-tal meter hoog en nemen ook veel ruimte in beslag.

→ Geluidshinder

Qua geluid kan er bij de luchtlijn een beperkt corona-effect (knetterend geluid van de geleiders bij vochtig weer) optreden. Dit is bij de compacte AC-luchtlijn beperkter dan bij de klassieke luchtlijnen 380kV dankzij het gebruik van nieuwe technologieën. Bij de DC-luchtlijn zal dit corona-effect sterker zijn en om dit onder controle te houden bestaat de kans dat er bijkomende geleiders geplaatst moeten worden. Bij de DC-oplossingen zorgt het conversiestation voor het bijkomende omgevingslawaai. Bij de AC-kabel is er ook een grote geluidshinder te verwachten van de shuntreactoren die geplaatst zullen worden. Tot slot heeft de GIL op regelmatige afstanden op het

traject koelinstallaties nodig met bijhorende geluidsproductie.

→ **Magnetische velden**

Met betrekking tot de magnetische velden heeft een compacte AC-luchtlijn lagere waarden dan de klassieke AC-luchtlijn. De AC-kabels genereren hogere pieken op het terrein gelegen boven deze kabel, maar de velden nemen sneller af dan bij de AC-luchtlijn. De GIL heeft de laagste waarden omdat de velden grotendeels afgeschermd worden door de wand van de buizen. Bij de DC-technologie zijn er geen wisselende magnetische velden aanwezig. Ongeacht de technologie worden de wettelijke bepalingen met betrekking tot magnetische velden nageleefd.

→ **Broeikasgasemissies**

De AC-GIL en de AC-luchtlijn hebben de laagste broeikasgasemissies uitgedrukt in ton CO₂/jaar rekening houdend met de kenmerken met de karakteristieken van de use-case. Daarna volgt de AC-kabel.

GEDEELTELIJKE ONDERGRONDS BRENGEN VAN AC-LUCHTLIJN

De enige redelijke uitvoering (technisch en economisch) voor de use-case is een AC-luchtlijn. Het ondergronds brengen van een deel van de AC-luchtlijn kan met AC-kabels met extra technische risico's en een aanzienlijke meerkost (12,6M€/km). De AC-kabels hebben een impact op het milieu en de omgeving. Op de plaatsen waar de kabel overgaat in een lijn en vice versa wordt er grond ingenomen. Bijkomend zullen er ook shuntreactoren geplaatst moeten worden om het reactief vermogen te compenseren. Deze installaties brengen geluidshinder met zich mee.

De afstand bij gedeeltelijke verkabeling wordt bepaald door technische limieten die gebaseerd zijn op de spanningsstijgingen die beperkt moeten worden en de beheersbaarheid van neteffecten (dynamische effecten of resonanties). De combinatie hiervan leidt tot een afstand van 8 km geografische trajectlengte equivalent aan 48 km kabelcircuit per use-case. Het is het aantal effectieve km kabel dat ondergronds wordt geplaatst dat bepalend is voor het gedrag van de kabel in het elektriciteitsnet. Het ondergronds brengen van de luchtlijn wordt best zo weinig mogelijk opgesplitst en in één tot twee keer per use-case gerealiseerd om een verhoogde faalkans van de verbinding te vermijden.





Inleiding en doelstelling

Dit document heeft tot doel verschillende technologieën te vergelijken voor één bepaald project, genaamd de “Boucle du Hainaut”), dat Elia in de toekomst wenst uit te voeren. Deze technologieën dienen te voldoen aan bepaalde technische vereisten en de beoordeling gebeurt op basis van verschillende criteria.

In het 1^{ste} hoofdstuk wordt toelichting gegeven bij de energietransitie in België die aanleiding geeft tot de realisatie van enerzijds *Stevin-Avelgem* (“*Ventilus*”) en anderzijds *Avelgem-Centrum* (“*Boucle du Hainaut*”). Deze technologiestudie, die de mogelijke technologieën met elkaar vergelijkt, wordt uitgevoerd in het kader van de twee projecten Boucle du Hainaut en Ventilus. In dit hoofdstuk worden beide projecten ook meer in detail beschreven en de basisveronderstellingen waar de technologieën een passend antwoord op moeten bieden, worden hier ook medebepaald. Deze twee projecten worden ook in het Federaal Ontwikkelingsplan 2020-2030 besproken.

Het 2^{de} hoofdstuk geeft een high-level beschrijving van de verschillende technologieën. Hieronder vallen de luchtlijnen, kabels, *Gas-Insulated* transmissielijnen (GIL), supergeleidende kabels alsook hybride systemen.

Het 3^{de} hoofdstuk focust op de criteria waarop de verschillende technologieën geëvalueerd zullen worden. De criteria maken deel uit van drie grote luiken: de technische analyse, de impact op het milieu en de omgeving en de economische analyse. Bij de technische analyse wordt o.a. gekeken naar de vermogens die getransporteerd kunnen worden, de maturiteit van de technologie, de inpassing ervan in het net alsook eventuele extra opportuniteiten. De impact op het milieu en de omgeving omvat criteria zoals bodembebruik, visuele aspecten, geluidshinder, magnetische velden alsook de CO₂-impact (indien van toepassing). De economische analyse houdt rekening met de globale investeringskost (CAPEX), de kost van het onderhoud alsook de kost die de elektrische verliezen met zich meebrengen.

In het 4^{de} hoofdstuk analyseren we elke technologie op basis van de eerder beschreven criteria.

In het laatste hoofdstuk wordt de volledige analyse nog eens samengevat en wordt een conclusie geformuleerd. Deze conclusie geeft aan welke preferentiële technologie voor het concrete project Elia naar voren zal schuiven.

Elia wenst de lezer er op attent te maken dat de analyse alleen van toepassing is op de use-case en dus niet veralgemeend kan worden naar andere projecten. We houden ook rekening met de huidige stand van zaken voor de verschillende technologieën.

Om de analyse te kunnen uitvoeren, dienen we ook verschillende veronderstellingen te maken. Deze worden in de tekst nog verder uitgewerkt.



Use case

- 3.1 | Stevin-Avelgem (“Ventilus”)
- 3.2 | Avelgem-Centrum (“Boucle du Hainaut”)
- 3.3 | Eigenschappen van de verbinding
 - 3.3.1 | Vermogen
 - 3.3.2 | Spanning
 - 3.3.3 | Afstand
 - 3.3.4 | Belasting



Use case

Het Belgische transmissienet speelt een belangrijke rol in het faciliteren van de transitie van de energiemix in België én in de andere landen rondom de Noordzee.

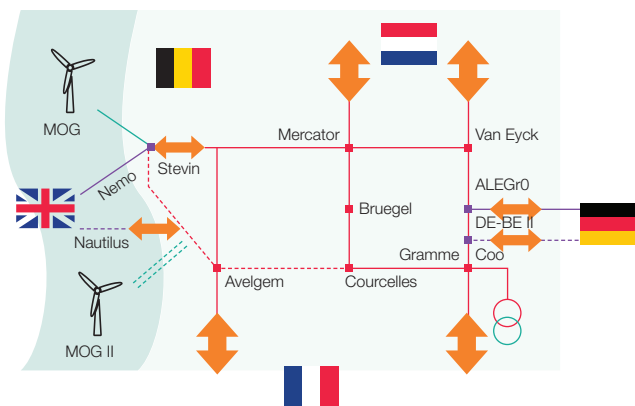
Waar vroeger het 380kV-net voornamelijk diende om het vermogen van grote centrales te transporteren naar de binnenlandse consument, dient het net nu en in de toekomst te evolueren zodat het meer internationale fluxen en hernieuwbare energieproductie vanuit de Noordzee kan transporteren. De nieuwe verbindingen Stevin-Avelgem en Avelgem-Centrum komen tegemoet aan de behoefte om 6GW transportcapaciteit te voorzien tussen de kust en het centrum van het land.

Bij de ontwikkeling van deze nieuwe verbindingen wordt steeds gekozen voor een oplossing die, in verhouding tot de kost, de meeste baten oplevert. Hier spelen zowel het tegemoet komen aan verschillende (toekomstgerichte) behoeften als de technologiekeuze een belangrijke rol.

3.1 STEVIN-AVELGEM (“VENTILUS”)

De belangrijkste drijfveren voor het Ventilus-project zijn:

1. Nood om de hernieuwbare energie van de toekomstige **offshore windparken**, bovenop de bestaande en tegen 2020 geplande windparken, op het Belgische elektriciteitsnet aan te sluiten.
2. Ontwikkelen van een **robuuster netwerk** in de regio. Het belang van de kustregio als toegang tot het hernieuwbare energiepotentieel van de Noordzee neemt aanzienlijk toe bij de energietransitie. Een vermazing met de huidige Stevin-as is noodzakelijk om de onthaalcapaciteit te maximaliseren en de betrouwbaarheid van het net te verzekeren.
3. Onthaalcapaciteit ontwikkelen voor **nieuwe onshore** energieproductie in West-Vlaanderen.
4. Mogelijkheid om een **tweede onderzeese verbinding** met het Verenigd Koninkrijk aan te sluiten en zo bij te dragen aan de verdere integratie van de Europese elektriciteitsmarkt.



→ **Figuur 1**
 Investeringspelen 380kV-net uit Federaal Ontwikkelingsplan

Vorstudies wijzen nu reeds uit dat de totale onthaalcapaciteit op het 380kV net voor de regio West-Vlaanderen sterk toeneemt. Om aan deze drijfveren te beantwoorden met het oog op de verdere ontwikkeling van een duurzame toekomst werden netstudies uitgevoerd. Deze concludeert dat de aanleg van een 6GW-verbinding tussen het Stevin-station in Zeebrugge en Avelgem noodzakelijk is om een betrouwbare uitbating van het net en energietransport voor België te verzekeren.

3.2 AVELGEM-CENTRUM (“BOUCLE DU HAINAUT”)

De belangrijkste drijfveren voor Boucle du Hainaut zijn de toenemende noden aan transportcapaciteit tussen het westen en het centrum van België door:

1. Groeiende opportuniteiten voor de import van energie aan gunstige groot-handelsprijzen, aangezien het aandeel hernieuwbare energie in de productiemix van Frankrijk en Groot-Brittannië aanzienlijk toeneemt.
2. Ontwikkeling van het potentieel aan hernieuwbare energie in de Noordzee en de kustregio.
3. Mogelijke ontwikkeling om een tweede onderzeese verbinding met het Verenigd Koninkrijk aan te sluiten.

Bovendien heeft dit project ook tot doelde betrouwbaarheid van het regionale net in Henegouwen verzekeren en versterken om te kunnen inspelen op de stijgende energiebehoefte van de gemeenschap en bedrijven in de regio. Deze nieuwe verbinding kan met het 150kV-net in het westen van Henegouwen verbonden worden. Deze regio, die vanuit Avelgem en Courcelles wordt gevoed, vertegenwoordigt reeds een grote belasting en heeft een aanzienlijk groeipotentieel.

Netstudies tonen aan dat de aanleg van een nieuwe 6GW-verbinding tussen Avelgem en het centrum van het land noodzakelijk is om

een antwoord te bieden op de bijkomende transportnoden van de toekomst.

3.3 EIGENSCHAPPEN VAN DE VERBINDING

Bij het transport van elektriciteit is het van belang te weten hoeveel elektriciteit (vermogen) over welke afstand vervoerd moet worden. Bijkomend moet men weten op welke spanning deze elektriciteit efficiënt getransporteerd wordt.

3.3.1 Vermogen

Om de uitbouw van een robuust net op een efficiënte manier mogelijk te maken, is de structuur van het net vermaasd. Elke nieuwe verbinding die wordt toegevoegd, bouwt voort op bestaande sterke knooppunten en de verbinding(en) tussen deze knooppunten. Als er een incident is op één van de verbindingen of een verbinding in onderhoud is, dan zorgt de vermaasde structuur ervoor dat de elektriciteit via de overblijvende verbindingen getransporteerd wordt.

Elk project van de use-case zal parallel lopen met een reeds bestaande verbinding van het vermaasde net: “Ventilus” met de verbinding Stevin (Zeebrugge) – Horta (Zomergem) en “Boucle du Hainaut” met de verbinding Horta (Zomergem) – Mercator (Kruibeke). Deze bestaande verbindingen bestaan grotendeels uit 2 circuits met een transportcapaciteit van +/- 3 GW per circuit.⁵

Door de vermazing kunnen deze parallelle verbindingen elkaar ondersteunen in het geval van een netincident of bij een onderhoud, waardoor de betrouwbaarheid verhoogt en maximale transportcapaciteit van beide verbindingen samen groter is dat deze van twee afzonderlijke verbindingen zonder vermazing.

Om nog optimaler gebruik te maken van het vermaasde net kan men op goed gekozen plaatsen in het net installaties plaatsen die

5

Een project is in uitvoering om de verbinding tussen Horta en Mercator te versterken naar 2 x 3GW tegen eind 2019.

het vermogen kunnen sturen. Hierdoor kan het te transporteren vermogen beter verdeeld worden over parallele verbindingen. Voorbeelden van zulke installaties zijn Phase shifting transformers (PST's) in AC-netten en de conversiestations tussen AC- en DC-netten.

In geval van onderhoud of incident op het hoogspanningsnet moet nog steeds een veilig en betrouwbaar energietransport verzekerd blijven. Dit is een belangrijke voorwaarde bij het ontwikkelen en uitbaten van het 380 kV-net, de ruggengraat van het hoogspanningsnet in België.

Voor zowel "Ventilus" als "Boucle du Hainaut" tonen netstudies aan dat:

- De nieuwe verbindingen een bijkomende transportcapaciteit dienen te creëren van 6GW om een antwoord te bieden op de transportnoden van de toekomst rekening houdend met mogelijke onbeschikbaarheden op het bestaande, omringende net.
- In geval incident of onderhoud op deze nieuwe verbindingen minimum 3 GW transportcapaciteit beschikbaar moet blijven rekening houdend met de transportcapaciteit van het bestaande, omringende net.
- Installaties die het vermogen kunnen sturen zullen een positieve bijdrage hebben, maar op het moment van het

schrijven van deze studie is niet bevestigd dat deze strikt noodzakelijk zijn. Het net is echter continu in ontwikkeling, waardoor we wel moeten rekening houden dat deze installatie in de toekomst wel noodzakelijk worden. Verder in deze studie zal het sturen van vermogens daarom als een optie worden behandeld.

De verbinding van 6 GW dient dus uit 2 of meerdere circuits te bestaan van maximum 3 GW per circuit.

Er is bovendien nog een technische reden waarom een circuit beperkt moet worden tot 3GW: op bepaalde plaatsen moeten koppelingen gemaakt worden met het bestaande 380 kV-net. Nieuwe onderstations 380 kV (en de uitrusting hiervoor) zijn op de markt beschikbaar tot 5000 A, wat resulteert in een maximaal vermogen per circuit van +/-3 GW.

Bijgevolg is er de basisveronderstelling dat er minstens met **een dubbele verbinding van 2 x 3 GW** gewerkt zal worden. Bijkomend kan men ook meerdere kleinere circuits overwegen, bijvoorbeeld 6 x 1 GW, om zo aan het totale vermogen van 6 GW te geraken.

	AC		DC ⁶	
Nominale spanning (Un)	380 kV	220 kV	±320 kV	±500 kV
Maximaal toegelaten spanning (Um)	420 kV	245 kV	±336 kV (Un +5%)	±525 kV (Un +5%)
Exploitatie- of uitbatingsspanning	400 kV	225 kV	±320 kV	±500 kV

⁶ Andere spanningsniveaus zijn mogelijk

⁷ Deze afstanden zijn grootteordes waarop de studie van toepassing is.

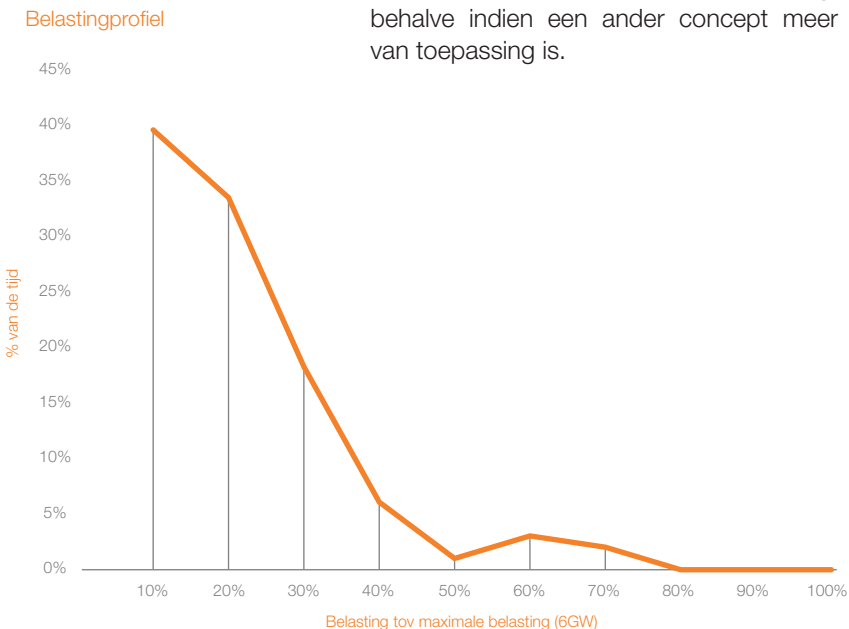
↑ **Tabel 1**
Spanningsniveaus

3.3.2 Spanning

Voor eenzelfde spanningsniveau kunnen verschillende concepten qua spanning worden bepaald:

- Maximaal toegelaten spanning (U_m) om de installatie te dimensioneren (voor de isolatieafstanden);
- Nominale spanning (U_n) om het spanningsniveau van het betrokken net te benoemen;
- Exploitatie- of uitbatingsspanning; dit is de gemiddelde spanning die in praktijk gebruikt wordt bij uitbating van het net en in rekening wordt genomen bij de berekening van bv. het vermogen.

In de literatuur worden deze concepten door elkaar gebruikt om te refereren naar hetzelfde spanningsniveau. In deze nota bepalen we een spanningsniveau meestal aan de hand van de nominale spanning, behalve indien een ander concept meer van toepassing is.



↑ **Figuur 2**
Belastingprofiel voor een 380kV-verbinding

8

Voor resistieve verliezen
geldt: $P_{\text{loss}} = R \cdot I^2$

In deze nota zullen de vier spanningsniveaus uit volgende tabel aan bod komen. Voor AC-oplossingen betreft dit de twee hoogste spanningsniveaus die in het Belgische net worden toegepast, nl. 380kV en 220kV. Voor DC-oplossingen wordt de spanning bepaald door de convertoren die aan deze technologie gelinkt zijn (zie hoofdstuk). Hier is er keuze uit verschillende spanningsniveaus. De nominale spanning U_n is hier steeds gelijk aan de uitbatingsspanning en de maximaal toegelaten spanning U_m is steeds 5% hoger. In de tabel is het voorbeeld gegeven voor ± 320 kV en ± 500 kV.

3.3.3 Afstand

Bij het schrijven van deze nota zijn de tracés van de nieuwe verbindingen nog niet gekend. Daarom houden we in deze studie op basis van een grove inschatting rekening met tracélengtes⁷ van +/-50km tot +/-100km. Voor alle kwantitatieve vergelijkingen wordt een **afstand van 75 km** in beschouwing genomen. Waar relevant wordt eveneens de vergelijking gemaakt voor de gehele afstandsrange.

3.3.4 Belasting

De verbinding moet bij de **hoogste pieken** in het getransporteerde vermogen nog steeds **redundant** zijn. Bovendien moet de verbinding ook kunnen voldoen aan toekomstige stijgingen van het te transporteren vermogen.

Figuur 2 laat een typisch belastingprofiel zien voor een verbinding 380kV. Dit wordt in rekening gebracht voor het bepalen van de verliezen en EMF-profielen. De gemiddelde belasting van de verbinding is 20% van het maximaal vermogen van de verbinding. Voor verliezen moet men echter werken met het kwadratisch gemiddelde, d.i. 25% van het maximaal vermogen.⁸



IV

Bestudeerde technologieën

- 4.1 | AC-technologie
 - 4.1.1 | Bovengronds – luchtlijn
 - 4.1.2 | Ondergronds
- 4.2 | DC-technologie
 - 4.2.1 | Conversiestations
 - 4.2.2 | Bovengronds – luchtlijn
 - 4.2.3 | Ondergronds

IV

Bestudeerde technologieën

Bij de technologieën wordt er een onderscheid gemaakt tussen enerzijds **wisselstroom** of **AC** (Alternating Current) en anderzijds **gelijkstroom** of **DC** (Direct Current).

Bij wisselstroom verandert de stroom (bestaande uit elektronen) steeds van richting en dit volgens een bepaald ritme (frequentie). De elektronen lopen dus van de pluspool naar de minpool en van de minpool naar de pluspool. Hoe vaak dit binnen 1 seconde gebeurt, dat noem je de frequentie. In Europa wisselt de stroom 50 keer per seconde van richting en terug en is de frequentie dus 50 Hertz. Het Belgische energienet is gebaseerd op wisselspanning en een stopcontact werkt dan ook op basis van wisselspanning. Het symbool voor wisselstroom wordt hieronder weergegeven.



Bij gelijkstroom lopen de elektronen alleen van de pluspool naar de minpool; de stroom loopt dus altijd in dezelfde richting. Het laatste decennium is gelijkstroom aan een opmars bezig. Voor verbindingen die onder de zee door lopen en bij zeer zware lijnen die meer dan 1000 kilometer lang zijn is gelijkstroom zelfs de norm geworden.



Binnen deze twee types van stroom wordt er vervolgens ook een onderscheid gemaakt tussen de ondergrondse technologie waaronder de kabel en de GIL en de bovengrondse technologie, namelijk de luchtlijn.

4.1 AC-TECHNOLOGIE

De keuze voor wisselspanning ten voordele van gelijkspanning voor het transport van elektriciteit is historisch gegroeid, aangezien wisselspanning gemakkelijk getransformeerd kon worden van lage spanningen naar hoge spanningen met behulp van een transformator.

Het gebruik van hogere spanningen voor het transport van elektriciteit laat toe om grotere vermogens over langere afstanden te transporteren met lagere verliezen. Voor eenzelfde vermogen zal bij een hogere spanning namelijk een lagere stroom nodig zijn⁹. Aangezien de verliezen in een verbinding kwadratisch in functie van de stroomsterkte zijn¹⁰, zal een hogere uitbatingspanning (en dus een lagere stroomsterkte) gepaard gaan met lagere verliezen bij het transport van het elektrische vermogen.

Een tweede belangrijk historisch voordeel aan AC is dat men eenvoudig kan schakelen, zelfs bij kortsluiting en op hoge spanningen. Zonder vermogensschakelaar is het niet mogelijk om een fout selectief uit te schakelen en is het dus ook niet mogelijk om grote vermaasde netwerken te maken zonder dat heel het netwerk uitvalt bij elke fout.

4.1.1 Bovengronds – luchtlijn

Een bovengrondse hoogspanningsverbinding of luchtlijn bestaat uit metalen geleiders (de kabels die in de lucht hangen) die per drie fasen gegroepeerd worden in een draadstel of circuit (zie figuur 6).¹

De draadstellen worden ondersteund door pylonen of masten. Gezien lucht hier het isolatiemedium vormt, is er een zekere isolatieafstand nodig tussen de geleiders en de geaarde metalen structuren.

⁹ Andere spanningsniveaus zijn mogelijk

¹⁰ Deze afstanden zijn grootteordes waarop de studie van toepassing is.

Een bovengrondse hoogspanningsverbinding bestaat dus voornamelijk uit twee elementen: een mast en een geleider, waarvan heel veel verschillende types bestaan en gecombineerd kunnen worden. De Europese elektriciteitsnelwegen, die uitgebaat worden in wisselstroom en op het spanningsniveau van 380kV, bestaan sinds de jaren 1960 en worden standaard bovengronds gerealiseerd met klassieke vakwerkmasten.

4.1.1.1 Geleiders

Voor het transport van elektriciteit wordt er een geleidend medium gebruikt, wat bestaat uit een aantal in elkaar gevlochten metalen draden, die tezamen een geleider vormen. Het gebruik van gevlochten draden laat toe dat de geleider enerzijds buigzaam blijft, maar anderzijds toch een hoge treksterkte behoudt.

Initieel werd voor geleiders koper gebruikt als basismateriaal gelet op de lage geleidingsweerstand (lage specifieke weerstand) en goede mechanische treksterkte. De hoge massa per lopende meter en hoge kostprijs hebben er echter toe geleid dat koper verlaten werd als basismateriaal voor geleiders.

Vanaf 1950 werden aluminium-staal ("Al-Ac") geleiders geplaatst in het Belgische hoogspanningsnet. Deze geleiders bestaan uit een kern van stalen draden omwikkeld met aluminiumdraden. Het gebruik van twee verschillende metalen laat toe om de goede eigenschappen van elk metaal te combineren. Aluminium bezit net als koper een lage geleidingsweerstand en heeft bovendien een lage lineïke massa (massa per lopende meter). Staal zorgt anderzijds voor een hoge treksterkte, wat de sterkte van de gehele geleider verhoogt.

Door het verschijnen van corrosie in de Al-Ac-geleiders door de chemische interactie van beide types metalen, is men vanaf 1970 overgestapt op AMS (*Aluminium Magnesium Silicaat*) geleiders. Deze lege-

ring bezit dezelfde lage geleidingsweerstand en lage lineïke massa als Al-Ac-geleiders, maar behoudt eveneens een uitstekende treksterkte. De AMS-geleiders zijn goed bestand tegen corrosie, wat een groot voordeel is t.o.v. van de Al-Ac-geleiders.

Sinds de jaren '90 gebruikt Elia **Z-geleiders**. Hierbij zijn de twee (bij 707 AMS-2Z) of drie (bij 928 AMS-3Z) buitenste lagen van de AMS-geleider opgebouwd met Z-vormige draden in plaats van ronde draden.¹¹ De geleider is hierdoor egaler en compacter (kleinere diameter voor dezelfde sectie), waardoor deze minder gevoelig is voor ijsbelasting, minder windbelasting op hoge windsnelheid vangt en minder geluid maakt dan een niet gesloten geleider met ronde draden.



↑ **Figuur 3**

Bovenaan een doorsnede van de Z-geleider
Onderaan een geleider met trapeziumvormige draden

¹¹

In het buitenland worden soms ook trapeziumvormige draden gebruikt.

De technologie staat echter niet stil en de afgelopen jaren werden nieuwe concepten van geleiders ontwikkeld die meer stroom kunnen vervoeren en dit in combinatie met minder doorhang. Deze technologie wordt de High Temperature Low Sag (HTLS)-geleiders genoemd.

Tijdens het transport van elektriciteit gaat er steeds een hoeveelheid elektrische energie verloren. Dit noemt men het netverlies en wordt gedefinieerd als het verschil aan vermogen dat op het net wordt ingebracht en wordt afgenomen. De netverliezen zorgen voor een opwarming van de geleiders, hetgeen de mechanische eigenschappen van de geleider beïnvloedt.

Door de netverliezen, zet de geleider uit, waardoor deze meer zullen doorhangen en de treksterkte vermindert. Daarom legt het Algemeen Reglement op Elektrische Installaties¹² (hierna AREI) een maximale uitbatingstemperatuur van 75°C op voor de uitbating van gewone geleiders. Verder bepaalt het AREI ook de te respecteren afstanden tussen de geleiders en de grond en obstakels.

↓ **Figuur 4**
HTLS-geleider



De HTLS-geleider, afgebeeld in figuur 4, is heterogeen opgebouwd en bestaat uit een dragende kern met zeer goede mechanische treksterkte (glas- en/of koolstofvezels die sterker zijn dan stalen draden), met daarrond een speciale aluminiumlegering met een lage geleidingsweerstand en

¹² Algemeen Reglement op Elektrische Installaties zoals vastgelegd door het Koninklijk Bkoninklijk esluit van 10 maart 1981.



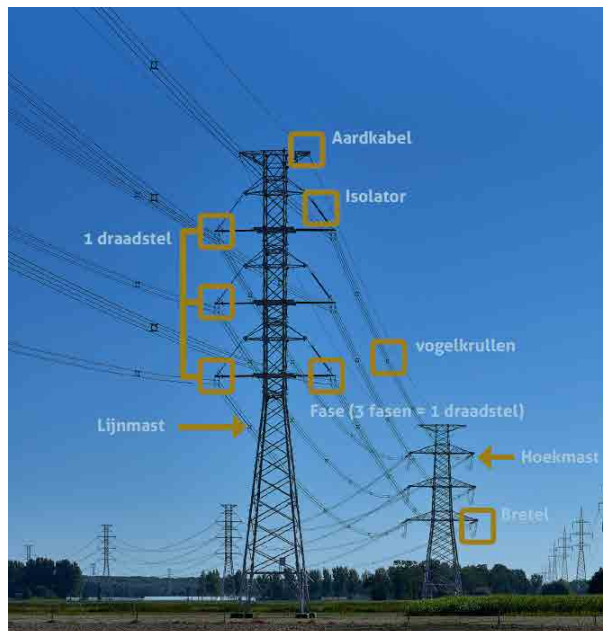
↑ **Figuur 5**
Tweebundel
2x900 HTLS
(links) en
vierbundel
4x707 AMS-2Z
(rechts)

goede warmteweerstand, die een uitbating tot hoge temperaturen (150-250°C°) toelaat. Dit leidt tot een lichtere geleider met een grotere transportcapaciteit ten opzichte van de klassieke AMS-geleider. Deze geleider is geschikt bij de upgrade van bestaande verbindingen om zo de transportcapaciteit van een bestaande corridor te verhogen met 30 tot 100% en dit met behoud van de masten. Een tweebundel 2x900 HTLS heeft bijvoorbeeld dezelfde transportcapaciteit (rond 4500A) als een vierbundel 4x707 AMS-2Z.

Indien nieuwe masten worden geplaatst gaat de voorkeur echter naar AMS-geleiders. De totale investeringskost (masten + geleiders) is ongeveer gelijk, maar AMS genereert minder netverliezen (ca. 40% lager dan bij HTLS-geleiders met eenzelfde transportcapaciteit). Ook kan met een vierbundel AMS-geleiders een compactere mast gebouwd worden bij eenzelfde geleidingsniveau.

4.1.1.2 Masten

De masten zijn de steunen die de geleiders dragen. Op het bovenste deel van de mast zijn mastarmen voorzien waarop de geleiders vastgemaakt worden. Tussen de geleiders en de mast wordt er een isolerende drager voorzien die de delen onder spanning en de geleider afscheidt van de mast.



↑ **Figuur 6**
 Klassieke mastarmen met tweebundel (links) en isolerende mastarmen met vierbundel (rechts)

Bij masten waar de geleiders van richting veranderen, bestaat deze isolerende drager uit een isolatorketting tussen de klassieke mastarmen en de geleider. Als de masten echter op één lijn staan, ook wel lijnmasten genoemd, kan de combinatie isolatorketting en klassieke mastarm ook vervangen worden door een compactere isolerende mastarm, die de geleiders rechtstreeks draagt.

De masten moeten altijd in overeenstemming zijn met de normen bepaald in het AREI en in de Europese Norm EN50341 voor het ontwerp van lijnen. Gelet op de strikte Belgische normen kunnen bepaalde technologieën niet zomaar “overgenomen” worden vanuit het buitenland. Een afzonderlijke studie zal meer details geven over de verschillende masten en hun toepassing in enkele projecten.

Afhankelijk van het aantal elektrische circuits, ook wel draadstellen genoemd, die op een mast aanwezig zijn, kan de vorm van de mast verschillen. Om een maximale transportcapaciteit op het net te kunnen garanderen, dient bij masten met een dubbel draadstel (met geleiders aan beide kanten van de armen) het draadstel dat aan de andere kant van de mast hangt in dienst te blijven tijdens onderhoudswerkzaamheden. Dit principe alsook de wette-

lijke verplichtingen hebben een impact op de lengte van de mastarmen en de breedte van het mastlichaam.

4.1.1.2.1 Functies van de masten

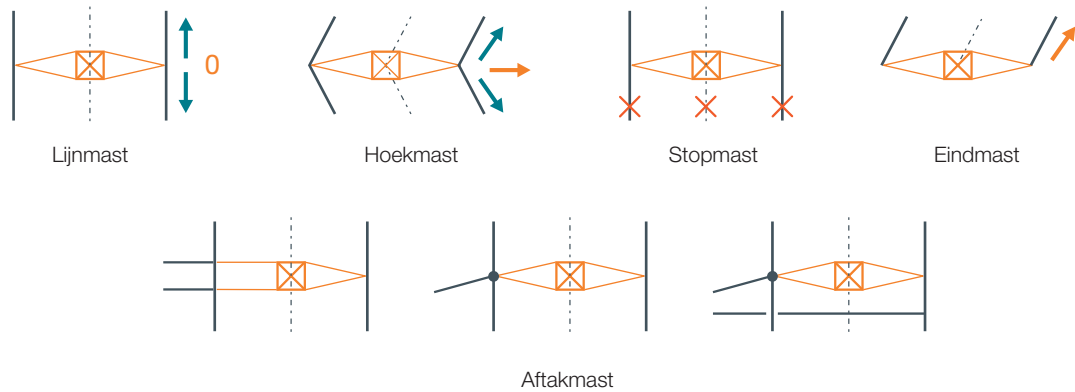
Zoals eerder vermeld, worden masten die op één lijn staan lijnmasten genoemd. Deze masten zijn berekend voor de krachten van geleiders die op één lijn liggen, inclusief de windbelasting op de geleiders en de mast.

Op plaatsen waar het tracé afwijkt van een rechte lijn, zijn hoekmasten vereist. Deze zijn zwaarder dan klassieke lijnmasten omdat deze een grotere zijwaartse trekkracht van de geleiders moeten verdragen.

Op specifieke plaatsen worden stopmasten geplaatst. Een stopmast is sterker dan een hoekmast en heeft als functie om alle geleiders aan één kant van de mast vast te houden als er zich een accidentele breuk voordoet van alle geleiders aan de andere zijde van de mast. Stopmasten worden vooral ingezet om kruisingen van spoorwegen of hoofdwegen te beveiligen of om een cascade-effect tegen te gaan wanneer bijvoorbeeld een lijnmast zou vallen. Gemiddeld wordt er om de 4 à 5 kilometer een stopmast voorzien.

Bij aankomst van de hoogspanningslijn in een onderstation worden eindmasten voorzien. Deze hebben voldoende weerstand om de permanente grote trekkrachten van alle geleiders in één richting op te vangen, in tegenstelling tot een stopmast, die de geleiders enkel in een accidenteel geval in één richting kan dragen. Een eindmast is 20% sterker dan een stopmast.

→ **Figuur 7**
Mastfuncties



Wanneer er een aftakking nodig is naar een hoogspanningspost naast een doorlopende lijn, kan er een aftakmast gebouwd worden. Deze mast, die specifiek voor de aftaksituatie ontworpen wordt, laat toe om een enkele of dubbele aftakking van één of meerdere circuits te maken, zonder dat er een onderstation op het knooppunt gebouwd moet worden.

Onderstaande figuur toont het onderscheid tussen verschillende mastfuncties.

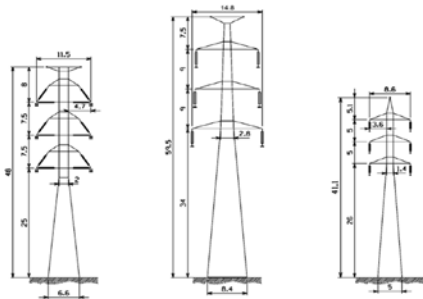
4.1.1.2.2 Types van masten

Vakwerkmasten komen in België het meest voor en dit onder de vorm van de “klassieke mast”. Tijdens het Stevin-project¹³ werd in België ook voor het eerst een compacte mast gerealiseerd. In vergelijking met de klassieke 380kV-mast is deze aanzienlijk kleiner en heeft die ongeveer de omtrek van een klassieke 150kV-mast. Figuur 8 illustreert dit compact maststyp.

Een buismast, ook wel monopode mast genoemd, bestaat uit een cilindrisch mastlichaam, waaraan metalen of isolerende mastarmen bevestigd worden om de geleiders van de circuits te dragen. Buismasten zijn beschikbaar in beton, metaal

13
www.stevin.be

→ **Figuur 8**
www.stevin.be
Compact 380kV-silhouet t.o.v. klassiek 380kV-silhouet (links) en 150kV-lijn t.o.v. compacte 380kV-lijn (rechts)



← **Figuur 9**
Wintrackmasten: dubbele buismast of bipodemast (NL) (links) en Eagle Tower: enkele buismast of monopodemast (DK) (rechts)



of een combinatie van beide. Er zijn reeds concepten in composietmateriaal maar de krachten en momenten die deze masten kunnen opnemen zijn beperkt en momenteel niet geschikt voor 380kV.

4.1.1.2.3 Hoogte

De hoogte van de mast wordt bepaald door de doorhang van de geleiders in het midden van een span, de overbrugde afstand tussen twee masten. Het AREI schrijft de minimale afstand tussen het laagste punt van de onderste geleider en de ondergrond voor, afhankelijk van het type ondergrond (veld, huis, weg, ...). Om deze minimale hoogte te respecteren, kan men zo de hoogte van de aangrenzende masten in de span bepalen.

In vergelijking met de oude klassieke vakwerkmasten hebben er zich de laatste jaren diverse technologische ontwikkelingen voorgedaan die een positieve impact hebben gehad op de hoogte van de mast (-12m ongeveer). Zo heeft het gebruik van isolerende mastarmen als voordeel dat hangende isolatorkettingen op lijnmasten overbodig worden, zodat de gehele mast compacter en dus lager wordt.

4.1.1.3 Technologie toegepast op de case study

Voor de verdere evaluatie wordt een 380kV-luchtlijn met 2 circuits met elk een vermogen van 3GW weerhouden. Hierbij wordt een 4-bundel geleider 707 AMS-2Z gebruikt vermits de analyse in het kader van het Stevin-project¹⁴ aangetoond heeft dat deze voldoet aan de geluidsvoorschriften, minder verliezen heeft dan andere types geleiders (in het bijzonder de HTLS) en een lagere aankoopkost heeft voor de equivalente transportcapaciteit.

Verder is het gebruik van deze geleiders een courante praktijk met gekende en goede ervaringen. De meeste Europese hoogspanningsprojecten met nieuwe luchtlijnen

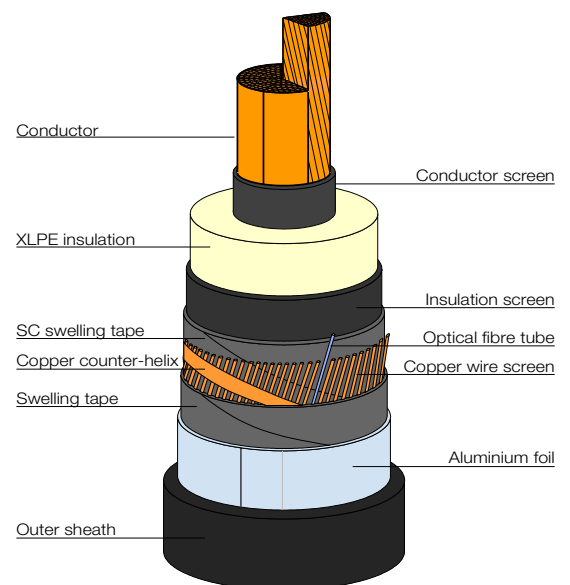
maken gebruik van het type geleiders met aluminium legering met hoge geleidbaarheid.

Voor de masten wordt voor de verdere analyses het compacte masttype van het Stevin-project als basis genomen, omdat hiervoor al een optimalisatie naar de Belgische behoeften is gebeurd. In de praktijk zijn ook andere masttypes of andere geleiders mogelijk.

4.1.2 Ondergronds

4.1.2.1 Kabel

Het transport van elektriciteit kan ook met ondergrondse kabels gerealiseerd worden. Ondergrondse kabels voor grote vermogens zijn monofasig opgebouwd. Dit wil zeggen dat er één kabel per elektrische fase nodig is. Vermits wisselstroom driefasig is opgebouwd hebben we dus drie kabels nodig. Deze kabels bezitten net als bovengrondse geleiders een metalen geleidende kern. In tegenstelling tot luchtlijnen is niet de lucht, maar een kunststoflaag rond deze kern het isolerende medium tussen de delen onder spanning en de buitenwereld. Deze kabels hebben een gelaagde structuur.



↑ **Figuur 10**
Opbouw kabel (tekening Nexans)

¹⁴ http://www.elia.be/en/projects/grid-projects/~media/files/Elia/Projects/stevin/02_eindrapport-MER_6233-130.pdf

De belangrijkste onderdelen zijn:

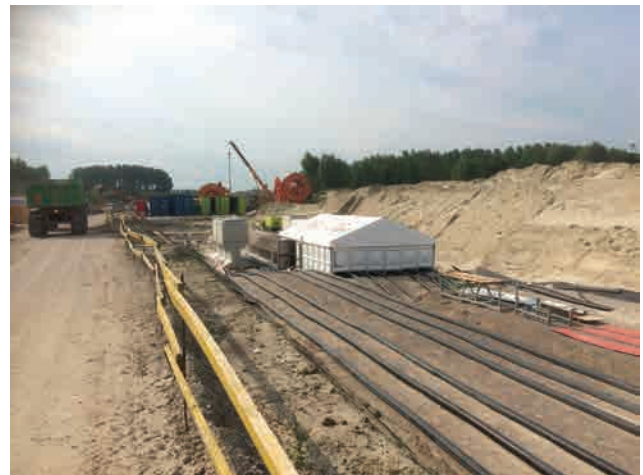
- De kern: opgebouwd uit aluminium of (geëmailleerd) koper en zorgt voor de effectieve geleiding van de elektrische stroom.
- De isolatie: zorgt voor de afscheiding van de onder spanning staande geleider en de buitenmantel van de kabel. Voor de huidige AC-kabels tot 380kV bestaat deze uit XLPE (cross-linked polyethyleen).
- De mantel: zorgt voor de bescherming (mechanisch, water, corrosie,...) en bevat een metalen scherm dat belangrijk is om bij kortsluiting een deel van de foutstroom veilig af te voeren.

De kabels worden in sleuven onder de grond geplaatst. De diepte van de sleuf hangt af van het type grond, het spanningsniveau van de kabels en het gebruik van de bovenlaag (autoweg, veld, ...). De breedte van de sleuf hangt af van het spanningsniveau en de gevraagde transportcapaciteit. (Zie ook volgende paragraaf en Hoofdstuk Grondinname tijdens & na de werken).

De sleuf wordt nadien weer opgevuld met grond. Deze laat toe om vlot de warmte van de kabels af te voeren (bijvoorbeeld dolomiet). Dat maakt een hoge transportcapaciteit van de kabels mogelijk (zie volgende paragraaf).

4.1.2.1.1 Vermogen

Een ondergrondse kabel heeft een lagere transportcapaciteit (vermogen) dan een luchtlijn. De verliezen in een geleider en het metalen scherm genereren warmte en in een ondergrondse kabel kunnen deze zeer moeilijk afgevoerd worden. Hierdoor warmt deze snel op. Vanaf een zekere temperatuur (voor XLPE meestal 90°C) begint het isolatiemateriaal echter te degraderen. Hierdoor moet de stroom (en dus ook het vermogen) beperkt worden.



↑ **Figuur 11**
Kabelsleuf voor een 380kV-kabel (4 circuits) (rechts)

Om een ondergrondse kabel optimaal te benutten, kunnen verschillende maatregelen genomen worden. Hieronder wordt een overzicht gegeven van mogelijke acties:

- Men kan opteren voor een grotere diameter van de geleider of het gebruik van beter geleidende materialen (koper in plaats van aluminium). Op deze manier zal de soortelijke weerstand verminderen, waardoor de warmteverliezen verlagen¹⁵ en er dus minder vermogen verloren gaat in de kabel. Momenteel zijn de maximale gangbare kabelsecties 2500 mm² uit koper vervaardigd.
- Het zogenaamde “*skin effect*” zorgt ervoor dat bij wisselspanning de stroom hoofdzakelijk aan de buitenkant van de geleider vloeit. Dit fenomeen wordt groter bij grotere diameters van de geleider. Om dit te vermijden, bestaan de geleiders met een kabelsectie van 2500mm² of meer meestal uit verschillende kleinere draadjes die van elkaar afgeschermd (“geëmailleerd”) worden.
- De afstand tussen de verschillende fasen en circuits van kabels kan vergroot worden, waardoor de thermische invloed van de andere kabels lager wordt. Bovendien zullen naast elkaar liggende kabels door toedoen van hun elektromagnetische velden stromen induceren in de kabelschermen en de metalen beschermlaag van de mantel van naburige kabels. Met een grotere afstand tussen de circuits worden deze geïnduceerde stromen lager, wat lagere

¹⁵

Algemeen Reglement op Elektrische Installaties zoals vastgelegd door het Koninklijk Besluit van 10 maart 1981.

verliezen tot gevolg heeft en wat eveneens de opwarming van de kabels beperkt.

- Voor een 380kV-kabel bedraagt de maximale kabellengte die over land getransporteerd kan worden ongeveer 1 km. Per kilometer worden de kabelstukken aan elkaar gezet door verbindingsmoffen. Op die plaats kan het scherm met het scherm van een andere fase verbonden worden. Dit noemt men *cross-bonding*. Doordat de geïnduceerde stromen in de mantelschermen van verschillende fasen elkaar deels opheffen, kunnen de verliezen zo gereduceerd worden.
- Als men de kabels plaatst in een grondlaag met een betere thermische geleidbaarheid (gecontroleerde aarding), wordt de geproduceerde warmte van de kabel beter geëvacueerd.
- Men kan de diepte van de kabel beperken. Een dikkere laag aarde bovenop de kabel impliceert een grotere thermische isolatie, waardoor de kabel zijn warmte dus moeilijker af kan geven.
- Op bepaalde plaatsen zijn er geen sleufwerken mogelijk en moet er onder de hindernissen door geboord worden met een gestuurde boring. De kabel

wordt dan door een buis door deze boring getrokken. Men kan na het plaatsen van de kabel de buizen verder opvullen met het opvulmateriaal bentoniet, waardoor de warmtegeleiding verbetert in vergelijking met een niet-gevulde buis.

Zelf na het nemen van al deze maatregelen, blijft het vermogen van een ondergronds kabelcircuit beperkt tot ongeveer 1GW op 380kV en 0,6GW op 220kV.

4.1.2.1.2 Reactieve energie bij AC-kabels

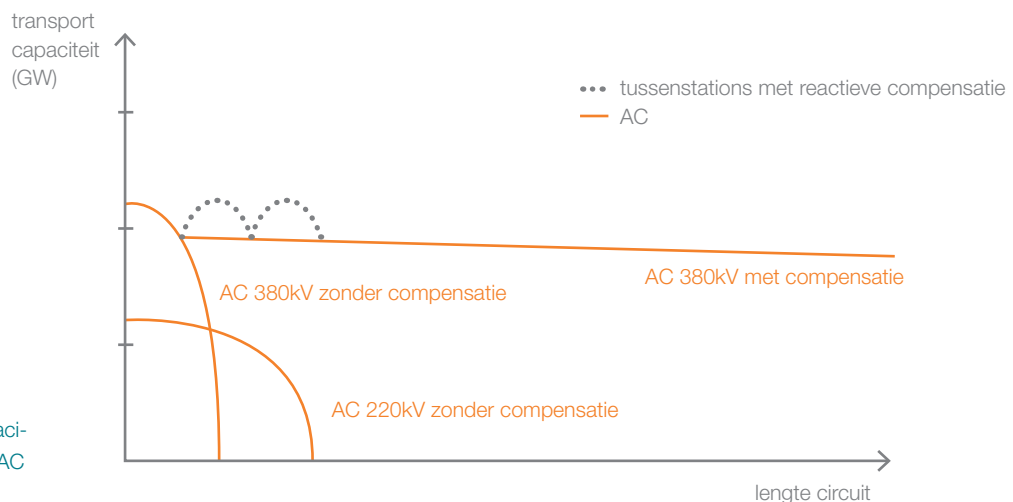
Ondergrondse kabels zijn zeer capaciteef¹⁶, wat inhoudt dat zij een deel van het getransporteerde schijnbare vermogen opnemen. Bij langere kabellengtes zal een aanzienlijk deel van de stroom aan de ingang van de kabel gebruikt worden om deze “capaciteit” te voeden. Het vermogen dat hieraan “verloren” gaat, noemt men reactief vermogen, in tegenstelling tot het actieve of nuttige vermogen dat door de kabel getransporteerd wordt naar het andere uiteinde.

De maximale lengte van een kabel waarbij het uiteindelijke getransporteerde actieve vermogen op 0 valt door deze capaciteit, is in functie van de uitbatingsspanning. Gegeven dat het geproduceerde reactief

16

De elektrische capaciteit C bedraagt 240 tot 280mF/km per fase voor hoogspanningskabels 380kV en 220kV. Dit is ongeveer 20 maal zo hoog als bij luchtlijnen.

→ **Figuur 12**
Transportcapaciteit bij DC en AC





↑ **Figuur 13**
Shuntreactor

vermogen in functie van het kwadraat van de uitbatingsspanning stijgt¹⁷, zal de beschikbare transportcapaciteit voor het actieve vermogen sneller slinken bij hogere spanningen dan bij lagere spanningen. Een lagere spanning laat dus toe om langere kabellengtes te kunnen gebruiken. Anderzijds zal bij korte kabellengtes een hogere spanning een grotere transportcapaciteit toelaten bij eenzelfde kabelsectie. Om deze vaststelling te illustreren wordt in de grafiek hieronder de transportcapaciteit van een kabel met dezelfde kabelsectie en stroomsterkte vergeleken voor 220kV en 380kV.

Om het reactief vermogen van een ondergrondse kabel te compenseren kunnen shuntreactoren worden geïnstalleerd. Dit zijn spoelen die tussen de fase en de aarde worden geplaatst in een onderstation. Onderstaande figuur toont een shuntreactor.

Om het transportvermogen ook voor langere kabels hoog te houden, kan men tussenstations of compensatiestations plaatsen op het traject van de kabel. In deze tussenstations worden dan een aantal shuntreactoren geplaatst die het reactief vermogen van de kabels absorberen. De lijn "AC 380kV met compensatie" in figuur 12 illustreert de werking van deze tussenstations.

Een shuntreactor lijkt qua opbouw een transformator maar is constructief moeilijker te produceren. Bij een transformator zorgt de magnetische kern grotendeels voor de mechanische sterkte. Bij een

shuntreactor zit deze magnetische kern echter vol luchtspleten waardoor de mechanische sterkte beperkt is en waardoor het ook moeilijk wordt om de productie van het geluid te beperken. Uit overleg met de constructeurs blijkt dat shuntreactoren groter dan 130Mvar nog zeer moeilijk te vervaardigen zijn, zeker indien er beperkingen worden opgelegd qua geluidsniveau.

Bovendien zorgen grotere shuntreactoren voor grote spanningssprongen op het net bij het in- en uitschakelen van deze installaties. 130Mvar is de maximale grootte die zonder problemen overal in het net kan geplaatst worden. Indien er meer compensatie nodig is, zullen meerdere shuntreactoren naast elkaar geplaatst moeten worden.

Om de reactieve energie perfect te compenseren, dient per 11 lopende km kabelcircuit op spanningsniveau 380kV¹⁸ en per 30km kabelcircuit op spanningsniveau 220kV een shuntreactor van 130Mvar geplaatst te worden. Deze shuntreactoren dienen verdeeld te worden over de eind- en tussenstations. (Bij een perfecte compensatie staan er in elk tussenstation dubbel zoveel shuntreactoren als in elk eindstation.)

Idealiter hebben de shuntreactoren elk hun eigen aansluitveld met een eigen beveiligingssysteem en vermogensschakelaar. Om aansluitvelden te besparen zou men een deel van de reactieve compensatie samen met de kabel op één aansluitveld kunnen plaatsen. Volgende punten moeten dan eerst onderzocht worden:

- Het "zero missing" fenomeen (waarbij door een quasi-perfecte match van geproduceerd reactief vermogen (kabel) en geabsorbeerd vermogen (shunt), bij overgangsverschijnselen de 50Hz-component geblokkeerd wordt en het daardoor mogelijk is om gedurende een langere periode (>200ms) geen natuurlijke nuldoorgang van de stroom te krijgen): hierdoor zal de vermogensschakelaar bij een fout niet tijdig uitschakelen. Ook kan er door de opgebouwde hitte in de

¹⁷

$Q_{\text{Capacitief}} = \omega C U^2$, waarbij ω gelijk is aan 2π keer de netfrequentie (50Hz).

¹⁸

Vermits we in de use-case op 380kV zes parallelle circuits nodig hebben, zijn er dus na een tracé van 11 km zes shunt reactoren nodig. De shunt reactoren moeten niet exact om de 11 km geplaatst worden, maar kunnen gegroepeerd worden in de tussen en eindstations.

bluskamer schade ontstaan met mogelijk een explosie van de vermogensschakelaar tot gevolg. Het is daarom niet mogelijk om alle reactieve compensatie in parallel met de kabel op één aansluitveld te plaatsen. (In de literatuur vinden we limieten tot 80%.)

- De werking van de beveiligingen: sommige beveiligingen kunnen niet meer selectief een fout detecteren.

Eigen aansluitvelden hebben bovendien volgende voordelen:

- Er kunnen specifieke inschakelprocedures opgesteld worden om het hele systeem stapsgewijs in te schakelen en om er zo voor te zorgen dat de spanningsstappen op het net minimaal blijven.
- De shuntreactoren kunnen apart bediend worden naargelang de behoefte van reactief vermogen.

4.1.2.1.13 Spanningsopbouw en spanningsprongen

Doordat een kabel zeer capacitief is, ontstaan ook volgende fenomenen:

- Bij het schakelen van de kabel ontstaan er spanningsprongen in het net. Bij lange kabels kunnen deze storend zijn voor de netgebruikers¹⁹ of zelfs installaties beschadigen en/of doen afschakelen.
- Indien de kabel slechts aan één zijde ingeschakeld is, stijgt de spanning over de lengte van de kabel. Bij lange lengtes kan de spanning op het open uiteinde te hoog worden voor de installatie.

Deze fenomenen kunnen onder controle gehouden worden door de lengte van elk kabeldeel te beperken. De maximale afstand zal ook afhangen van het omliggende net en moet geval per geval bepaald worden in een afzonderlijke studie.

Opmerking: indien twee of drie kabelcircuits gebundeld worden achter één enkele (vermogens)schakelaar, worden deze af-

standen zelfs twee- of driemaal korter. We gaan er verder vanuit dat elk circuit afzonderlijk geschakeld wordt.

4.1.2.1.4 Resonantie

Door de combinatie van de (zeer capacatieve²⁰) kabels en (inductieve) shuntreactoren ontstaan resonanties²¹, ook wel harmonische frequenties en eigenfrequenties genaamd. Deze werken zoals een radio, waarbij specifieke frequenties versterkt worden. In tegenstelling tot een radio zijn deze versterkingen niet wenselijk in het hoogspanningsnet. Bovendien zijn er veel combinaties mogelijk van kabels en shuntreactoren, die elk een frequentie triggeren die ze versterken. Ook het net zelf is een inductieve bron en deze verandert voortdurend. We kunnen deze situatie dus vergelijken met een radio met gelijktijdig meerdere stoorzenders en waarbij deze stoorzender continu van frequentie verandert.

De meeste van deze resonanties zijn transiënte fenomenen die ontstaan bij het in- of uitschakelen van een element, bij storingen in het net of bij blikseminslagen in de naburige installaties. Ze kunnen problemen geven in de eigen installaties of in de installaties van netgebruikers. Om dit te verhelpen kunnen filters geplaatst worden aan de uiteinden van de installaties. Er bestaan hiervoor twee soorten filters:

- Passieve filters: deze absorberen één enkele frequentie. Indien er meerdere harmonische frequenties zijn, moeten dus meerdere filters geplaatst worden.
- Actieve filters: deze werken op basis van halfgeleidertechnologie, zoals gebruikt in de VSC-conversiestations. Deze kunnen zeer flexibel een breed spectrum aan frequenties filteren, maar zijn anderzijds ook veel duurder.

Vermits resonanties afhangen van het omliggende net, moet geval per geval (in een afzonderlijke studie) geanalyseerd worden welke filters nodig zijn.

¹⁹

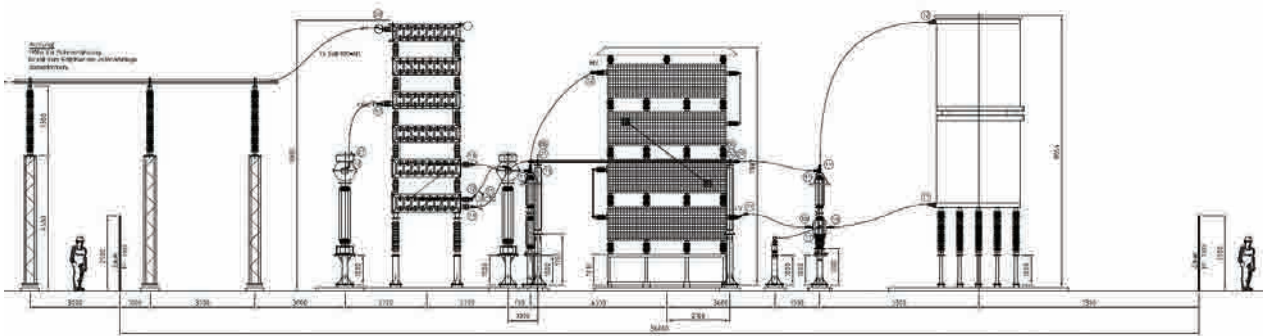
Hiermee worden zowel klanten als productie-eenheden bedoeld.

²⁰

Op basis van de kabels 380kV die gebruikt worden bij Elia, is dit ongeveer 240nF/km.

²¹

Er ontstaan zogenaamde (R) LC-kringen.



↑ **Figuur 14**
Doorsnede
passieve filter
(bron: 50HertzT)

4.1.2.1.5 Technologie toegepast op case study

Om het gevraagde vermogen te bereiken (los van de technische haalbaarheid – dit komt verder aan bod), is voor deze case study een 380kV-verbinding met 6 parallelle circuits (6x3 geleiders) nodig om een verbinding van 6GW te realiseren. Zoals eerder gesteld zal hier wel gecompenseerd moeten worden voor het reactief vermogen en dient er per 11km kabel een shuntreactor 130Mvar te worden voorzien. Dit leidt voor een kabelverbinding van 75km uitgebaat op 380kV tot het plaatsen van 42 shuntreactoren. Gezien de lente van de verbinding zullen één of meerdere tussenstations nodig zijn waar deze shuntreactoren gegroepeerd worden. In de verdere vergelijking gaan we ervan uit dat één tussenstation voldoende is. Dit is het meest optimistische geval.

Voor de case study bestuderen we ook de kabeltechnologie indien deze uitgebaat wordt op een spanningsniveau van 220kV. In dit geval is het reactief vermogen dat gegenereerd wordt per kabelcircuit 3 keer zo laag. Aan beide uiteinden is er echter een transformatie nodig naar een hoger spanningsniveau. Daarbij ligt het maximaal vermogen van een 220kV-kabel 40% lager dan dat van een 380kV-kabel. Dit impliceert dat er 10 parallelle circuits nodig zijn om het opgegeven vermogen te realiseren. In dit geval is er maar één shuntreactor per 30km kabelcircuit te voorzien, wat een totaal van 25 shuntreactoren geeft. We trekken ook hier van het meest optimistische geval en gaan er verder van uit dat geen tussenstation nodig is.

In hoofdstuk Kabel zullen we ook de noodzaak bekijken van filters en andere (actieve) elementen die aan het net moeten toege-

voegd worden om de netfenomenen bij kabels te beheersen.

4.1.2.2 GIL

Een GIB of Gas Insulated Busduct wordt gebruikt voor het transport van elektriciteit over beperkte afstanden, bijvoorbeeld tussen een GIS-installatie (gas-insulated switchgear of gasgeïsoleerde schakelapparatuur)²² en een luchtlijn. Deze GIB bestaat uit korte, aan elkaar geschroefde buizen, waarin een geleidende kern afgescheiden wordt van de buis door middel van een niet-geleidend inert gas, SF₆ of zwavelhexafluoride.²³ Deze buizen zijn echter niet geschikt om in te graven en door de aanwezigheid van overdrukventielen is het ook niet veilig om deze in tunnels te plaatsen.

Het is alleen maar mogelijk om deze GIB te plaatsen op bovengrondse structuren of in een verzonken sleuf in de grond (bijvoorbeeld een open kanaal afgedicht met roosters). In beide gevallen zal de volledige corridor verboden terrein zijn voor onbevoegden en over grote obstakels dient men te werken met bruggen. Dit wordt niet als realistisch beschouwd voor lange verbindingen over publiek terrein en wordt bijgevolg niet verder in beschouwing genomen.

De GIL-technologie of *Gas Insulated Line* is een technologie die gebaseerd is op de GIB-technologie. Ze bestaat uit lange aaneengelaste buizen (vergelijkbaar met gasleidingen), met telkens één elektrische geleider in het midden van deze buis. Voor een driefasig systeem zijn dus drie buizen per verbinding nodig. De buizen zijn gevuld met een gasvormig isolatiemedium bestaande uit een mix van 80% CO₂ en 20% SF₆.

²²

AIS: Air Insulated System. De installaties worden installatie wordt op isolatoren geplaatst/geplaatst. De omgevingslucht wordt verder gebruikt als isolatiemedium tussen de onder spanning staande delen. GIS: Gas Insulated System. De installatie worden in buizen geplaatst met een isolerend gas, tot nu toe meestal SF₆. Door de betere isolatie-eigenschappen van SF₆ zijn veel kleinere isolatieafstanden nodig, waardoor de installaties compacter worden.

²³

Recent zijn er ook een aantal leveranciers die alternatieve gassen aanbieden, maar slechts één biedt dit aan op 380kV, namelijk General Electric met het samengesteld gas "g3".

Een GIL wordt best in rechte stroken geplaatst: de buigstraal is minimum 400m, tegenover enkele meters voor ondergrondse kabels. Korte, scherpe hoeken zijn echter mogelijk, maar zijn moeilijker te verwezenlijken.

De GIL kan op drie verschillende wijzen geplaatst worden:

- Ingegraven als een kabel of een gasleiding.
- Geplaatst in een tunnel waarbij er een betere afkoeling is dan bij ingraving en er dus een hogere transportcapaciteit kan worden gehaald. Ook de toegang tot de GIL is eenvoudiger.
- Bovengronds op structuren waardoor de toegang voor onderhoud zeer eenvoudig is en de kostprijs ook lager is dan bij een tunnel of het ingraven.

4.1.2.2.1 Toepassing op case study

Voor deze studie worden 2 GIL-circuits met een nominale spanning van 380kV in één tunnel gehanteerd als standaardcase voor deze technologie. Om het vereiste vermogen van 2x3GW te bereiken, zal er koeling in de tunnel moeten worden geplaatst, zodat de temperatuur in de GIL niet te hoog oploopt.

De capacatieve impedantie is per buis vier tot vijf keer lager dan één ondergrondse kabel¹⁴ en er zijn slechts 6 buizen nodig in plaats van²⁴ kabels. Hierdoor kan het aantal shuntreactoren beperkt worden tot drie.

²⁴

De elektrische capaciteit C van een GIL is beperkt tot 55nF/km per fase. (De typische waarden voor de AC-luchtlijnen uit onze case liggen nog eens vier keer lager.)



↑ **Figuur 15**
Doorsnede van een GIL-tunnel

4.1.2.3 Supergeleider

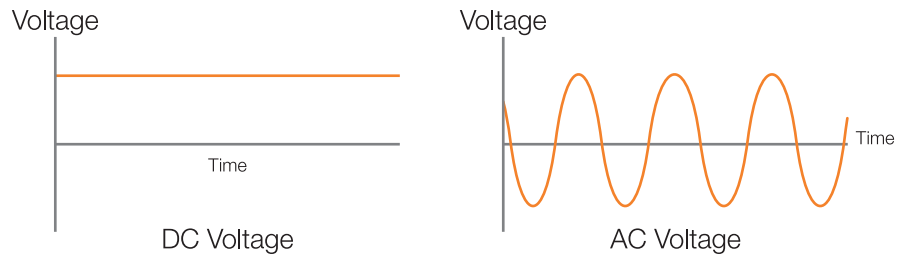
Supergeleiders hebben quasi geen weerstand, zodat zij de overdracht van grote vermogens via ondergrondse kabels mogelijk maken met hoge stromen (meer dan 2 tot 20kA) op verschillende spanningsniveaus (van 10kV tot meer dan 200kV).

Verschillende materialen worden momenteel onderzocht als geleider. Deze zijn meestal niet de gekende metalen, maar keramische materialen.

Opdat de geleidende kern supergeleidend wordt (het moment waarop de specifieke weerstand quasi volledig wegvalt), moet deze gekoeld worden tot zeer lage temperaturen door een cryogene vloeistof (bijvoorbeeld vloeibaar stikstof of vloeibaar

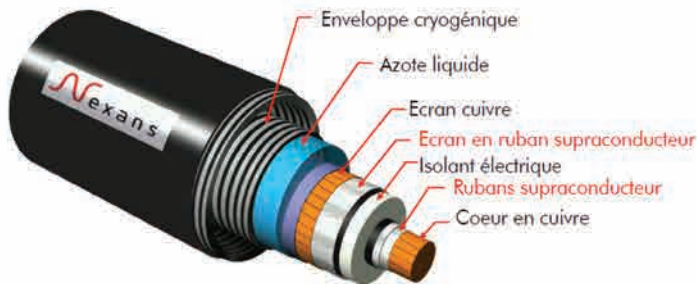
Representation of Visual Difference between DC and AC voltages

→ **Figuur 17**
Golfpatroon van gelijkspanning (links) en wisselspanning (rechts)



helium). Eventueel kan deze cryogene vloeistof ook gebruikt worden als isolatie.

Voor de druk- en temperatuurregeling van het systeem is het noodzakelijk om een koelinstallatie te hebben met pompen die de cryogene vloeistof door de kabel stuwt en met warmtewisselaars om de overtollige warmte af te voeren.



↑ **Figuur 16**
Overzichts-
schema van het
ontwerp van de
supergeleider
(bron: Nexans)

4.1.2.4 Toepassing technologie op case study

De enige verbindingen die gerealiseerd zijn met supergeleiders hebben spanning-niveaus van 10kV tot 110kV. Eén testlus (lengte 30m) is geïnstalleerd op 275kV²⁵. Na rondvraag zijn er kabelfabrikanten die beweren dat het design beschikbaar is tot 420kV (nominale spanning 380kV), maar hiervan zijn nog geen concrete prototypes beschikbaar.

Gebaseerd op wat er nu al bestaat, lijken stromen van 4000A tot 5000A haalbaar in één kabel. Indien de maximale spanning door verdere ontwikkelingen verder opgetrokken kan worden tot 380kV, zal een transportcapaciteit van 3GW mogelijk zijn via één circuit.

²⁵
Door Furukawa Electric

²⁶
Ook converter of omvormer genaamd.

4.2 DC-TECHNOLOGIE

Bij DC of gelijkspanning zal in tegenstelling tot AC de elektrische spanning niet periodiek wisselen tussen positieve en negatieve waarden, maar zal deze een continue waarde behouden. In tegenstelling tot het sinusoidale golfpatroon bij wisselspanning, zal de spannings-tijdgrafiek voor gelijkspanning eruit zien als een rechte lijn, zie figuur 17. Voor het transport van elektriciteit via een DC geleider zijn er 2 geleiders nodig (positieve pool en negatieve pool).

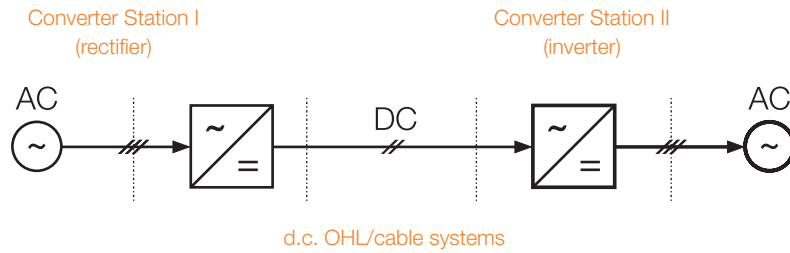
De DC-technologie heeft in de 20ste eeuw zijn intrede gedaan in de hoogspanningsnetten omdat zij volgende voordelen heeft ten opzichte van de AC-technologie:

- De technologie is geschikt voor onderzeese verbindingen (geen bovengrondse installaties nodig);
- Voor zeer lange afstanden is de investeringskost ook lager dan bij een klassieke AC-luchtlijn.
- Asynchrone netten kunnen met elkaar verbonden worden.

Op land wordt deze technologie voornamelijk gebruikt in landen met grote onderlinge afstanden, zoals Brazilië, Rusland, India, China en Noord-Amerika.

Een HVDC (*High-Voltage Direct Current*)-verbinding bestaat doorgaans uit drie hoofdsystemen (zie):

- Conversiestation²⁶ 1: dat een AC-net met een DC-transmissiesysteem verbindt en dat de wisselstroom (*AC- Alternate current*) omzet in gelijkstroom (*DC- direct current*).
- Conversiestation 2: dat het DC-transmissiesysteem met een AC-net verbindt (in voorkomend geval asynchroon met



↑ **Figuur 18**
Concept van een HVDC-verbinding

het eerste station) en dat gelijkstroom in wisselstroom omzet.

- DC-vermogenstransmissiesysteem bestaande uit (ondergrondse en/of onderzeese) kabels en/of lijnen en dat beide conversiestations met elkaar verbindt.

Een conversiestation fysisch verbinden met het AC-net komt neer op het installeren van een AC-verbinding tussen de AC-uitgang van het conversiestation en een hoogspanningspost. De te overbruggen afstand kan meerdere kilometers bedragen, afhankelijk van de inplanting van het conversiestation ten opzichte van de hoogspanningspost.

4.2.1 Conversiestations

Het omvormen van één spanning naar een andere is bij DC veel complexer dan bij AC. Deze omvorming (of transformatie) tussen twee AC-spanningen kan eenvoudig met een transformator.

Bij omvorming van AC naar DC en vice versa of tussen twee verschillende DC-spanningen is een volledig conversiestation nodig, waarbij een transformator maar één onderdeel is. We onderscheiden volgende onderdelen:

- Valve Hall: hier zijn de halfgeleiders (thyristoren of IGBT's – zie verder) ondergebracht. Deze halfgeleiders zijn het hart van het conversiestation en zorgen voor de effectieve omzetting **van AC naar DC en omgekeerd**;
- Transformator: deze regelt de spanning, maar heeft ook andere functies (bv. hoogfrequente **filter**);
- AC- en DC-schakelvelden
- Sturing en beveiliging;

27
Type halfgeleider

- Enkel bij LCC: AC-filters met het nodige schakelmateriaal.



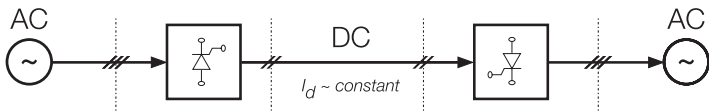
↑ **Figuur 19**
Voorbeeld van een LCC-conversiestation



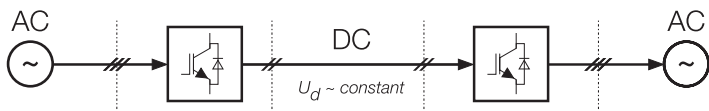
↑ **Figuur 20**
Voorbeeld van een VSC-conversiestation

Er bestaan twee types van conversiestations nl. LCC (*Line commutated Converters*) en VSC (*Voltage Source converters*).

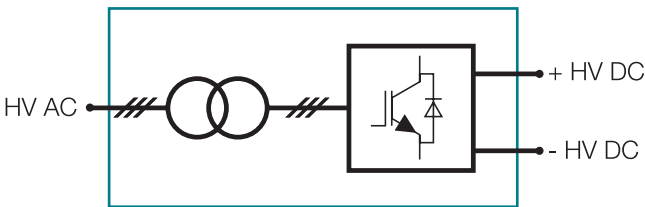
LCC-conversiestations of 'Line Commutated Converters' werken op basis van zogenaamde thyristoren²⁷ Hier vloeit de DC-stroom steeds in één richting door de HVDC-verbindingen. Indien we het vermogen de andere richting willen laten uitgaan,



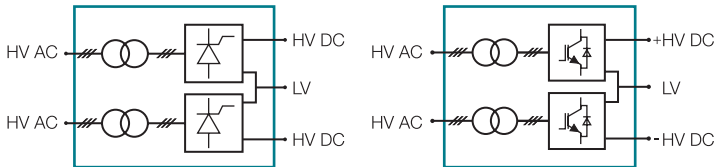
↑ **Figuur 21**
Overzichtsschema van een LCC-HVDC-verbinding



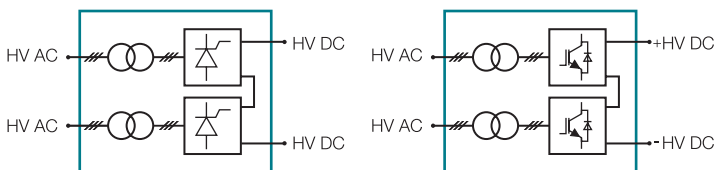
↑ **Figuur 22**
Overzichtsschema van een VSC-HVDC-verbinding



↑ **Figuur 23**
Overzichtsschema van een VSCSMP



↑ **Figuur 24**
Overzichtsschema van een LCC-BIP en een VSC-MMC-BIP



↑ **Figuur 25**
Overzichtsschema van een LCC-RBP en VSC-RBP

hetgeen in vermaasde netten frequent voorkomt, is dit enkel mogelijk door de spanning om te polen²⁸.

De AC-output van een LCC is ook geen mooie 50Hz sinusgolf. Er zit zeer veel "vervuiling" (rimpels) op de sinus. Om deze weg te werken is een hoogspanningsfilter nodig, die ongeveer 50% van de nodige oppervlakte beslaat. (Zie Figuur 19: Voorbeeld van een LCC-conversiestation)

VSC-conversiestations of 'Voltage Source Converters' werken op basis van IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistors of transistoren met parallel geschakelde vrijlooptioden). De HVDC-verbindingen hebben in dit geval een bijna constante DC-spanning. Een ompoling is dus niet nodig om het vermogen van richting te veranderen.

Door het inschakelen en uitschakelen van verschillende IGBT's in serie kan de gewenste spanningsgolf opgebouwd worden. Een hoogspanningsfilter is daarom niet of zeer beperkt nodig. Meer zelfs, deze installatie kan zelf gebruikt worden als filter.

4.2.1.1 Topologieën

Zowel voor LCC- als VSC-conversiestations kan men ook verschillende topologieën of configuraties gebruiken. De belangrijkste topologieën voor onze toepassing zijn:

- **Symmetrische monopool ('symmetrical monopole' of SMP):** deze topologie komt alleen voor bij VSC-conversiestations. Dit is de meest eenvoudige topologie en is hierdoor over het algemeen iets kleiner en goedkoper.
- **Bipool (BIP)** die bestaat uit twee in serie geschakelde conversiestations waarbij één geplaatst wordt tussen de positieve pool en een nulgeleider (metallic run) en de andere tussen de negatieve pool en de nulgeleider. Beide conversiestations kunnen in dit geval volledig onafhankelijk van elkaar werken. Deze specifieke topologie kan zowel voor LCC- als voor VSC-conversiestations gebruikt worden.

- **'Rigid Bipole' (RBP):** dit is een bipool zonder nulgeleider. Deze topologie wordt gebruikt wanneer het vermogen te groot is voor één enkele transformator, maar nog laag genoeg dat het wegvallen van het volledige systeem toegelaten is voor het net. Ook RBP's worden zowel voor LCC- als voor VSC-conversiestations gebruikt.

Er bestaan dus vijf topologieën van een HVDC-conversiestation, met name:

- LCC-BIP
- LCC-RBP
- VSC-SMP
- VSC-BIP
- VSC-RBP

4.2.1.2 Vermogen

Het maximaal overdraagbaar vermogen door een conversiestation wordt beperkt door de volgende factoren:

- de nominale DC-spanning van het HVDC-systeem,
- de maximale stroom die in de halfgeleiders kan vloeien, en
- de maximale stroom die in andere AC- en DC-apparatuur kan vloeien.

→ DC-Spanning

Op dit moment bestaat er geen Europees DC-net. De spanning kan daarom nog vrij gekozen worden, rekening houdend met de door Cigré aanbevolen standaardniveaus²⁹. De spanningen die in ons geval van toepassing zijn, zijn:

- ± 320 kVdc
- ± 400 kVdc
- ± 500 kVdc
- ± 600 kVdc³⁰

²⁸

De "+" pool wordt de "-" pool en omgekeerd.

²⁹

Technical Brochures Brochures 684 "Recommended voltages for HVDC grids", Cigré, 2017

³⁰

Um = ± 640 kVdc.

→ Stroom halfgeleiders

Hier moeten we een onderscheid maken tussen LCC- en VSC-conversiestations. Bij VSC is de maximale stroom van een conversiestation op dit moment gelimiteerd tot 3000A en maar een beperkt aantal leveranciers kunnen dit al halen. Bij LCC geldt deze beperking niet.

→ Stroom AC- en DC-apparatuur

De maximaal overdraagbare stroom door de meeste AC- of DC-apparatuur op de markt (bv. meetapparatuur en schakelmateriaal) is beperkt tot 5000A.

4.2.1.3 Impact van een luchtlijn

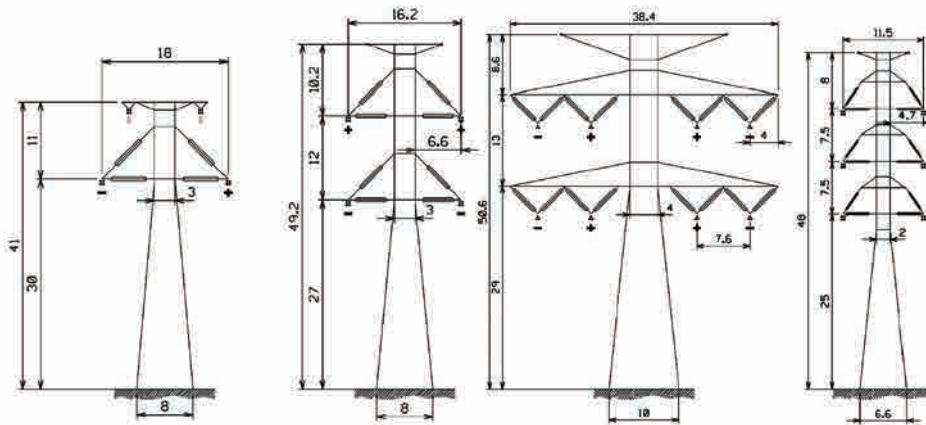
Indien het DC-transmissiesysteem segmenten uitgevoerd in luchtlijn bevat, moet men rekening houden met de gevolgen van blikseminslagen op de geleiders. VSC-conversiestations zullen namelijk afschakelen bij elke blikseminslag indien er geen extra maatregelen worden genomen.

Hiervoor zijn twee oplossingen: speciale schakelsequenties of het 'Full bridge' maken van het conversiestation. Dit laatste houdt een ontdubbeling van het aantal halfgeleiders in, hetgeen een belangrijke prijssimpact heeft. We verwachten echter dat in de toekomst de voorkeur zal gegeven worden aan het gebruik van speciale schakelsequenties. Hiervoor is extra schakelapparatuur nodig, in combinatie met voorgeprogrammeerde schakelsequenties.

4.2.1.4 Technologie toegepast op case study

Op basis van deze gegevens en rekening houdend met een totaal vermogen van 6GW en 3GW bij onderhoud of defect, zijn volgende topologieën geschikt voor onze toepassing:

→ **Figuur 26**
DC-mastsilhouetten (vlnr: 1 x ±600kV met metallic return, 2 x ±500kV, 4 x ±320kV en de 380kV AC compacte mast)



- voor de LCC-HVDC-technologie
 - 2 onafhankelijke conversiestations van 3000MW op minstens ±320kVdc aan beide uiteinden van de verbinding. Dit kan zowel in bipole met metallic return als met een rigid bipole.
 - 1 bipole met metallic return van 6000MW op ±600kV_{dc} aan elke zijde van de verbinding.
- bij de VSC-HVDC-technologie is het niet mogelijk om het volledige vermogen via één enkel installatie om te vormen.
 - Indien de leverancier 3000A kan aanbieden op minstens ±500kVdc, is een oplossing mogelijk met 2 conversiestations van 3GW aan beide uiteinden van de verbinding. Hier valt op te merken dat, voor zover ons bekend, vandaag slechts een beperkt aantal fabrikanten van deze conversiestations dergelijke systemen kunnen leveren (zie ook §5.1.3. maturiteit).
 - Indien 3000A niet mogelijk is of indien lagere spanningsniveaus nodig zijn, zijn 3 of meer conversiestations noodzakelijk aan beide uiteinden van de verbinding

Mits het vermogen per conversiestation beperkt is, zijn hier alle topologieën mogelijk.

4.2.2 Bovengronds – luchtlijn

4.2.2.1 Algemeen

Rond 2000 deden DC-luchtlijnen hun intrede in Europa. Deze bleken nodig om energiestromen, in het bijzonder van hernieuwbare bronnen zoals in Scandinavië, over zeer lange afstanden te transporteren naar de consumptiecentra. Deze verbindingen zijn vaak van gemengde aard, nl. ondergrondse of onderzeese kabels gecombineerd met bovengrondse luchtlijnen op land.

Voor de luchtlijn is er ook nauwelijks een verschil als LCC-HVDC- of van VSC-HVDC-technologie wordt gebruikt.

4.2.2.2 Mastsilhouet

Vandaag bestaat er nog geen reglementering met betrekking tot HVDC-lijnen in het AREI. Overleg met de bevoegde instanties zal dan ook noodzakelijk zijn om de buitengrenzen van nabijheidszones³¹ en minimumafstanden³² vast te leggen. We hebben ons daarom vooral gebaseerd op de publicatie TB388 van Cigré, alsook op ervaringen bij andere Europese netbeheerders en extrapolatie van afstanden vermeld in het AREI voor AC- installaties. Als vuistregel kunnen we voor eenzelfde spanningswaarde het volgende stellen:

- Minimale afstanden tussen één fase en geaarde delen moeten in DC 20% groter zijn dan bij AC³³. Omdat DC vuil aantrekt op de isolatoren, worden de isolatoren zelfs 50% groter genomen.

31

xxx

32

De geleiders van luchtlijnen moeten zich op een bepaalde afstand bevinden van het grondvlak van openbare wegen, van overspannen binnenplaatsen, tuinen en terreinen en van de gebouwen. Deze afstand wordt «minimumafstand» genoemd zoals bepaald voor AC-lijnen in Onderafdeling 7.1.3.5 van Boek 3 van het AREI

33

Voor de maximale waarde van de spanning tussen fase en aarde geldt: $U_{dc} = \sqrt{3}/\sqrt{2} U_{ac,RMS}$

34

Hier moet een extra factor $2/\sqrt{3}$ toegevoegd worden.

Variante	Stroom (In)	Bundel geleider
LCC ± 320 kV rigid bipole 3000 MW	4 700 A	4x707 AMS-2Z
LCC ± 600 kV bipole met nulgeleider 6000 MW	5 000 A	4x928 AMS-3Z
VSC ± 320 kV symmetric monopole 1500 MW	2 350 A	2x707 AMS-2Z
VSC ± 500 kV rigid bipole 3000 MW	3 000 A	4x707 AMS-2Z ³⁶

↑ Tabel 2

Verskillende types geleiders van de DC-lijn

- De minimale afstand tussen twee verschillende fasen (of polen) is 40% groter dan bij AC³⁴.

Toegepast op de vier varianten van convertoren die vorig hoofdstuk zijn weerhouden, geeft dit de mastsilhouetten weergegeven in volgende figuur.

Hierbij gelden volgende opmerkingen:

- Bij de LCC ± 600 kV bipool hebben we ervoor gekozen om de nulgeleider te ontdebelen en aan beide zijden van de mast te plaatsen. Hierdoor kan bij onderhoud steeds één volledige zijde van de mast spanningsloos worden geplaatst. Bijkomend voordeel is dat de nulgeleider zo ook kan gebruikt worden als waakdraad (bescherming tegen blikseminslagen) zodat er geen meerkost is. Een zeer brede mast met de "+", "-" en "0"-geleider naast elkaar zou ook mogelijk zijn.
- Bij de variant VSC ± 320 kV SMP kan men ofwel kiezen voor één 'vierdraadstel'-mast zoals getoond op bovenstaande figuur, ofwel voor twee eenvoudige masten die naast elkaar worden geplaatst. Deze zullen sterk lijken op de LCC ± 320 kV masten. Eventueel kunnen de geleiders (en daardoor ook het mastlichaam) lichter uitgevoerd worden dan in de LCC-variant.

Afhankelijk van het spanningsniveau van de DC-lijn wordt de keuze van type en aantal deelgeleiders niet enkel door het vermogen bepaald, maar ook door het geluidsniveau.³⁵ Volgende geleiders worden voorzien:

4.2.2.3 Technologie toegepast op case study

Zowel bij de conversiestations als bij de luchtlijnen zijn er veel mogelijkheden. Er is namelijk keuze qua technologie, topologie, spanning en maximaal vermogen. Het is onmogelijk om alle combinaties verder in detail te bestuderen. Met volgende vier gevallen is het mogelijk om de impact van elke parameter te analyseren volgens de verschillende evaluatiecriteria. In deze case study zullen we ons daarom beperken tot deze gevallen.

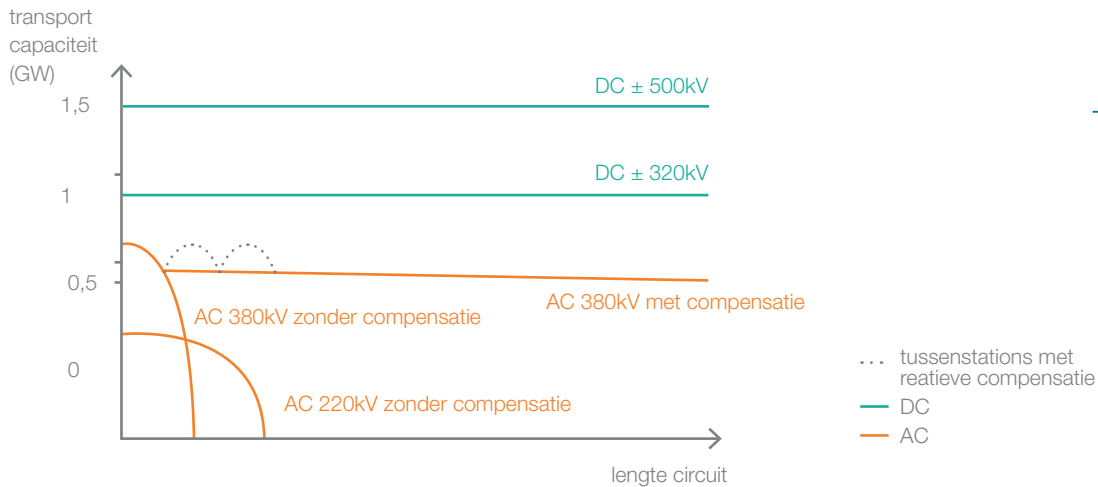
- 2xLCC ± 320 kV rigid bipole 3000MW aan beide zijden, 4x707 AMS-2Z, met mastsilhouetten volgens figuur 26: deze oplossing geeft de meest compacte masten.
- 1xLCC ± 600 kV bipole met nulgeleider 6000MW, 4x928 AMS-3Z, met mastsilhouetten volgens figuur 26: dit is de enige oplossing met slechts één conversiestation aan elk uiteinde.
- 4xVSC ± 320 kV symmetric monopole 1500MW aan beide zijden, 2x707 AMS-2Z, met mastsilhouetten volgens figuur 26: deze oplossing heeft het voordeel dat gewerkt kan worden met de goedkopere en compactere symmetrische monopolen. Om de corridor zo smal mogelijk te houden werd ervoor gekozen om één vier-draadstel mast te gebruiken in plaats van twee afzonderlijke masten.

³⁵

Zie ook Cigré, technische brochure 388 'Impact of HVDC lines on the economics of HVDC projects' en §8.3.

³⁶

Overgedimensioneerd om het geluidsniveau te beperken (zie ook §8.3)



→ **Figuur 27**
De transmissiecapaciteit van ondergrondse kabels volgens hun lengte

- 2xVSC $\pm 500\text{kV}$ rigid bipole 3000MW aan beide zijden, 4x707 AMS-2Z, met mastsilhouetten volgens figuur 26: dit is de enige VSC-oplossing met maar twee circuits.

Net zoals bij AC-luchtlijnen kunnen andere mastsilhouetten ontworpen worden. De hier gekozen mastsilhouetten leunen zo kort mogelijk aan bij deze van AC om een zo correct mogelijke vergelijking te kunnen doen.

4.2.3 Ondergronds

4.2.3.1 Kabel

Momenteel zijn er twee types kabels gangbaar voor DC-verbindingen: *Mass Impregnated* (MI) en *Cross-linked Polyethyleen* (XLPE).

Bij MI-kabels bestaat de isolatie uit papier die in olie is gedrenkt. De MI-kabels hebben ook een grote kromtestraal³⁷ waardoor er minder wikkelingen kunnen op één bobijn³⁸. Dit zorgt ervoor dat maar 500m kabel per keer kan getransporteerd worden. Er zijn dus veel stukken die aan elkaar gezet moeten worden en bovendien is het aan elkaar zetten van twee stukken MI-kabel zeer arbeidsintensief. Gezien de lengte van de verbinding, het aantal parallelle circuits en de strakke timing van de beschouwde projecten, is deze optie niet realistisch qua timing³⁹. Gelet op deze be-

perking zal dit type van kabel niet verder worden bestudeerd.

XLPE-kabels voor DC-verbindingen zijn gelijkwaardig aan deze voor de AC-verbindingen. Deze kabels hebben een lage kromtestraal en vergen dus minder “moffen”. Dit type kabel is dan ook geschikt voor lange kabelverbindingen op het vasteland.

Bij LCC-conversiestations moesten tot voor kort MI-kabels gebruikt worden. Er is echter onderzoek bezig om ook XLPE-kabels te gebruiken en één leverancier heeft zelfs een XLPE-kabel in dienst met LCC-conversiestations⁴⁰.

De bepaling van de maximale stroom door een DC-kabel loopt gelijkwaardig aan deze van een AC-kabel met de uitzondering dat er geen stromen geïnduceerd worden in de schermen van naburige kabels, waardoor er hier geen warmte wordt geproduceerd. Daarom kunnen de kabels ook dichter bij elkaar worden geplaatst zonder veel aan transmissiecapaciteit in te boeten. Er treedt ook geen *skin effect* op en het is daarom niet nodig om de verschillende geleiders in de kern te emalleren om de kabel optimaal te benutten.

De maximale sectie van de geleider die gangbaar is op de markt, is net als bij AC-kabels 2500mm^2 . De hoogste spanning momenteel in aanbouw is de $\pm 400\text{kV}$ -kabel voor de Nemolink tussen België en het Verenigd Koninkrijk, maar de

37

Dit is de minimum straal van de bochten. Een grotere kromtestraal betekent dus dat ruimere bochten moeten genomen worden.

38

Dit is een “haspel” geschikt voor transport van HV-kabels.

39

Dit type kabel wordt voornamelijk gebruikt voor offshore verbindingen waar de kabel op een boot op een veel grotere bobijn kan worden gewikkeld en dus niet om de 500m vermoft moet worden.

40

Sumitomo Electric Industries met de Hokkaido-Honshu link

meeste leveranciers geven aan dat 500kV ook haalbaar is.

Volgende vermogens zijn haalbaar per kabelcircuit:

- ± 320 kV: 1000MW
- ± 500 kV: 1500MW

Een groot verschil met AC-kabels is dat bij DC geen reactieve energie bestaat en er dus ook geen tussenstations moeten geplaatst worden. Het transportvermogen bij DC-kabels daalt nauwelijks met de afstand (zie figuur 27).

4.2.3.2 Technologie toegepast op de case study

Om het aantal conversiestations en het aantal parallelle circuits te beperken, bekijken we hier enkel 500kV-oplossingen. Dit is namelijk de maximale gangbare spanning voor DC-kabels.

- 2 x LCC 500kV rigid bipole 3000MW aan beide zijden, met 2 kabelcircuits per conversiestation dus 4 kabelcircuits in totaal
- 4 x VSC 500kV symmetric monopole 1500MW aan beide zijden, met 1 kabelcircuit per conversiestation dus 4 kabelcircuits in totaal: deze oplossing heeft het voordeel dat gewerkt kan worden met de goedkopere en compactere symmetrische monopolen. Bovendien verliezen we slechts 1,5GW bij een incident en werken we hier niet op de limieten van wat haalbaar is op de markt, hetgeen een ruimere concurrentie toelaat.

- 2 x VSC 500kV rigid bipole 3000MW aan beide zijden, met 2 kabelcircuits per conversiestation dus 4 kabelcircuits in totaal: dit is de enige VSC-oplossing met maar twee conversiestations.

Oplossing met bipolen met nulgeleider worden niet weerhouden omdat deze zorgen voor 50% meer kabels.

4.2.3.3 GIL

De DC-GIL is nog in ontwikkeling. Op dit moment zijn nog geen details beschikbaar, maar we gaan ervan uit dat dit gelijkaardig zal zijn aan de AC-GIL, waarbij slechts twee buizen per circuit nodig zijn.

4.2.3.4 Supergeleider

Deze technologie is zeer gelijkaardig aan de AC-technologie. In het kader van het Best Paths⁴¹ project is een eerste testlus (30m) gebouwd op ± 320 kV, met een nominale stroom van 10.000A, hetgeen een vermogen geeft van 3,2GW per pool. Met deze kabel zou het dus mogelijk zijn om op ± 320 kV een LCC bipool te maken met nulgeleider van 6GW. Bij VSC is de maximale stroom in de IGBT's op dit moment de beperkende factor en zouden er dus nog steeds 2 circuits nodig zijn.



Evaluatiecriteria

5.1 | Technisch

5.1.1 | Betrouwbaarheid & beschikbaarheid

5.1.2 | Impact op de netuitbating

5.1.3 | Maturiteit

5.1.4 | Flexibiliteit en aftakkingen

5.1.5 | Opportuniteiten

5.2 | Economisch

5.2.1 | Investeringskost

5.2.2 | Onderhoudskost

5.2.3 | Netverliezen

5.3 | Impact op milieu & omgeving

5.3.1 | Grondinname tijdens en na werken

5.3.2 | Visuele impact

5.3.3 | Geluid

5.3.4 | Magnetische velden

5.3.5 | Broeikasgasemissies



Evaluatiecriteria

5.5 TECHNISCH

5.5.1 Betrouwbaarheid & beschikbaarheid

De **beschikbaarheid** en **betrouwbaarheid** van een bepaalde technologie zijn belangrijke criteria, zeker gezien het hier de 380kV backbone betreft. Deze dient immers steeds operationeel te zijn om zijn maatschappelijke rol te vervullen (integratie van hernieuwbare energie, marktintegratie en bevoorradingszekerheid) en dit bij een toenemende complexiteit (grotere, variabele energiestromen in een supranationale context). Om dit te kunnen realiseren mag het niet gebeuren dat een verbinding geregeld onbeschikbaar is en mogen herstellingswerken niet te lang duren. Bovendien, zoals eerder vermeld, dient bij uitval van één element de werking van het net gegarandeerd te blijven.

De beschikbaarheid en betrouwbaarheid zijn ook afhankelijk van hoe andere netelementen zich gedragen. Het is echter onmogelijk om al deze elementen op te nemen en we hanteren in deze studie dan ook twee maatstaven om dit criteria in te vullen. Deze zijn, gerangschikt van meest kritisch naar minder kritisch:

- **De faalkans** van een circuit: dit is het aantal keer dat een circuit faalt over de periode van één jaar ('forced outage rate').
- **De hersteltijd**. Samen met de faalkans kunnen we hiermee de tijd berekenen dat een circuit onvoorzien onbeschikbaar is ('Forced Energy Unavailability').

5.1.2 Impact op de netuitbating

Het elektriciteitsnet uitbaten (het garanderen van het evenwicht op elke seconde 24u op 24u, het plannen van het onderhoud

van het net,...) is zeer complex. Bepaalde technologieën kunnen ervoor zorgen dat de complexiteit nog verder toeneemt. Vermits Elia ernaar streeft om het net op een zo efficiënt mogelijk maar uiteraard ook op een veilige manier haar net uit te baten, worden er ook verschillende criteria opgenomen die gelinkt zijn aan de impact van een technologie op de netuitbating.

Het **aantal elementen die nodig zijn om de verbinding te maken**, hebben een directe impact op de complexiteit van de uitbating van deze verbinding.

Naast deze complexiteit kunnen er ook bepaalde **netfenomenen** ontstaan. Dit kan gezien worden als een "vervuiling" van het net vermits deze fenomenen niet wenselijk, moeilijk voorspelbaar zijn en een impact kunnen hebben op de elektrische installaties van klanten die verbonden zijn aan het net. Bovendien kunnen zij tot een instabiel net leiden, wat onaanvaardbaar is. Enkele voorbeelden hierbij zijn resonanties (harmonischen of eigenfrequenties), transiënten en spanningsprongen.

Een bijkomend criteria is de **korstluitstroom**. Indien er een kortsluiting plaatsvindt, voeden de omliggende productie-eenheden deze fout en hierdoor zullen grote foutstromen ontstaan. Deze foutstromen dienen onder een bepaalde limiet te worden gehouden om te vermijden dat "gezonde" installaties tijdens de kortsluiting beschadigd worden en dat bijkomende netelementen uitvallen. Een technologie die erin slaagt om de korstluitstroom zo laag mogelijk te houden (of de foutstroom zoveel mogelijk kan dempen), zal dus beter scoren in deze analyse. Kortsluitvermogens boven 63kA zijn niet meer standaard voor hoogspanningsmateriaal. In dat geval zullen dan de bestaande installaties ook in de eindstations volledig vervangen moe-

ten worden. Vandaar dat er maatregelen dienen genomen te worden bij het gebruik van technologieën die deze grens zouden overschrijden⁴².

Een laatste criterium is de **heropbouw van het net** na een eventuele black-out. Een net in opbouw is zeer zwak⁴³ en fragiel. Sommige technologieën werken niet in deze situatie of kunnen het net in opbouw terug doen instorten. Doordat klassieke productie-eenheden meer en meer worden vervangen door kleine hernieuwbare productie-eenheden zal dit aandachtspunt in de toekomst nog belangrijker worden. Bij de technologieën die wel geschikt zijn is ook de snelheid waarmee de verbinding terug operationeel kan zijn belangrijk. Dit is sterk afhankelijk van uit hoeveel elementen de verbinding bestaat. Een verbinding uit veel elementen terug inschakelen zal veel langer duren en zal dus minder goed scoren op dit criterium.

5.1.3 Maturiteit

De maturiteit van een technologie omvat volgende aspecten:

- Hoe lang bestaat de technologie en wordt deze vaak toegepast;
- Zijn er veel ontwikkelaars;
- Hebben andere transmissienetbeheerders al ervaring met deze technologie.

Dit criterium wordt als zijnde beter beoordeeld naarmate de technologie al een lange geschiedenis heeft, er verschillende ontwikkelaars zijn en ervaringen in het buitenland de technologie bevestigen.

Beide projecten beschreven in paragraaf 3 hebben een zeer strakke timing. De tijd voor nieuwe ontwikkelingen is zeer beperkt. We weerhouden daarom enkel beproefde technologieën, liefst door verschillende ontwikkelaars.

42

Vermogensschakelaars 80kA om een hoge tijdsconstante te compenseren kunnen wel aanvaard worden.

43

Een zwak net is een net met een laag kortsluitvermogen.

5.1.4 Flexibiliteit en aftakkingen

De ontwikkeling van de nieuwe corridors laat desgewenst toe om de link met de onderliggende, regionale netten te versterken. Dit gebeurt door de creatie van aftakpunten op de corridor waar dan een transformator of conversiestation wordt geplaatst naar het onderliggende net. Deze transformator kan zowel energie aanvoeren als afvoeren.

Deze aftakpunten zijn belangrijk, gelet op:

1. de veranderende energiemix: een toenemend aandeel hernieuwbare dus variabelere productie in combinatie met een afnemend aandeel klassieke centrales in de regionale netten
2. de rationalisatie van de structuur van de onderliggende netten die hiermee mogelijk wordt gemaakt.

Bepaalde technologieën zijn eenvoudiger aan te passen om bijvoorbeeld een nieuw hoogspanningsstation op aan te sluiten of kunnen eenvoudiger en sneller uitgebreid worden met aftakpunten om zo in te spelen op nieuwe behoeften. Deze technologieën zullen dan ook beter scoren op de evaluatie.

5.1.5 Opportuniteiten

Een aantal technische criteria zijn niet verplicht voor de verwezenlijking van de projecten beschreven in paragraaf 3, maar kunnen wel een voordeel opleveren, nu of in de toekomst. Dit criterium leidt dus niet tot de uitsluiting van een technologie, maar kan wel de onderlinge ranking beïnvloeden.

Het eerste criterium is de **mate van overbelasting** die toelaatbaar is voor een technologie. Dit kan een voordeel zijn indien de belasting op het net zeer hoog is en dient overschreden te worden (zeer uitzonderlijk).

Een tweede opportuniteit is het leveren van **reactief vermogen**. Het toekomstig hoogspanningsnet zal meer en meer behoefte hebben aan installaties die reactief

vermogen kunnen injecteren en absorberen. Indien een technologie reactief vermogen kan leveren is dit een voordeel voor de stabiliteit van het elektriciteitsnet.

Tot slot beschouwen we ook het kunnen **sturen van fluxen** als een opportuniteit. Hierdoor kan het net efficiënter gebruikt worden en kunnen andere maatregelen, zoals het plaatsen van Phase Shifting Transformers (PST's) vermeden worden.

5.2 ECONOMISCH

5.2.1 Investeringskost

De **investeringskost** omvat de kost voor de studies, het design, het materiaal en de bouwkundige en elektrische werken. Er wordt nog geen rekening gehouden met de kosten die gepaard gaan met de aankoop van terreinen en compensaties.

Bij DC-technologieën is de kans reëel dat de conversiestations omwille van hun omvang niet vlakbij een bestaand hoogspanningsstation kunnen worden ingeplant. In deze situaties dient een bijkomende AC-verbinding te worden gemaakt tussen de conversiestations en het AC-hoogspanningsstation. Verder zullen ook bijkomende terreinen moeten worden aangekocht. Deze potentiële meerkost wordt nog niet in rekening gebracht.

Het is ook niet evident om goed cijfermateriaal te vinden om een economische vergelijking te maken. Volgende bronnen zijn beschikbaar:

- Soortgelijke projecten: gedetailleerde cijfers van relevante projecten worden zelden publiek gemaakt. Meestal wordt er één enkel totaalcijfer meegedeeld, maar het is niet altijd duidelijk wat er wel en wat er niet in dit bedrag vervat zit (ook eindstations, aankoop van gronden, verzekering, ...?). Ook is elk project net iets anders, maar doordat er geen detail is, is het moeilijk in te schatten hoe de prijs moet aangepast worden.

- Leveranciers: voor deze studie hebben we een tiental leveranciers van de belangrijkste materialen gesproken. Veel van de technologieën hier besproken zijn nog maar net op de markt of zelfs nog in een R&D-stadium. De meeste leveranciers waren daarom niet bereid gedetailleerde info te geven en meermaals hebben we geheel geen antwoord gekregen. De beste informatie waren een aantal vuistregels, zoals "Als het vermogen met x% verhoogt, stijgt de prijs met ongeveer y%".

In de gevallen dat we wel een budgettaire prijs hebben gekregen moeten we er rekening mee houden dat dit meestal een basisprijs is voor het ideale geval. Elk project komt obstakels tegen die de prijs verhogen.

Ook is de meeste informatie die we hebben gekregen vertrouwelijk, waardoor het minder bruikbaar is voor dit rapport en we niet altijd kunnen refereren naar onze bronnen.

- Eigen projecten: hierbij weten we zeer goed hoe de prijs is opgebouwd en er is ook geen probleem om de bron te citeren. Een aantal technologieën zijn evenwel nog niet toegepast binnen Elia en wat de technologieën betreft die reeds zijn toegepast, was dit meestal op kleinere schaal.

Om zo goed mogelijke prijzen op te stellen, hebben we ervoor gekozen om ons zoveel mogelijk op eigen en recente (bijna) afgewerkte projecten te baseren en waar nodig deze prijzen te extrapoleren. Soms hebben we ons moeten baseren op prijzen van leveranciers. In deze gevallen hebben we de prijzen met 10% verhoogd om eventuele onvoorziene kosten te compenseren. De finale prijzen hebben we getoetst met de prijzen gehanteerd in buitenlandse projecten.

Bovenop de technische basisoplossingen die voor de verschillende technologieën beschreven zijn in hoofdstuk 4, zullen ook twee opties mee bekeken worden:

- Sturing van fluxen: bij DC is dit een opportuniteit van het conversiestation. Bij AC moeten hiervoor PST's of Phase Shifting Transformers geplaatst worden in één van de eindstations.
- Aftakking: we zullen hier een redundante injectie naar het 150kV net beschouwen. Op het (AC) Elia-net gebeurt dit momenteel door middel van twee transformatoren 555MVA. Bij DC nemen we hiervoor twee conversiestations met hetzelfde vermogen.⁴⁴

Verder trachten we steeds een inschatting te maken van de prijzen vandaag en een vooruitzicht te geven binnen 5 jaar, wanneer de new corridor-projecten effectief besteld zullen worden.

Opmerking: omdat prijzen voor gronden sterk kunnen verschillen, zijn deze niet meegenomen in de vergelijking.

5.2.2 Onderhoudskost

Periodieke controle, opvolging en onderhoud (zoals bv. schilderwerken) van de elektrische installaties zijn zeer belangrijk. Door regelmatige opvolging kunnen defecten (tijdig) opgespoord en hersteld worden. Uiteraard brengt dit ook een kost met zich mee die afhankelijk is van technologie tot technologie. Voor deze kost zullen we ons baseren op de statistieken die Elia hierover bijhoudt.

5.2.3 Netverliezen

Door een verbinding loopt stroom, hierdoor warmt de verbinding op en gaat er een deel van het geproduceerde vermogen op natuurlijke of gedwongen wijze verloren in de vorm van warmte. Dit zijn **actieve netverliezen**. De groep van netverliezen bestaat ook nog uit de **nullastverliezen** die zich

manifesteren indien er zelf geen vermogen wordt getransporteerd alsook de verliezen veroorzaakt door inwendige schakelingen.

De netverliezen evolueren anders als we het vermogen laten variëren. Voor de berekeningen van de verliezen zal het belastingprofiel uit paragraaf Belasting genomen worden.

Om de kostprijs van de verliezen te berekenen baseert Elia zich op de door ENTSO-E ontwikkelde methode nl. een *societal cost-benefit* analyse. In deze oefening wordt een gemiddelde kostprijs van 60€/MWh in rekening gebracht. Dit valt binnen de verwachte toekomstscenario's beschreven in het *Ten Year Network Development Plan* van 2018⁴⁵. Hierbij worden de verliezen geschat op basis van de groothandelsprijs van elektriciteit op de *day-ahead* markt. Hun inschattingen variëren tussen 50€/MWh tot 90€/MWh. We zullen ook de invloed van deze range bespreken.

Een technologie die weinig verliezen genereert, zal dus ook beter scoren op de kost voor de netverliezen.

5.3 IMPACT OP MILIEU & OMGEVING

5.3.1 Grondinname tijdens en na werken

Met betrekking tot grondinname wordt er een onderscheid gemaakt tussen de inname tijdens de werken en erna. De inname wordt uitgedrukt in m² en daarna omgerekend naar voetbalvelden (0,5ha of 5000m²).

5.3.2 Visuele impact

De visuele impact is een criterium dat moeilijker te objectiveren valt en ook niet kan worden uitgedrukt in een objectieve meeteenheid. Dit criterium wordt dan ook kwalitatief beschreven.

44

Dit vermogen zou enerzijds iets lager genomen kunnen worden omdat enkel actief vermogen wordt geconverteerd. Anderzijds moet het vermogen verhoogd worden om de cyclische overbelasting van transformatoren te compenseren.

45

Bron: zie <https://tyndp.entsoe.eu/maps-data/> met volgende publicatie : <https://www.entsoe.eu/Documents/TYNDP2018/documents/TYNDP2018/Scenarios%20Data%20Sets/Scenario%20Building%202018%20Outputs.xlsx>.

5.3.3 Geluid

Voor geluid (uitgedrukt in decibel) bestaat er in de verschillende gewesten een eigen wettelijk kader voor de immissies ten gevolge van installaties in hoogspanningsstations.

In Vlaanderen is dit VLAREM-II. Hoogspanningsposten moeten geluidsnormen respecteren waarbij de bestemming van het gebied en de periode van de dag meespelen voor een evaluatie. Transformatoren, shuntreactoren en PST's worden bijna altijd nog eens gepenaliseerd door het dikwijls voorkomen van "tonaal geluid". Niet-ingedeelde inrichtingen, zoals hoogspanningsleidingen, maar ook schakelapparatuur en dergelijke, moeten eveneens aan geluidsnormen voldoen. In Vlaanderen zijn deze normen gelijk aan deze voor ingedeelde inrichtingen. De vergunningverlenende overheid kan strengere geluidsnormen opleggen.

In Wallonië zijn de normen bepaald in het "Besluit van de Waalse Regering dat de algemene uitbatingsvoorwaarden vastlegt van inrichtingen zoals bedoeld door het decreet van 11 maart 1999 betreffende de milieuvergunning". Ook hier variëren de geluidsnormen naargelang de periode van de dag en de bestemming van het gebied. Er is een penaltiteit voor tonaal geluid. De geluidsnormen in een vergunning kunnen strenger of soepeler zijn dan de wettelijke bepalingen.

Voor bovengrondse hoogspanningslijnen is ook een Belgische norm (NBN EN50341-3) van toepassing. Volgens deze norm mag het hoorbare geluid van een bovengrondse hoogspanningsverbinding van meer dan 45kV op een afstand van 20m tot de dichtstbijzijnde geleider niet hoger zijn dan 53 dB(A) bij slecht weer en 40 dB(A) bij mooi weer in residentiële bebouwde wijken.

Elke technologie moet voldoen aan het wettelijk kader. De wijze waarop en mate waarin hier aan voldaan kan worden, ver-

schilt tussen deze verschillende technologieën. Afhankelijk van de technologie kan het mogelijk zijn dat ingrijpende maatregelen (bv. hoge geluidsmuren) genomen dienen te worden om de normen te kunnen halen.

5.3.4 Magnetische velden

Voor magnetische velden zijn diverse wetgevingen/normen/aanbevelingen van toepassing.

Op Europees niveau is 100 μ T opgenomen als grenswaarde in de Aanbeveling 1999/519/CE voor publieke blootstelling aan elektromagnetische velden. Deze aanbeveling is niet-bindend.

In Wallonië en het Brussels Hoofdstedelijk Gewest zijn er normen voor de uitbating van transformatoren: een grenswaarde van 100 μ T wordt opgelegd.

In Vlaanderen zijn in het "Besluit houdende maatregelen tot bestrijding van de gezondheidsrisico's door verontreiniging van het binnenmilieu" richt- en interventiewaarden voor magnetische velden vastgelegd op respectievelijk 0,4 μ T (op jaargemiddeld niveau) en 20 μ T (gemiddeld op dagniveau). De Mededeling aan de leden van de Vlaamse Regering over nieuwe luchtlijnen op hoge spanning (VR 2012 0106 MED.0252/1) bevat o.a. volgende aanbevelingen voor wonen en verblijven in de buurt van hoogspanningslijnen:

- Bij nieuwe hoogspanningslijnen het overspannen van bestaande gevoelige functies (scholen, kinderdagverblijven)/woningen/ onbebouwde woonpercelen tot een minimum beperken.
- Geen nieuwe gevoelige functies plaatsen in de magneetveldzone van bestaande hoogspanningslijnen.

Tenslotte is er op federaal vlak het Advies van de Hoge Gezondheidsraad (nr 8081) uit 2008 dat adviseert om kinderen jonger dan 15 jaar niet langdurig bloot te stellen

aan waarden hoger dan 0,4 μT gemiddeld. Dit advies legt geen norm op.

Elia respecteert vanzelfsprekend de wetgeving en tracht de blootstelling aan magnetische velden zo veel mogelijk te vermijden. Er zijn grote verschillen tussen de technologieën en deze worden dan ook beschreven per technologie.

5.3.5 Broeikasgasemissies

De elektrische verliezen in de verbinding moeten gecompenseerd worden door extra elektriciteitsproductie die gaat gepaard met een CO_2 -uitstoot waarvoor we de gemiddelde uitstoot van de Europese energiemix nemen.

De CO_2 -uitstoot wordt geschat op basis van de verwachte toekomstscenario's beschreven in het *Ten Year Network Development Plan* van 2018 van ENTSO-E⁴⁶. Deze scenario's geven aan dat tegen 2025 de uitstoot in de EU zal gedaald zijn tot ongeveer 200g/kWh_e. De scenario's in het TYNDP18 evolueren naar 50 à 100 kWh_e tegen 2040 en tegen 2050 zou de elektriciteitsproductie volledig of bijna volle-

dig vrij moeten zijn van uitstoot dankzij de vergroening van de elektriciteitsproductie. In deze analyse veronderstellen we daarom dat de gemiddelde uitstoot over de levensduur van de verbinding 100g CO_2 per kWh_e zal bedragen.

Daarbuiten maken sommige technologieën gebruik van het sterke broeikasgas SF_6 . Ook de eventuele lekkages van deze gasen dragen bij tot de broeikasgasemissies.

46

TYNDP18 scenario framework, zie : <https://www.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP2018/Scenarios%20Data%20Sets/Scenario%20Building%202018%20Outputs.xlsx>.

A low-angle, upward-looking photograph of a traditional windmill against a clear blue sky. The windmill's body is dark blue with some yellow text. The cap is light green. The four large wooden sails are blurred, indicating they are in motion. A yellow metal maintenance basket is suspended from the structure, containing several workers in yellow safety gear. Below the basket, several large red spherical buoys are visible. A large, white, stylized letter 'V' is superimposed over the center of the image.

V

Technische analyse

6.1 | Betrouwbaarheid & beschikbaarheid

6.1.1 | AC-technologie

6.1.2 | DC-technologie

6.2 | Impact op netuitbating

6.2.1 | AC-technologie

6.2.2 | DC-technologie

6.2.3 | Conclusie

6.3 | Maturiteit

6.3.1 | AC-technologie

6.3.2 | DC-technologie

6.3.3 | Conclusie

6.4 | Aftakkingen

6.4.1 | AC-technologie

6.4.2 | DC-technologie

6.4.3 | Conclusie

6.5 | Opportuniteiten

6.5.1 | AC-technologie

6.5.2 | DC-technologie

6.6 | Conclusie

TECHNOLOGIESTUDIE

Februari 2019

VI

Technische analyse

6.1 BETROUWBAARHEID & BESCHIKBAARHEID

6.1.1 AC-technologie

6.1.1.1 Luchtlijn

Een circuit van een luchtlijn bestaat uit drie delen: de luchtlijn zelf en aan beide uiteinden een schakelveld met beveiligingen.

→ Faalkans

De meeste incidenten op een luchtlijn worden veroorzaakt door blikseminslagen. De huidige beveiligingen zijn echter in staat om de betrokken fase kort uit te schakelen tot bliksemoverspanningen verdwenen zijn en vervolgens weer kan worden gegaan naar een normale uitbating. Deze incidenten hebben nagenoeg geen invloed op het net en we nemen ze daarom niet verder in beschouwing.

Afgaande op de statistieken die Elia heeft verzameld zien we voor de overige fouten 0,24 fouten per jaar per 100km circuit. Cigré heeft ook een paper⁴⁷ gepubliceerd met een vergelijkbare frequentie, namelijk 0,22.

Aan beide uiteinden van een circuit is ook een schakelveld nodig. Het aantal falingen van de verschillende toestellen in een schakelveld zijn het voorwerp geweest van internationale studies in het kader van Cigré⁴⁸. Hiermee komen we uit op 0,03 falingen per schakelveld per jaar.⁴⁹

Het totaal aantal falingen voor één circuit van 75km komt zo op ongeveer 0,24 per jaar. Voor 2 circuits komt dit neer op 0,48 falingen per jaar, hetzij één uitval van een circuit elke 2 jaar.

→ Hersteltijd

Ervaring leert dat de hersteltijd meestal beperkt kan worden tot 24u, uitgezonderd het falen van een mast (zie verder). Hieruit volgt dat elk jaar gemiddeld gedurende een halve dag één van de circuits buiten dienst zal zijn wegens een defect.

→ Mastbreuk

De betrouwbaarheid van een mast hangt af van de oorspronkelijke dimensionering en de terugkeerperiode die voor extreme weersomstandigheden (bv. wind of sneeuw) in aanmerking genomen werd. De nieuwe norm EN 50341 voorziet in drie betrouwbaarheidsniveaus. In bepaalde gevallen kunnen die verder aangescherpt worden. De onderstaande figuur laat de evolutie qua betrouwbaarheid zien van een standaard mast 380kV sinds de aanleg van het Belgische 380kV-net tot de meest recente projecten. In deze grafiek worden twee begrippen gebruikt:

- enerzijds de terugkeerperiode van een incident met mastbreuk op de lijn, uitgedrukt in aantal jaren. Voor een nieuwe lijn met een lengte van 80km is dit één keer per 600 jaar dat dit ergens op de lijn gebeurt.
- anderzijds de relatieve kans op een incident met mastbreuk in percentages; de referentiewaarde van 100% komt overeen met het oorspronkelijke 380kV-net dat voornamelijk in de jaren '70 aangelegd werd.

Gezien de zeer geringe kans op een incident kunnen we dit beschouwen als aanvaardbaar.

47

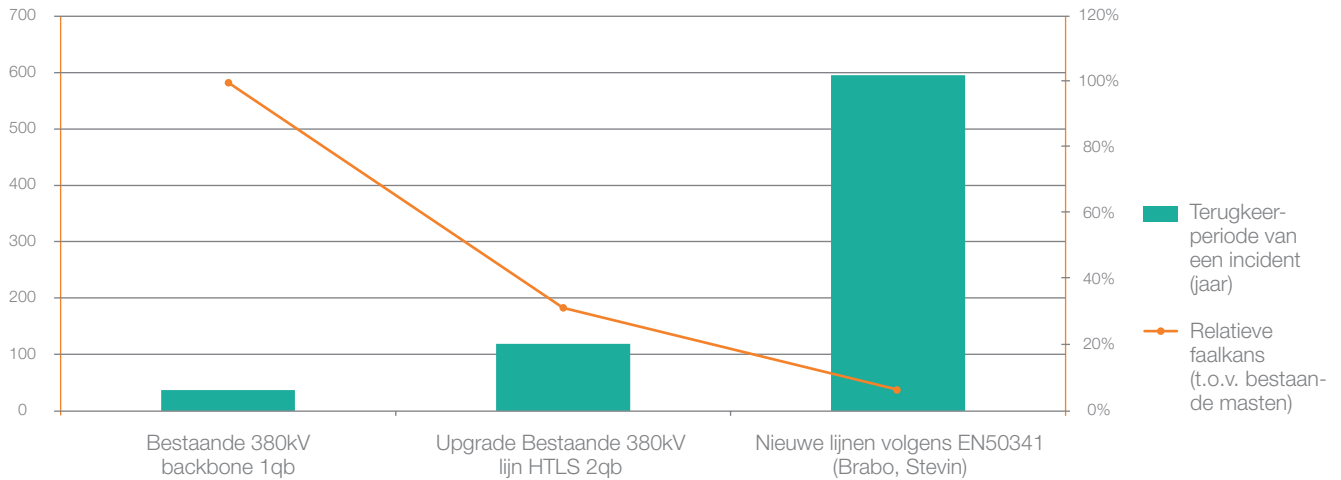
Cigre-paper "Availability and Risk Assessment of 380 kV Cable Systems in Transmission Grids"

48

Zie technische brochures TB509, TB510, TB511 en TB512

49

Dit is geldig voor een AIS-schakelveld. Voor een GIS-schakelveld is de faalkans kleiner, maar de hersteltijd langer.



↑ **Figuur 28**
Betrouwbaarheid
van luchtlijnen
380kV bij Elia

6.1.1.2 Kabel

Ook hier bestaat elk circuit uit een kabel met aan de uiteinden twee kabelvelden. Daarnaast zijn er ook velden met shuntreactoren.

→ 380 kV

→ Faalkans

Uit cijfers van Cigré leiden we af dat een kabel per 100km gemiddeld 0,15 keer per jaar faalt door een inwendig defect en 0,12 keer door externe oorzaken (vooral graafwerken), hetgeen een totaal geeft van 0,27 keer per jaar. Qua schakelvelden moeten we ermee rekening houden dat minstens één tussenstation nodig is. Het totaal aantal falingen voor één circuit van 75km, inclusief vier schakelvelden, komt daardoor op ongeveer 0,33 per jaar. Vermits we hier 6 parallelle circuits hebben zullen gemiddeld 2 circuits uitvallen per jaar.

→ Hersteltijd

De hersteltijd is hier veel langer dan bij luchtlijnen. Cijfers uit TB379 geven aan dat een gemiddelde herstelling 25 dagen duurt. Gemiddeld zal gedurende 40 dagen per jaar een kabel buiten dienst zijn voor herstelwerkzaamheden.

→ Shuntreactoren

Het verlies van een shuntreactor leidt nage-

noeg nooit tot een verlies van de transportcapaciteit, op voorwaarde dat de shuntreactoren op aan afzonderlijk schakelveld worden geplaatst. Namelijk, wanneer de transportcapaciteit kritiek is, gaan er hoge stromen door de kabels. Hierdoor wordt de kabel minder capaciteef, waardoor er minder reactief vermogen moet geabsorbeerd worden.

Indien er shuntreactoren rechtstreeks op de kabel worden geplaatst, moet deze faalkans erbij opgeteld worden. Cijfers voor shunt reactoren zijn nog zeer beperkt, maar we kunnen veronderstellen dat deze in dezelfde grootteorde zitten als transformatoren. Transformatoren hebben een faalkans van 0,5% per jaar. Als het mogelijk is om de verbinding terug in dienst te brengen zonder shunt reactor kan deze binnen 1 dag worden afgekoppeld.

→ 220 kV

Er zijn hier 10 in plaats van 6 kabelcircuits en bovendien staan aan beide kanten transformatoren. Voor deze laatste kunnen we beroep doen op de Elia statistieken. Dit geeft volgende cijfers:

- Gemiddeld aantal falingen per jaar ('Forced Outage Rate'): 3,3 (kabel) + 1 (transformatoren) = 4,3
- Gemiddelde jaarlijkse onbeschikbaarheid wegens herstelling ('Forced Energy Unavailability'): 67 dagen (kabel) + 10 dagen (transformator) = 77 dagen

6.1.1.3 GIL

Vanwege het gebrek aan maturiteit van deze technologie zijn te weinig gegevens beschikbaar om deze te beoordelen. We kunnen enkel kwalitatief volgende aandachtspunten geven.

In de GIS-technologie zijn gaslekken één van de meest voorkomende problemen. De verschillende elementen van een GIL worden echter aan elkaar gelast in plaats van gebout. Het is dan ook te verwachten dat het aantal gaslekken veel lager zal liggen bij een GIL. Desalniettemin mogen we dit risico voor de lange lengtes van onze case niet negeren.

Indien er zich een probleem voordoet, is de hersteltijd zeer lang. Enkel de gashandelingen⁵⁰ kunnen weken in beslag nemen, afhankelijk van de lengte van de compartimenten.

6.1.1.4 Super geleiders

Vanwege het gebrek aan maturiteit van deze technologie zijn te weinig gegevens beschikbaar om dit onderdeel te beoordelen. We kunnen enkel kwalitatief volgende aandachtspunten geven.

Voor supergeleidende systemen zijn actieve koelinstallaties nodig (cryogene vloeistof, pompen, compressoren enz.). Van zodra de temperatuur iets te hoog wordt in de geleider valt de supergeleiding volledig weg en valt de transportcapaciteit terug op quasi nul. Er is daarom voldoende aandacht nodig naar de redundantie van deze koelinstallaties om de beschikbaarheid van het supergeleidende kabelsysteem te waarborgen.

De leveranciers kondigen ook aan dat bij een storing de onderbrekings- en reparatietijd langer uit zal vallen dan bij klassieke kabels.

6.1.1.5 PST

Indien een beperkte sturing van de stromen nodig is, moeten bij de AC-oplossingen PST's of Phase Shifting Transformers worden bijgeplaatst⁵¹. We beschikken niet over betrouwbare statistieken voor deze speciale transformatoren, maar we schatten dat de faalkans ongeveer dubbel zo hoog is dan bij een gewone transformator, namelijk 1% per jaar. Er zijn vier PST's van 1,5GW nodig en bovendien 8 extra schakelvelden. Dit geeft in totaal 0,28 falingen per jaar extra. PST's kunnen wel eenvoudig gebypast worden zodat de verbinding, zonder sturing, na 1 dag terug operationeel kan zijn.

6.1.2 DC-technologie

We beschikken hier enkel over cijfers voor een volledig systeem. We zullen daarom dit enkel analyseren op het niveau van het volledige systeem (conversiestations + circuit).

6.1.2.1 LCC

Volgens gegevens van CIGRE⁵² met informatie over de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van **LCC-HVDC**-conversiestations, kan deze technologie gekenmerkt worden aan de hand van de volgende indicatoren (per set van conversiestations):

- Gemiddeld aantal falingen ('Forced Outage Rate'): van 2 tot 8 per jaar
- Gemiddelde onbeschikbaarheid wegens herstelling ('Forced Energy Unavailability'): van ongeveer 0,2 tot 0,8% van de tijd (1 tot 3 dagen per jaar)

→ Verlies volledige 6GW

Voor de werking van een LCC-conversiestation is de ondersteuning van een voldoende sterk AC-net nodig (zie ook hoofdstuk 6.2). Indien dit wegvalt, zullen alle LCC-conversiestations mee uitvallen. Dit risico treedt bijvoorbeeld op indien (een

50

Dit behelst voorafgaand aan de werken het evacueren van het gas uit de buizen en na de werken het vacuumpompen/vacuumpompen (nodig om al het vocht uit de buis te halen) en het terug te vullen met gas.

51

Opmerking: in het geval van een kabel 220kV kan de PST-functie gecombineerd worden met de transformatoren 380/220kV. In dit geval zijn dus geen extra installaties nodig.

52

Cigré-paper "survey of the reliability of hvdc systems throughout the world"

	LCC				VSC		
	2 x 3000 MW rigid bipool met luchtlijn	6000 MW bipool met luchtlijn	2 x 3000 MW rigid bipool met kabel	2 x 3000 MW rigid bipool met luchtlijn	4 x 1500 MW symmetri- sche mo- nopol met luchtlijn	2 x 3000 MW rigid bipool met kabel	4 x 1500 MW symmetri- sche mo- nopol met kabel
Falingen per jaar	10,5	5,5	11	4,5	8,5	5	9
Aantal dagen herstelling	4,5	2,5	22	4,5	8,5	22	26

↑ Tabel 3

Falingen en
hersteltijden van
de verbinding
per jaar

aantal) naburige verbinden zijn uitgeschakeld door defect of overbelasting. Dus net op het moment dat we de LCC-verbinding het meest nodig hebben, kan deze het laten afweten. Onder andere hierom is LCC-technologie niet aanvaardbaar voor dit project.

6.1.2.2 VSC

Wat de **VSC-HVDC**-conversiestations betreft, zijn momenteel slechts zeer weinig gegevens bekend over de werkelijke beschikbaarheid en betrouwbaarheid ervan. Daarom hebben we ons gebaseerd op de contractuele garanties waarin volgende waarden worden vermeld:

- Gemiddeld aantal falingen ≤ 2 per jaar
- Gemiddelde onbeschikbaarheid wegens herstelling $\leq 0,5\%$ of 2 dagen per jaar

6.1.2.3 Verbinding

Boven op de falingen en de hersteltijden van de conversiestations moeten de falingen en hersteltijden van de verbinding nog bijgeteld worden. Het cijfermateriaal is hiervoor schaars. We gaan daarom uit van volgende veronderstellingen:

- Luchtlijnen: DC identiek aan AC
- Kabels: per monofasige kabel nemen we dezelfde statistieken voor AC en DC, waarbij we rekening moeten houden dat bij DC slechts acht in plaats van 18 kabels nodig zijn

We merken dat de conversiestations steeds meer onderhoud vragen dan de verbinding tussen beide. We gaan ervan uit dat deze werken zo goed mogelijk samen worden uitgevoerd met het onderhoud van het conversiestation, waarbij alle onderhoudswerken aan de verbinding worden gepland tijdens het onderhoud van de conversiestations.

6.1.3 Conclusie

Er is momenteel te weinig ervaring om goede betrouwbaarheidsstatistieken te trekken voor de GIL en zeker voor de supergeleiding.

Het aantal falingen is bij DC steeds beïnvloedend hoger dan bij het AC alternatief. De hersteltijd is echter het hoogst bij de AC-kabel varianten.

6.2 IMPACT OP NETUITBATING

6.2.1 AC-technologie

6.2.1.1 Luchtlijn

De luchtlijn is een gekende en eenvoudig uit te baten technologie

- Complexiteit: de verbinding is eenvoudig want bestaat maar uit twee rechtstreekse connecties tussen de eindstations, enkel bestaande uit twee schakelvelden één draadstel. Mogelijks is er een nood voor een beperkte regeling van de stroom met behulp van PST's (phase-shifting transformers) aan één van beide uiteinden voor evenwicht-

tige verdeling van de stromen binnen de vermaasde netstructuur. De complexiteit verhoogd hiermee, maar blijft aanvaardbaar.

- Netfenomenen: bij lengtes tot 100 km creëren deze weinig “vervuiling” op het net (zoals harmonischen, transiënten, spanningssprongen, ...)
- Kortsluitvermogen: dit is de referentie-oplossing voor hoogspanningsnetten. We zullen de andere technologieën hiermee vergelijken.
- Netopbouw: de verbinding kan na een black-out eenvoudig weer in dienst worden gebracht.

6.2.1.2 Kabel

→ Complexiteit

Stel dat één tussenstation voldoende is, dan zijn er 12 stukken kabelcircuit en 42 shuntreactoren uit te baten plus een extra onderstation. Bovendien zullen er (actieve) filters moeten komen op de uiteinden. Dit geheel zal zeer complex zijn om uit te baten.

→ Netfenomenen

In hoofdstuk 4 beschreven we het fenomeen van resonanties. Door de omvang van deze oplossing hebben we zelfs geen uitsluitel dat dit probleem onder controle kunnen hebben. Namelijk, hoe meer kabels in het systeem worden gebracht, hoe lager de resonantiefrequentie. Voor het Stevin-project lag de laagste frequentie op 350 Hz, hetgeen nog aanvaardbaar is. Niemand heeft tot nu toe onderzocht wat er kan gebeuren als de frequentie daalt tot de meer kritieke frequenties:

- ± 250 Hz: interferentie met (residentiële) elektronica
- 150 Hz: sollicitatie van de aardingsnetten
- 100 Hz: parallelle resonantie met vermogentransformatoren

50 Hz: de netfrequentie.

Zeker deze laatste is problematisch omdat je deze niet kan wegfilteren. De impact op beveiligingen, hoogspanningsmaterieel of klanteninstallaties en de eventuele remedies blijven onduidelijk.

Merk op dat ook de ondergrondse kabels in het naburige net een invloed kunnen hebben. Zo zou het (deels) ondergronds plaatsen van de “Ventilus” een invloed hebben op het project “Boucle du Hainaut” en omgekeerd. Specifiek voor de “Ventilus” zouden ook het ondergronds gedeelte van de Stevin-as en de offshore kabels naar de windparken een invloed hebben.

Om deze reden heeft Tennet, de netbeheerder in Nederland, in overleg met de Nederlandse overheid, een totaal van 20 km tracélengte met maximum vier parallelle circuits (dus maximaal 80 km circuitlengte) als limiet gehouden over het ganse vermaasde 380 kV-net. Ter vergelijking: indien zowel het project “Ventilus”, als het project “Boucle du Hainaut” in ondergrondse kabels wordt aangelegd, zijn over +/- 150 km hiervoor 6 parallelle circuits nodig, ofwel een totale circuitlengte van 900 km.

→ Kortsluitvermogen

Tijdens een kortsluiting voeden omliggende productie-eenheden (zoals elektriciteitscentrales) deze fout, waardoor er grote foutstromen ontstaan. De bijdrage van elke productie-eenheid hangt af van het type en van de demping veroorzaakt door het hoogspanningsnet. Verder gelegen eenheden dragen daarom minder bij tot de totale kortstuitstroom dan nabijgelegen eenheden. De totale kortsluitstroom die zo ontstaat moet onder een limiet blijven. Anders kunnen de omliggende “gezonde” installaties gedurende de kortsluiting beschadigd worden, waardoor meerdere netelementen of zelfs volledige hoogspanningsposten kunnen uitvallen, met meestal een black-out tot gevolg.

Door de lage ohmse weerstand en het capacitief karakter van AC-kabels worden kortsluitstromen veel minder gedempt dan bij AC-luchtlijnen waardoor de kortsluitstroom zal verhogen.

Elia heeft simulaties uitgevoerd die aantonen dat bij een volledige kabeloplossing van de projecten beschreven in hoofdstuk 3 de grens van 63kA zal worden overschreden.

Om de demping te verhogen moet er een impedantie (een spoel) worden geplaatst in serie met de kabels. Dit kan echter weer leiden tot nieuwe resonantiefenomenen op het net zoals beschreven in de vorige paragraaf.

→ **Netopbouw**

Door de vele elementen in de verbinding zal het veel langer duren om de verbinding terug tot stand te brengen. Bovendien zijn kleine netten, zoals een beginnend net in opbouw, gevoeliger. De bovenstaande fenomenen vergroten het risico dat het prille net weer instort bij de inschakeling van de kabelverbindingen.

→ **Variante 220kV**

Het reactief vermogen in een kabel evolueert kwadratisch met de spanning. Een 220kV-kabel genereert bijgevolg ongeveer 3 keer minder reactief vermogen dan een kabel 380kV. De meeste problemen beschreven in dit hoofdstuk zullen daarom bij 220kV minder pertinent aanwezig zijn.

Anderzijds dient wel opgemerkt te worden dat er 10 in plaats van 6 parallelle circuits nodig zijn en dat er aan beide uiteinden van de verbinding verscheidene transformatoren moeten worden geplaatst. Deze combinatie van kabels en transformatoren verhoogt het risico op resonanties. Het risico blijft hierdoor onaanvaardbaar hoog bij het volledig ondergronds brengen van de verbinding.

53

De typische waarden voor de AC-luchtlijnen uit onze case liggen nog eens vier keer lager.

6.2.1.3 GIL

Zoals eerder gemeld, ligt bij een GIL de capaciteit per fase meer dan 4 keer lager dan bij AC-kabels⁵³ en zijn er slechts twee parallelle circuits in plaats van zes. De netfenomenen en bijhorende problemen zoals beschreven bij AC-kabels worden hierdoor sterk gedecimeerd. Qua complexiteit, netuitbating en netopbouw is de GIL voor afstanden tot 100km zeer gelijkaardig aan een luchtlijn. Het kortsluitvermogen zal wel meer stijgen, maar blijft nog steeds onder 63kA.

6.2.1.4 Supergeleiders

6.2.1.4.1 Complexiteit

Net zoals de luchtlijn en de GIL is dit qua netstructuur een eenvoudige oplossing. Vermits de ohmse weerstand van deze kabel zeer laag is, zal wel een seriespoel op het uiteinde van de verbinding moeten worden geplaatst. Dit dient om het vermogen evenwichtig te verdelen over de supergeleider en de parallelle verbindingen.

6.2.1.4.2 Netfenomenen

We hebben op dit moment geen gegevens over de capaciteit van een superconductor, mede door het feit dat deze nog nooit gemaakt is op 380kV. Vermits deze vooral bepaald wordt door de afstand tussen de geleider en het scherm, is het te verwachten dat die in de buurt ligt van de klassieke AC-kabels. In het ergste geval zal ook hier een tussenstation moeten worden geplaatst.

6.2.1.4.3 Kortsluitstroom

Supergeleiders hebben een verwaarloosbare weerstand en zijn capacitief. De verhoging van de kortsluitstroom zal sterker aanwezig dan bij de AC-kabeloplossing. Maatregelen zullen zeker genomen moeten worden om de kortsluitstroom te beper-

ken. Dit kan door zoals bij kabels een spoel in serie te plaatsen met de supergeleider, maar ook om (een deel van) de supergeleider te laten fungeren als "*fault current limiter*". Het idee hierachter is dat men bij een kortsluiting de supergeleider zijn supergeleidende eigenschappen laat verliezen, zodat deze de kortsluitstroom door de geleider gaat blokkeren.

6.2.1.4.4 Netopbouw

Er zal voldoende vermogen beschikbaar moeten blijven via batterijen of noodgeneratoren om de supergeleider voldoende koud te houden tijdens een stroompanne.

6.2.2 DC-technologie

6.2.2.1 Conversiestations

→ Complexiteit

De conversiestations laten toe om het vermogen volledig te sturen, hetgeen de uitbating van het net kan helpen. Anderzijds moeten de conversiestations actief gestuurd worden. Bijvoorbeeld in het geval van de uitschakeling van een verbinding zal bij AC het vermogen automatisch herverdeeld worden via alternatieve wegen. Een DC-verbinding in het AC-net zal niet automatisch zijn steentje bijdragen, waardoor op AC de alternatieve wegen sneller overbelast kunnen raken en op hun beurt kunnen uitschakelen. Dit kan leiden tot een domino-effect, met een netinstorting tot gevolg. Actieve tussenkomsten zullen daarom nodig zijn bij DC-installaties. Alle gevallen waarbij een manuele actie niet snel genoeg kan uitgevoerd worden, zullen hierbij op voorhand geprogrammeerd moeten worden in de software van de installatie. Hierbij is het risico groot dat niet alle situaties voorzien worden of dat de programmatie niet correct werkt.

Bij LCC gelden er bovendien verscheidene beperkingen bij de uitbating van het net:

- Het LCC-conversiestation kan niet werken bij lage belastingen (10% à 20% van het nominale vermogen). Echter, zoals figuur 2 laat zien, is de belasting in ongeveer 70% van de tijd lager dan 20%.
- Inversiefrequentie van de flux van actief vermogen: de flux van actief vermogen van een LCC-HVDC-station kan alleen omgekeerd worden door de DC-spanningspolariteit om te keren. Als de richting van deze actieve vermogensflux frequenter omgekeerd wordt, zal de apparatuur die zich in het conversiestation bevindt of daarop aangesloten is (bijvoorbeeld het DC-kabelsysteem en de HVDC-transformatoren) sneller verouderen. Daarom moet men voor dit type conversiestation de flux van actief vermogen zo weinig mogelijk omkeren om voortijdige slijtage en/of extra investeringskosten te vermijden. Simulaties tonen echter aan dat voor de beschouwde projecten 500 tot 1000 omkeringen per jaar nodig zijn.
- Het reactief vermogen dat een LCC-conversiestation genereert, varieert sterk met het vermogen dat getransporteerd wordt. Bij een verandering in het actief vermogen, moet ook steeds het reactief vermogen worden bijgestuurd (bv. door middel van het in- of uitschakelen van shuntreactoren of shuntcondensatoren).
- Omdat het net aan beide uiteinden voldoende "sterk" moet zijn⁵⁴, is het mogelijk dat sommige werken op het net niet gelijktijdig kunnen plaatsvinden.

54

Het kortsluitvermogen moet doorgaans meer dan twee keer het nominale vermogen van het conversiestation bedragen.

55

VSC-verbinding tussen Frankrijk en Spanje

→ Netfenomenen

Voor beide types dienen, in samenspraak met de constructeur, verscheidene simulaties uitgevoerd te worden, zoals:

- Een stabiliteitsstudie om de interactie met het net te bestuderen.
- Een studie rond laagfrequente harmonischen, namelijk indien er een gemeenschappelijke frequentie optreedt met de generator van een naburige productie-eenheid kan de as van deze generator beschadigd raken.
- De interactie met andere vermogens-elektronica (zoals andere conversiestations, Statcoms en de convertoren in windturbines) moet bestudeerd worden om te vermijden dat één van beide onmiddellijk zou uitschakelen.

De oplossing hiervoor is meestal een aanpassing in de programmatie van de sturing van de conversiestations.

Specifiek voor VSC moet er een studie gemaakt worden rond hoogfrequente resonantie (rond de schakelfrequenties van de IGBT's). Bij het project Enlfe⁵⁵ heeft men bijvoorbeeld ondervonden dat de conversiestations bij sommige nettopologieën uitschakelen wegens deze resonanties.

Bij de LCC-conversiestations is de output geen mooie 50Hz sinus. Aan AC-zijde worden voor LCC-conversiestations veel meer harmonischen gegenereerd dan voor VSC-Conversiestations. Daarom zijn kant AC verscheidene filters noodzakelijk.

→ Korstluitvermogen

Zowel VSC als LCC dragen slechts beperkt bij tot het kortsluitvermogen en scoren op dit punt beter dan AC. Bovendien kunnen VSC het net ondersteunen tijdens de kortsluiting.

→ Netopbouw

Dit is geen probleem voor VSC. Meer zelfs, VSC kan hier een ondersteunende rol spelen.

Zoals eerder besproken is voor de werking van een LCC-conversiestation de ondersteuning van een voldoende "sterk" AC-net nodig. Netopbouw is niet mogelijk via deze technologie. Eerst moeten de netten aan beide uiteinden voldoende worden hersteld eer de LCC-verbinding weer in dienst genomen kan worden.

6.2.2.2 Verbinding

Welke technologie op DC wordt gebruikt tussen de conversiestations heeft weinig impact op de netuitbating, zolang we nog niet spreken over grote DC-netten. Het begrip reactieve energie bestaat niet op DC en de gekozen DC-technologie heeft geen invloed aan de AC-zijde van de convertoren.

6.2.3 Conclusie

De netuitbating van zowel de 380kV- als de 220kV-AC-kabel oplossing is zeer complex, wat haaks staat op de nood om een flexibel net te ontwikkelen, gezien de context van een energietransitie die op zich al een grote complexiteit toevoegt. Bovendien zijn de risico's gebonden aan resonanties voor beide spanningsniveaus onaanvaardbaar hoog.

Betreffende DC voldoet LCC voor onze toepassing niet aan de minimale eisen voor de uitbating van het net. Netopbouw is niet mogelijk en bij de uitbating van het net zijn er heel wat beperkingen. VSC scoort goed op vlak van kortsluitvermogen en netopbouw, maar heeft zijn risico's door de actieve sturing en de mogelijke resonanties.

De AC-luchtlijn en in tweede instantie de AC-GIL scoren op alle deelaspecten matig tot goed en zijn daarom te prefereren voor dit criterium.

6.3. MATURITEIT

6.3.1 AC-technologie

6.3.1.1 Luchtlijn

De technische maturiteit van de klassieke vakwerkmasten en van geleiders is zeer hoog gezien deze al meer dan 100 jaar op grote schaal in Europa en in de wereld gebruikt worden. Enkel in België bezit Elia meer dan 22.000 masten en 5.560km luchtlijnen. Aangezien luchtlijnen en stalen profielen voor masten in zulke grote hoeveelheden gebruikt worden, zijn deze over de jaren heen reeds gestandaardiseerd in Europese normen.

Zowel voor masten als voor luchtgeleiders zijn er een groot aantal producenten gekwalificeerd voor de Belgische energiemarkt, zodat door de uitgebreide concurrentie de kwaliteit hoog ligt en de prijs laag blijft.

6.3.1.2 Kabel

XLPE geïsoleerde kabelverbindingen – de huidige standaardtechniek – bestaan ongeveer 20 jaar. Kinderziekten voor het isolatiemedium XLPE, ook op 380kV-niveau, zijn overwonnen, en het is nu wereldwijd het meest gebruikte isolatiemateriaal in nieuwe kabelverbindingen. Er zijn diverse fabrikanten die dit soort kabelsystemen leveren aan de markt en deze worden wereldwijd toegepast. Er is een toenemende mate van ervaring met XLPE-kabelsystemen voor de hogere spanningen.

Echter, zoals reeds beschreven in paragraaf 6.2.2, is er op 380kV geen enkele ervaring voor trajecten boven 50km en/of 6 parallelle circuits. Op dit moment weten we nog niet hoe dit materiaal zich zal gedragen en kunnen we dus nog niet garanderen dat zoiets feilloos zal werken.

Ook is er geen enkele ervaring om 220kV kabelverbindingen te gebruiken in een vermaasd 380kV-net.

6.3.1.3 GIL

Wereldwijd werden nog geen GIL-trajecten over grote lengte aangelegd. De lengte bedraagt doorgaans enkele honderden meters en in een paar uitzonderingsgevallen een paar kilometers. De meeste van deze gevallen zijn zeer specifieke toepassingen, zoals bijvoorbeeld tunnels.

Door het gebrek aan internationale ervaringen met lange *Gas Insulated Lines* (GIL's) moeten we sommige aspecten, zoals herstellingen, lekdetectie, koeling en gasdynamica, zorgvuldig onderzoeken.

Bovendien bestaat er momenteel maar één fabrikant, Siemens, die tot op heden een 380kV GIL⁵⁶-oplossing als commercieel product ontwikkeld heeft. Dit beperkt de know-how en maturiteit van deze technologie.

6.3.1.4 Supergeleiders

Momenteel is er wereldwijd geen ervaring met 380kV-supergeleiders, zelfs niet in laboratoria.

Volgens inschattingen van experts zal het naar schatting nog vijf jaar duren voordat deze technologie beschikbaar is voor het eerste proefproject (bij voorkeur een minder belangrijke koppeling over korte afstand) en nog minstens tien jaar voordat we deze technologie als aanvaardbaar alternatief beschouwd kan worden voor een verbinding met de karakteristieken van de projecten die hier in beschouwing worden genomen, weliswaar nog steeds met alle risico's van een product met een lage maturiteit.

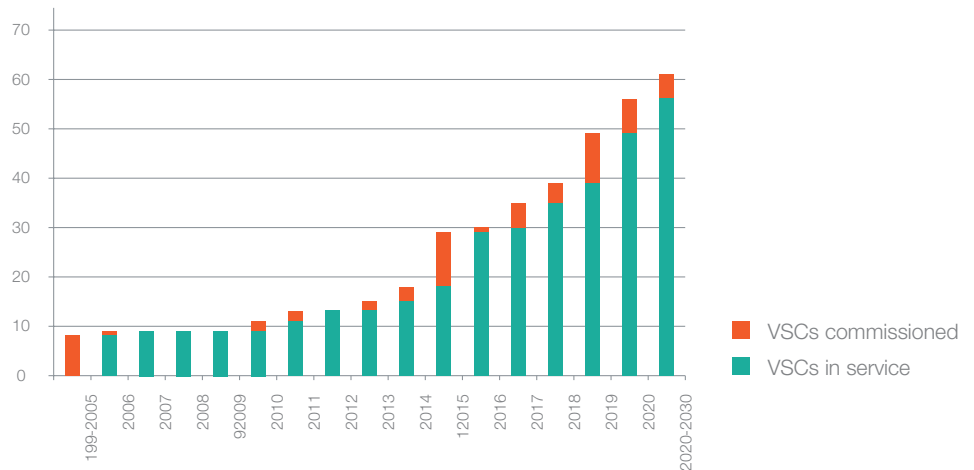
56

Zoals beschreven in hoofdstuk 4 nemen we hier enkel systemen met gelaste buizen in beschouwing.

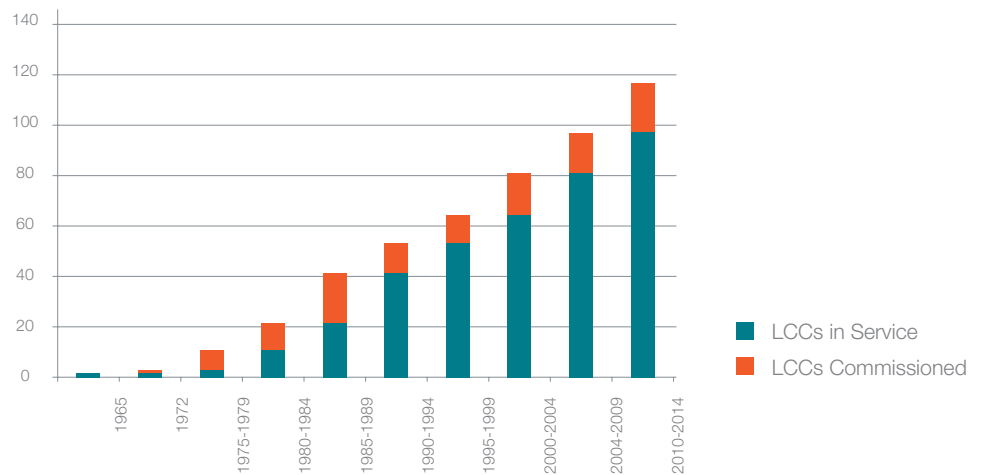
57

Zhangbei-project China.

→ **Figuur 29**
Evolutie van de
in gebruik zijnde
VSC-HVDC-
systemen⁵⁸



→ **Figuur 30**
Evolutie van de
in gebruik zijnde
LCC-HVDC-
systemen⁵⁹



6.3.2 DC-technologie

6.3.2.1 Conversiestations

De maturiteit van de LCC-HVDC-technologie kan als voldoende beschouwd worden. Deze technologie is immers al ruim 40 jaar beschikbaar op de markt en werd tot op heden in meer dan 100 projecten over de hele wereld toegepast.

De technologie van de VSC-HVDC-systemen werd een vijftiental jaar geleden ontwikkeld en is dus recenter. Tot op heden werd een relatief klein aantal projecten (een dertigtal) hiermee uitgevoerd en het eerste 3GW-, 500kV-project is nog maar net gegund⁶⁰. Deze technologie kan dus als minder matuur worden beschouwd. Rekening houdend met de snelle ontwikkeling van deze technologie en wetende dat veel R&D in deze technologie wordt gestoken, kunnen we aannemen dat deze technologie

klaar zal zijn om gebruikt te worden in de beschreven projecten.

De volgende figuren geven voor elke technologie een overzicht van het verloop van de spannings- en vermogensniveaus van de uitgevoerde, lopende en geplande projecten.

6.3.2.2 Luchtlijn

Gezien de technologie voor AC-luchtlijnen en DC-luchtlijnen quasi identiek is, met als enige verschil het aantal fasen en de vereiste veiligheidsafstanden, kan er hier geconcludeerd worden dat deze technologie eveneens zeer matuur is. Men gebruikt dezelfde genormeerde stalen profielen en geleiders als bij de AC-luchtlijnen.

Wereldwijd zijn er reeds verschillende HVDC-luchtlijnen gebouwd voor het trans-

⁵⁸

Referentie: VSC-HVDC Newsletter 25/05/2018 – VSC-HVDC Project List.

⁵⁹

Referentie: IEEE – HVDC Projects Listing.

⁶⁰

Fabrikant: NKT

port van elektriciteit over lange afstanden (zelfs meer dan 1000km), met karakteristieken die voldoen aan de beschreven projecten, zodat de ervaringsterugkeer van deze andere projecten vlot beschikbaar is.

6.3.2.3 Kabel

MI-kabels is een oude (en beproefde) technologie die vroeger ook voor AC-kabels werd gebruikt. Bij de eerste generatie DC-kabelverbindingen die hoofdzakelijk gebruikt werden voor offshore (LCC) kabelverbindingen werd ook uitsluitend dit type kabels gebruikt. Zoals in paragraaf Bestudeerde technologieën beschreven, zijn enkel XLPE-kabels realistisch voor de beschreven projecten.

De eerste XLPE DC-kabels zijn ontwikkeld geweest voor VSC-technologie. De eerste toepassing hiervan dateert van 1999 voor een ± 80 kV DC-kabel in Gotland. Slechts zeer recent hebben verscheidene leveranciers ook kabels tot ± 500 kV ontwikkeld. We hebben zelfs één leverancier gevonden met een kabel 640 kV⁶¹. Geen enkele kabel is echter al geplaatst op dit spanningsniveau.

Voor de LCC-technologie heeft op dit moment slecht één enkele leverancier⁶¹ een geschikte XLPE-kabel. Slechts één enkel project (op ± 250 kV) werd tot hiertoe uitgevoerd⁶².

Het spreekt vanzelf dat er nog weinig bekend is over het gedrag van deze kabels op lange termijn.

6.3.2.4 GIL

Deze technologie is nog niet op de markt en zelfs als deze binnenkort op de markt zou komen, zal nog eerst minstens één pilootproject uitgevoerd moeten worden, alvorens we dit op grote projecten kunnen toepassen. We gaan ervan uit dat deze technologie nog niet beschikbaar zal zijn voor onze projecten.

6.3.2.5 Supergeleiders

Een eerste testlus (30m) ± 320 kV is recent gebouwd geweest in het kader van het Best Paths project. Net zoals voor AC kan er voor DC-supergeleiders geconcludeerd worden dat deze technologie niet voldoende matuur is voor een commerciële implementatie binnen 5 jaar. Aangezien het gebruik van supergeleiders nog erg experimenteel is en er nog geen grootschalige installatie bestaat die bewijst dat langere afstanden eveneens haalbaar zijn, wordt deze technologie als ongeschikt gezien voor de beschouwde use case.

6.3.3 Conclusie

Supergeleiding en DC-GIL zitten nog in een R&D-fase en zijn dus nog niet klaar om te gebruiken in de beschouwde projecten.

Wat AC-kabels betreft, bestaat er al enige ervaring maar vooral op lagere spanningen, lagere vermogens en kortere afstanden. Er is geen enkele referentie die in de buurt komt van onze toepassing (6GW over 75km binnen een vermaasd net). Bij GIL is de ervaring zelfs beperkt tot een beperkt aantal korte afstanden en tot één enkele leverancier. Door het gebrek aan ervaring is het niet opportuun om deze technologie voor lange afstanden in te zetten in de Belgische backbone.

Uitgezonderd LCC in combinatie met XLPE-kabels, is er reeds enige ervaring in DC-lijnen en DC-kabels. AC-luchtlijnen zijn echter met voorsprong het meest matuur.

61

Fabrikant: SEI (voormalig J-Power).

62

Hokkaido-Honshu DC link in Japan.

6.4 AFTAKKINGEN

6.4.1 AC-technologie

Indien er meerdere aftakkingen nodig zijn, wensen we deze afzonderlijk te beveiligen om bij een fout de gevolgen te kunnen beperken. Hiervoor dient in één van de aftakpunten een onderstation met vermogensschakelaars geplaatst te worden. Indien slechts één aftakpunt nodig is naar het onderliggende net, kan men ook opteren om een “T”-connectie te maken in de verbinding. In de volgende paragrafen worden deze “T”-connecties bekeken voor de verschillende technologieën.

6.4.1.1 Luchtlijn

Luchtlijnen zijn uiterst geschikt om aftakkingen te maken. Hierdoor is de oplossing *future proof* omdat op eenvoudige wijze nieuwe lokale ontwikkelingen of productie-eenheden kunnen worden aangesloten. Een bestaande mast kan aangepast of vervangen worden om een aftakking toe te laten, waarna het aankoppelen van een extra lijn eenvoudig uitgevoerd kan worden.

6.4.1.2 Kabel

Ondergrondse hoogspanningskabels zijn niet geschikt om ondergronds aftakkingen te maken. Men kan wel eenvoudig bovengronds komen met kabeleindsluitingen om zo met klassieke luchtgeïsoleerde verbindingen een aftakking te realiseren. Hierdoor is de oplossing *future proof* omdat op redelijk eenvoudige wijze nieuwe lokale ontwikkelingen of productie-eenheden kunnen worden aangesloten. Er is wel een beperkt terrein (< 0,5 ha) nodig.

6.4.1.3 GIL

De GIL is geschikt om ondergrondse aftakkingen te maken. De technologie laat toe om bijvoorbeeld T-stukken te plaatsen op de buizen om een zijtak te creëren. Hier-

door is de oplossing *future proof* omdat op eenvoudige wijze nieuwe lokale ontwikkelingen of productie-eenheden kunnen worden aangesloten.

6.4.1.4 Supergeleiders

Net zoals bij ondergrondse kabels is deze technologie niet geschikt om ondergronds aftakkingen te maken, maar is dit bovengronds eenvoudig mogelijk. Hierdoor is de oplossing *future proof*, omdat op redelijk eenvoudige wijze nieuwe lokale ontwikkelingen of productie-eenheden kunnen worden aangesloten.

6.4.2 DC-technologie

Op het aftakpunt zelf hebben DC-oplossingen dezelfde impact als hun overeenkomstige AC-oplossingen. In DC zal er echter op het uiteinde van elke aftakking een conversiestation moeten geplaatst worden. We spreken in dit geval over een multiterminal.

6.4.2.1 VSC

Multi-terminals zijn recent ontwikkeld en slechts twee projecten⁶³ zijn reeds volledig in dienst. De extra complexiteit bestaat in de coördinatie tussen de verschillende terminals. Bij een gewone “point-to-point”-verbinding wordt de DC-spanning van één van de twee conversiestations (slave) gefixeerd. Het andere conversiestation (master) kan dan eenvoudig het vermogen regelen door zijn DC-spanning een beetje te laten stijgen of dalen. Er is dus geen coördinatie nodig tussen de twee stations. Bij multi-terminals moet er afstemming gebeuren tussen de verschillende onderstations. Verscheidene leveranciers claimen dat ze in staat zijn om multi-terminals te bouwen. Er zijn echter nog geen internationale normen. Dit betekent dat als men in de toekomst een extra aftakking nodig zouden hebben, men gebonden is aan de originele leverancier.

63

Zhoushan- en Nanao-project, beide in China.

Indien er meerdere aftakkingen gewenst zijn, dient net als bij AC in één van de aftakpunten een onderstation met vermogensschakelaars geplaatst te worden. Bij DC zijn er twee mogelijkheden:

- meerdere conversiestations bouwen om dan een klassiek AC-onderstation te plaatsen.
- Een onderstation in DC. De vermogensschakelaars in DC staan echter nog in hun kinderschoenen en er zijn op dit moment geen internationale normen voor DC netwerken. Deze tweede mogelijkheid beschouwen we daarom als niet relevant voor de beschouwde use case.

Ook dient opgemerkt te worden dat de grootte (oppervlakte en hoogte) en de kostprijs van een aftakconversiestation groter is dan een “point-to-point” conversiestation van hetzelfde vermogen. Aftakkingen naar het onderliggende net vereisen meestal maar een beperkt vermogen⁶⁴ ten opzichte van een 2x3GW verbinding. Bij lagere vermogens zijn lagere spanningen meer opportuun. De spanning van het systeem ligt echter vast bij een aftakking. Hogere spanningen leiden tot grotere afstanden tussen onder spanning staande delen (isolatie gebeurt bij veel onderdelen van een conversiestation door lucht) en dus grotere afmetingen van de installaties, hetgeen op zijn beurt ook een invloed heeft op de prijs.

We kunnen concluderen dat een VSC-multi-terminal op dit moment technisch kan, maar dat er nog veel minpunten zijn:

- Maturiteit nog zeer laag;
- Zonder standaarden weinig tot geen flexibiliteit naar de toekomst mogelijk is;
- Grote installatie nodig (vergeleken met AC-oplossingen);
- DC-onderstations bestaan nog niet, waardoor het aantal aftakkingen beperkt wordt tot één of maximum twee;
- Zeer duur (vergeleken met AC-oplossingen).

6.4.2.2 LCC

Zoals in hoofdstuk Conversiestations beschreven moet de spanning worden omgepoold als als het gevraagde vermogen van richting verandert. Er bestaan wereldwijd een aantal LCC-multi-terminals maar hierbij wordt op voorhand vastgelegd of het vermogen van AC naar DC vloeit of omgekeerd. Hierdoor is een ompoling niet nodig of wordt het enkel als back-up gebruikt.

Onze verbindingen zijn echter bedoeld voor een vermaasd net. Het vermogen moet hierbij in alle richtingen kunnen vloeien. Om geen kortsluiting te veroorzaken moeten daarom DC-schakelstations worden geplaatst. Tijdens de schakelingen moet het betrokken conversiestation afgeschakeld worden, wat in sommige situaties niet toelaatbaar is. Ook kunnen problemen bij het schakelen tot kortsluitingen leiden. Om deze redenen zijn LCC-multi-terminals niet geschikt voor onze toepassing.

6.4.3 Conclusie

LCC is niet geschikt voor aftakkingen in een vermaasd net. Met VSC-technologie is dit technisch wel mogelijk, maar dit staat nog in zijn kinderschoenen. Bovendien is het duur, zijn er grote oppervlaktes nodig en bij gebrek aan een standaard is er geen flexibiliteit voor toekomstige uitbreidingen.

In AC zijn aftakkingen daarentegen zeer eenvoudig. Enkel bij kabels is een beperkte bovengrondse installatie nodig.

64

Elia hanteert bijvoorbeeld 555MVA als standaard vermogen voor een injectie van het 380kV-net naar het 150kV-net.

6.5 OPPORTUNITEITEN

6.5.1 AC-technologie

6.5.1.1 Luchtlijn

De maximum capaciteit van een luchtlijn is afhankelijk van de mogelijkheid tot koeling. De meeste geleiders mogen niet warmer worden dan 75°C, dit is ook vastgelegd in het AREI (hogere temperaturen, zoals bij HTLS of bij het gebruik van steunkabels zijn mogelijk, maar hiervoor moet een uitzondering aangevraagd en goedgekeurd worden). Als de temperatuur verder zou stijgen, zouden de geleiders te veel uitzetten, waardoor de wettelijk te respecteren grondafstanden niet meer voldaan zijn. Daarom wordt de maximale toegelaten doorhang berekend voor een windstille, zonnige zomerdag.

Op een winderige, bewolkte en/of koude dagen is de koeling beter en kan meer vermogen getransporteerd worden. Elia laat daarom in de winter standaard 10% meer capaciteit toe. Er zijn ook systemen die de temperatuur gaan opvolgen, zoals bijvoorbeeld Ampacimon⁶⁵, die de doorhang kunnen meten⁶⁶ en zo onrechtstreeks de temperatuur kunnen berekenen. Hiermee zijn tijdelijke overbelastingen mogelijk van 30% tot 50% bij gunstige weersomstandigheden⁶⁷.

6.5.1.2 Kabel

Ondergrondse kabels kunnen door trage opwarming van de omliggende grond gedurende lange tijd (uren tot dagen) een overbelasting aan. Via glasvezels die geïntegreerd worden in de kabelmantel kan de temperatuur, en dus de overbelasting, zeer nauwkeurig opgevolgd worden. Elia heeft dit glasvezel-controlesysteem reeds enkele jaren operationeel op de 150kV-kabel tussen Koksijde en Oostende. Bij een belasting van 75% van het nominaal vermogen is gedurende 4 uur een overbelasting van bijna 70% en gedurende 36 uur een overbelasting van 20% mogelijk. Men kan echter de overbelasting niet blijven hanteren,

aangezien de warmteverliezen zo verder blijven oplopen en de efficiëntie voor het transport van elektriciteit daalt. Het uitbaten op de limieten van de kabel leidt bovendien tot een snellere veroudering van de kabel.

6.5.1.3 GIL

In onze case maken we reeds gebruik van de overbelastingsmogelijkheden van de GIL (standaard slechts 4000A). Als we de volledige overbelastingsmogelijkheid (tot 5000A) benutten, kunnen we de maximale transportcapaciteit met 5% verhogen (tot 3,46 GVA).

6.5.1.4 Supergeleiders

Supergeleidende kabels kunnen ook functioneren als foutstroombegrenzer in het net omdat in geval van overstroom de weerstand snel toeneemt. Als de stroom te snel stijgt, zal de supergeleiding verdwijnen en zal de weerstand plots sterk stijgen. Hierdoor zal de stroom sterk afgeremd worden. Dit zorgt ervoor dat bij een foutstroom er een 'rem' komt op een stroom. Omdat een supergeleider zich echter nog in een experimentele fase bevindt, is dit praktisch nog niet uitgevoerd.

6.5.2 DC-technologie

→ Overbelasting

Vermits de conversiestations nauwelijks overbelastbaar zijn, gelden de overbelastingen bij de verschillende AC-technologieën niet voor de equivalente DC-technologieën.

⁶⁵ www.ampacimon.com

⁶⁶ Aan de hand van de trillingen en staande golven in de geleiders.

⁶⁷ Op voorwaarde dat ook de schakelvelden dit toelaten.

→ Sturen van fluxen

Bij conversiestation kan, binnen de limieten van het station bepaald worden hoeveel vermogen er passeert en in welke richting. Hiermee kunnen soms congesties elders in het net vermeden worden. Bij AC kan deze sturing in beperktere mate ook door het plaatsen van zogenaamde "Phase Shifting Transformers" (PST's).

→ Reactief vermogen (enkel VSC)

Een VSC-conversiestation kan reactief vermogen injecteren of absorberen op het aansluitpunt van de installatie (typisch tot 30% van het nominaal vermogen). Het actief vermogen wordt hierbij wel beperkt met enkele procenten. Hierdoor zouden spanningsregelende middelen (shuntreactoren, condensatorbanken, static var compensator,...) uitgespaard kunnen worden indien ze nodig zouden zijn op die plaats. Opmerking: er is in de nabije toekomst nood aan meer spanningsregelende middelen. De timing van de projecten beschreven in hoofdstuk 3 komt echter te laat om aan deze nood tegemoet te kunnen komen.

→ Actieve filter (enkel VSC)

De VSC kan ook opereren als actieve filter (type Statcom) indien dit nodig is op de plaats van het conversiestation. Op dit moment zijn er echter geen noden gekend.

6.6 CONCLUSIE

Voor onze use-case is een verbinding met een capaciteit van 6GW en een lengte van 50 à 100km nodig. Bij dergelijke vermogens is het zeer belangrijk dat deze verbinding functioneert, een hoge beschikbaarheid heeft, een positieve impact heeft op de netuitbating en zeker geen nieuwe (onbeheersbare) risico's introduceert, betrouwbaar is en dus voldoet aan de criteria die vooropgesteld worden.

Voor de **AC- en DC-supergeleiders** en de **DC-GIL** stellen we vast dat deze nog **niet** voldoende **matuur** zijn. Het onderzoek op laboschaal is nog lopende en/of er werden hooguit nog maar enkele pilotprojecten op lagere spanning en met kleinere capaciteit verwezenlijkt. Door de beperkte maturiteit is het dan ook quasi onmogelijk om te oordelen over de beschikbaarheid en betrouwbaarheid. Deze technologieën zijn nog ver van rijp voor de beschouwde use case en zullen ook in de verdere vergelijking niet meer worden bestudeerd.

Ondanks de beperkte kennis over de **AC-GIL**, verwachten we dat faalkans van deze technologie aanvaardbaar kan zijn, maar dat de onbeschikbaarheid niettemin zeer lang kan zijn bij incidenten. De impact op het net is positief en aftakkingen zijn eenvoudig te realiseren. De maturiteit is echter nog zeer laag: er is slecht één enkele leverancier en verbindingen van de opgegeven afstand zijn nog nooit gerealiseerd. Hierdoor achten we AC-GIL niet geschikt voor het gebruik binnen de use cases.

Wat betreft de AC-kabel kan er niet gegarandeerd worden dat deze technisch realiseerbaar is voor de use-case. De combinatie van kabels en shuntreactoren zorgt voor fenomenen (zoals harmonische frequenties en transiënten) die optreden in het systeem en de stabiliteit van het net in gevaar kunnen brengen. Verbindingen van dergelijke afstanden en vermogens in AC-kabel werden nog niet gerealiseerd, waardoor

deze fenomenen moeilijk ingeschat kunnen worden. Vermits deze verbinding deel zal uitmaken van onze backbone zijn dermate risico's voor de veilige netuitbating niet aanvaardbaar. Bovendien zijn de hersteltijden langer dan bij een luchtlijn.

De AC-kabel is niet technisch haalbaar voor de opgegeven afstanden, maar wordt in de vergelijking verder wel meegenomen omdat deze eventueel toepasbaar kan zijn op kleinere afstanden. Het Stevin-project heeft een AC-kabel maar deze is maar 10km lang en heeft een beperkter vermogen.

In DC kunnen we concluderen dat LCC-technologie moeilijk inpasbaar is in een vermaasd net en voor de use-case niet voldoet aan de noden.. De betrouwbaarheid ligt lager, er zijn teveel beperkingen op vlak van netuitbating en aftakkingen zijn quasi niet mogelijk.

VSC-conversiestations in combinatie met de DC-luchtlijn en -kabel zijn technisch mogelijk. Ook in andere projecten zoals Alegro en SudOstLink werd dit gerealiseerd. Bij Alegro was het belang van de stuurbaarheid bij interconnecties van belang en bij SudOstLink is er een zeer grote afstand te overbruggen. De karakteristieken van de use-case zijn echter anders en hierdoor is de technologie te beperkend:

- Bij het uitvallen van een parallelle AC-verbinding wordt het vermogen niet automatisch herverdeeld over de DC-verbinding. De vermogensstromen over een DC-verbinding moeten namelijk actief gestuurd worden. Een slechte werking hiervan kan leiden tot overbelastingen in het net en eventueel zelfs tot netinstortingen.
- Verschillende resonanties moeten onderzocht worden. Er is echter nog weinig kennis hoe verschillende installatie met vermogen elektronica (zoals een conversiestation) met elkaar reageren en de bijhorende gevolgen naar resonanties.

- Er is steeds een **conversiestation** nodig en wanneer er een **aftakking** (bijkomend injectiepunt) gerealiseerd wordt naar het onderliggende net is opnieuw een **bijkomend conversiestation** nodig. Dergelijke multiterminal convertor heeft een zeer lage maturiteit. Ook is er op dit moment geen standaardisatie waardoor er weinig tot geen flexibiliteit is naar de toekomst toe.
- Door het hoog aantal jaarlijkse falingen is de betrouwbaarheid beperkt.

De **AC-luchtlijn** is een **gekende technologie** die wereldwijd al verschillende decennia wordt gebruikt en dus een **hoge maturiteit** heeft. Vermits het Belgische hoogspanningsnet voornamelijk uit deze technologie bestaat is het integreren van een bijkomende verbinding relatief eenvoudig te realiseren. Bovendien hebben deze verbindingen een goede **betrouwbaarheid** en **beschikbaarheid**. Verder zijn **aftakkingen zeer eenvoudig te realiseren** wat resulteert in een hoge flexibiliteit naar de toekomst. Technisch is de AC-luchtlijn veruit de beste oplossing voor onze use-case.

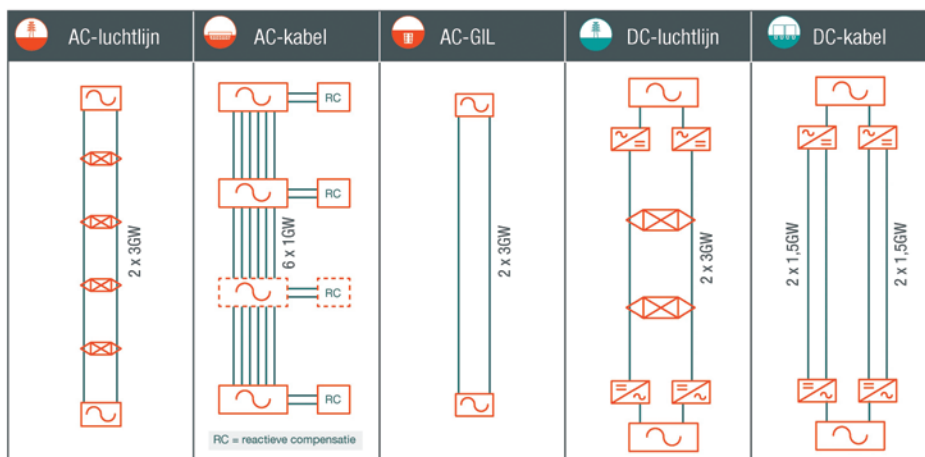
Indien een beperkte sturing nodig is zullen wel PST's moeten geplaatst worden in één van beide uiteinden. Dit zal de complexiteit enigszins verhogen, maar dit blijft aanvaardbaar en het aantal faling licht doen stijgen, maar dit blijft veel lager dan de andere technologieën.

Volgende figuur geeft schematisch de technologieën met hun specifieke configuratie weer. Een aantal niet-geschikte technologieën nemen we verder mee in de analyse voor de volledigheid van de studie. Enkel VSC-technologie zal nog bestudeerd worden voor de DC-varianten. Ook volgende subvarianten worden nog meegenomen:

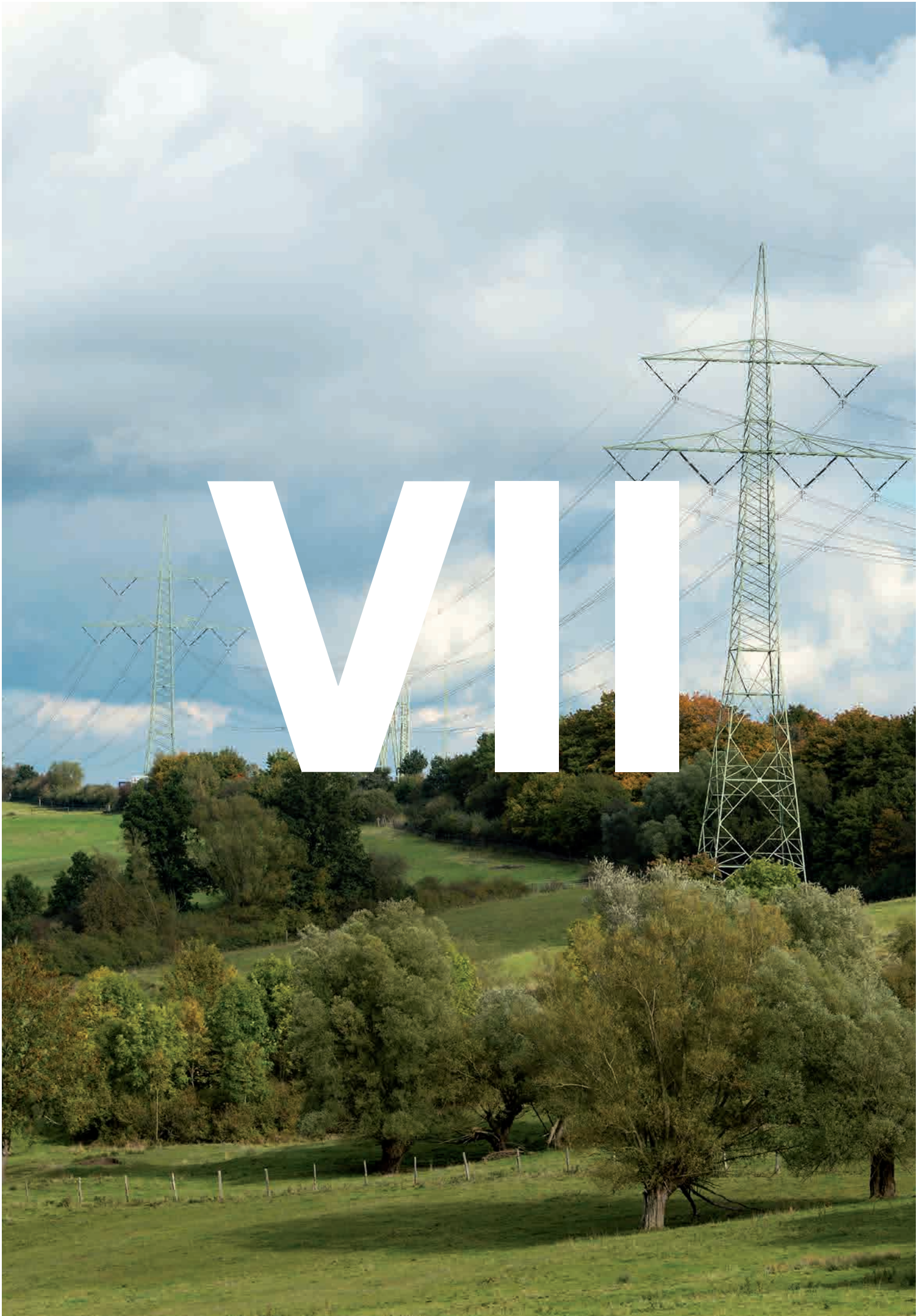
- AC-kabels op 220kV in plaats van 380kV;
- DC-converteren 1,5GW in plaats van 3GW.

Merk op dat het niet mogelijk is om een AC-kabel te plaatsen over de volledige lengte van het traject. We nemen de optie AC-kabel echter verder in deze studie mee als toepassing op korte deeltrajecten.

→ **Figuur 31**
Vergelijking van technologieën



WVI



Economische analyse

- 7.1 | Investeringskost
 - 7.1.1 | Basisveronderstellingen AC-technologie
 - 7.1.2 | Basisveronderstellingen DC-technologie
 - 7.1.3 | Conclusie
- 7.2 | Jaarlijksekost: netverliezen & onderhoudskost
 - 7.2.1 | AC-technologie
 - 7.2.2 | DC-technologie
- 7.3 | Totale annuïteit

VII

Economische analyse

7.1 INVESTERINGSKOST

7.1.1 Basisveronderstellingen AC-technologie

7.1.1.1 Eindstations

We gaan ervan uit dat de eindstations reeds bestaan en op 380kV worden uitgebreid. We bekijken hier dus enkel de kost van de uitbreiding. Op basis van verschillende Elia-projecten komen we uit op een prijs van 1,3M€⁶⁸ per aansluitveld. Zo'n aansluitveld is vereist aan beide uiteinden van elk circuit.

Soms is sturing van de fluxen gewenst. Bij AC kan dit bereikt worden door Phase Shifting Transformers (PST's) te plaatsen in de eindstations. Hier kunnen we terugvalen op projecten op de noordgrens waar Elia deze installaties al heeft geplaatst. Afgaande op die projecten komen we uit op een prijs van 70M€ voor 6GW aan PSTs plus het schakelstation nodig om deze te beveiligen.

We verwachten hier geen grote prijsevoluties voor de komende 5 jaar.

7.1.1.2 Luchtlijn

In het Stevin-project kostte het gedeelte van de verbinding in nieuwe luchtlijn 380kV (zelfde vermogen) 1,8M€/km.

Indien we veronderstellen dat we voor de nieuwe te realiseren verbindingen binnen de Ventilus en Avelgem-centrum gebruik maken van dezelfde technologie als bij Stevin (type geleider en mast) kunnen we het Stevin-project per km als referentie nemen. Uiteraard kan dit nog afwijken indien er bv. meer of minder hoekmasten⁶⁹ geplaatst moeten worden, maar er is niets dat erop wijst dat Stevin qua prijs een uitzonderlijk project was.

Buiten beperkte schommelingen van de staal- en aluminiumprijzen, verwachten we geen grote prijsevoluties bij luchtlijnen.

7.1.1.3 Kabel

In het Stevin-project was de kost per circuit 380kV (dus voor 1GW) 1,9M€/km. Hierin zitten zowel de kabel, de grondwerken, de plaatsing van de kabel als het herstellen van het terrein. Op het traject van Stevin is er ook een tunnel geplaatst, maar deze kosten bekijken we in de volgende paragraaf. Opmerking: op het moment van de aankoop van de kabels waren de metaalkoersen laag.

Vermits we op 220kV dezelfde plaatsingswijze hebben voorzien als op 380kV is de kost voor de plaatsing per circuit gelijk. Door de kost van de kabel 380kV te vervangen door deze van een kabel 220kV komen we op 1,25M€/km per circuit 220kV.

Het is moeilijk te voorspellen hoe deze kosten de volgende 5 jaar zullen evolueren.

- Kabels 380kV en hun toebehoren (verbindingsmoffen, eindsluitingen...) worden nog niet in grote oplages besteld. Hier valt een beperkte reductie te verwachten door de aankoop van grote volumes.
- De productiecapaciteit is momenteel nog beperkt. Indien er ook andere grote AC- of DC-kabelprojecten⁷⁰ komen, zal deze capaciteit snel verzadigen en kunnen de kosten snel stijgen. In het geval dat beide projecten beschreven in hoofdstuk 3 volledig in AC-kabel worden uitgevoerd⁷¹, zal ook het lanceren van beide projecten de prijzen sterk doen stijgen. Er zijn namelijk 18 kabels x 150km = 2700km kabel nodig. Een productielijn kan jaarlijks maar 100 tot

⁶⁸

1M€ = 1 miljoen euro

⁶⁹

Zie figuur 7, pagina 30

⁷⁰

De meeste productielijnen kunnen zowel AC- als DC-landkabels maken. Grote projecten van het ene zullen ook de prijzen van het andere type beïnvloeden.

⁷¹

Fictief geval want reeds technisch uitgesloten.

→ **Tabel 4**
Kostprijzen van
shuntreactoren

	Shuntreactor (M€)	Aansluitveld (M€)
Shuntreactor 380kV 130Mvar	4,1	1,3
Shuntreactor 220kV 130Mvar	3,0	0,6

enkele 100'den kilometers kabel produceren en met onze beschikbare informatie schatten we dat er wereldwijd slechts 20 à 30 geschikte productielijnen zijn. We komen uit dat ruwweg een half jaar productiecapaciteit van de volledige wereldproductie nodig zal zijn, enkel voor onze projecten.

- Ongeveer de helft van de investeringskost wordt bepaald door de aankoopsprijs van het koper en deze schommelt sterk.

7.1.1.3.1 Tunnel

Hoe dieper een kabel wordt geplaatst, hoe minder goed hij zijn overtollige warmte kan afvoeren en hoe minder vermogen door de kabel kan passeren. Omdat we op de limiet van de transportcapaciteit van de kabels zitten, kunnen we dus geen diepe boringen uitvoeren onder diepe obstakels (bv. rivieren of kanalen). In dit geval zal een tunnel moeten gegraven worden. In het Stevin-project was de kost voor een tunnel van 230m met 2 afzonderlijke kokers 10M€. Dit was voor slechts 4 kabelcircuits. Voor onze analyse veronderstellen we een meerkost van 25% voor 6 kabelverbindingen en 50% voor 10 kabelverbindingen.

7.1.1.3.2 Reactieve compensatie

Zoals eerder beschreven dienen er bij een lange ondergrondse verbinding aanzienlijk wat shuntreactoren geplaatst te worden. Deze shuntreactoren hebben uiteraard een kostprijs.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat het aantal constructeurs die deze shuntreactoren kunnen maken met een "laag" geluidsvermogen beperkt zijn en we verwachten dat de vraag naar shuntreactoren in Europa in de toekomst zal toenemen omwille van de offshore kabelnetwerken. Ook hier bestaat een risico tot verzadiging van de productie met prijsstijgingen tot gevolg.

In de prijsberekening gaan we ervan uit dat we op 380kV 42 shuntreactoren 130Mvar plaatsen en op 220kV 25 shuntreactoren 130Mvar, telkens met elk hun eigen aansluitveld.

7.1.1.3.3 Tussenstations

Indien er tussenstations 380kV nodig zijn voor de reactieve compensatie, rekenen we een basisprijs van 20M€ per tussenstation. Dit is inclusief bouwkundige werken, de schakelvelden voor de kabels, een koppelveld en beveiligingen, maar exclusief de reactieve compensatie. In de berekening hebben we verder rekening gehouden met de best case en hebben we gerekend met slechts één enkel tussenstation op een traject van 75km. Zoals eerder geschreven kunnen dit er ook twee zijn.

Op 220kV gaan we uit van de hypothese dat we zonder tussenstation kunnen werken (best case). Indien er wel een tussenstation nodig is, zal dit tussenstation goedkoper zijn als op 380kV. Dit komt vooral omdat het materieel op 220kV goedkoper is. Anderzijds zijn er wel meer kabelvelden nodig, waardoor de basisprijs rond 15M€ zal schommelen (ook exclusief reactieve compensatie).

→ **Tabel 5**
 Samenstelling
 Capex GIL

Samenstelling capex GIL	Prijs/km (M€)
2 sets GIL voor tunnel	9,4
Tunnel (prefab in open sleuf) voor 2 sets GIL	3,5
Koeling	0,2
Surplus voor geboorde tunnels (één tunnel aan 10M€ per 10km)	1
Onvoorziene (10%)	1,4
Totaal	15,5

7.1.1.3.4 Transformatie naar 220kV

Om kabels 220kV te kunnen gebruiken moeten er op de uiteinden transformatoren 380/220kV geplaatst worden. In het Stevin-project hebben de 4 transformatoren 380/220kV, inclusief schakelvelden, in totaal 22M€ gekost. De transformatie in Stevin was goed voor 2,4GVA. We hebben nu 6MW (6,6GVA) nodig, ofwel 11 transformatoren 380/220kV, hetgeen een budget van ongeveer 60M€ aan elk uiteinde vertegenwoordigt.

Indien er PSTs nodig zijn, kan ook de functie van de transformator en PST gecombineerd worden in één toestel. Dit geeft een meerkost van 20M€.

7.1.1.4 GIL

Tabel 5 geeft de kostprijs weer van de GIL-oplossing. Vooral de GIL zelf weegt zwaar door in de prijs. De fabrikant claimt wel dat er gewerkt wordt aan oplossingen om een aantal processen te automatiseren, waardoor de prijs zou kunnen dalen.

De tunnel zoals hier uitgerekend bestaat uit prefab gemaakt elementen die in een open sleuf worden geplaatst. Voor de kleinere hindernissen (hoofdwegen, kleine kanalen,...) waarvoor we bij kabels gestuurde boringen hadden kunnen toepassen, moeten nu ook in een geboorde tunnel komen. Deze meerkost zal sterk afhangen van het gekozen traject.

Vermits deze prijzen niet gebaseerd zijn op projectervaring, zijn er zeker posten nog

niet in kaart gebracht zijn. Daarom tellen we nog 10% aan onvoorziene kosten.

Opmerking: In het kader van het EU-beleid ter vermindering van de broeikasgassen is aan het gebruik van deze technologie ook een financieel risico verbonden wanneer er een CO₂-heffing wordt ingevoerd. Hiermee is geen rekening gehouden in deze analyse.

7.1.2 Basisveronderstellingen DC-technologie

7.1.2.1 Conversiestations

Hier zullen we vertrekken van prijzen van een aantal projecten binnen de Elia Group. In de literatuur zien we soms dat een extrapolatie van de prijs naar grotere stations louter gebaseerd is op het vermogen. Door onze gesprekken met verscheidene leveranciers en gebaseerd op cijfers van eigen en buitenlandse projecten, komen we uit op volgende set van regels:

- Een rigid bipole is 20% duurder dan een symmetric monopole
- De prijs varieert ook in functie van het vermogen en de spanning:
 - 50% van de prijs van een conversiestation is vast;
 - 35% van de prijs varieert met het vermogen;
 - 15% van de prijs varieert met de spanning.

Tot voor kort voorzag men voor een VSC-conversiestation een toeslag⁷² als deze moest werken met een luchtlijn. Dit was nodig om blikseminslagen te kunnen opvangen. Voor een conversiestation als ALEGrO komt dit neer op ongeveer 10M€. Men heeft hiervoor ondertussen andere methoden gevonden, waarbij de meerkost in de toekomst beperkt is.

Bij onze rondvraag waren de meningen verdeeld over eventuele prijsevoluties van de VSC-conversiestations. De grootste prijsevolutie zou kunnen gebeuren op vlak van de IGBT's. Soortgelijke elementen worden

ook in elektrische wagens geplaatst. We verwachten een doorbraak van deze wagens. Hierdoor zal de productie van IGBT's overgaan op massaproductie, hetgeen de prijs sterk kan doen dalen. Het geheel van IGBT's neemt momenteel ongeveer 20% van het totale budget van een conversiestation in beslag. Stel dat deze prijs kan halveren, dan zouden de conversiestations 10% in prijs kunnen dalen.

Volgende tabel geeft een overzicht van de weerhouden prijzen voor de verschillende conversiestations:

↓ **Tabel 6**

Weerhouden prijzen voor de verschillende conversiestations. Merk op dat één rigid bipole met onze inschattingen minder kost dan twee symmetric monopoles

		Heden (M€)	Evolutie (M€)
Luchtlijn	Rigid bipole ±500kV 3000MW	302	218
	Symmetric monopole ±320kV 1500MW	165	138
	Symmetric monopole ±500kV 555MW	130	109
	Symmetric monopole ±320kV 555MW	118	99
Kabel	Rigid bipole ±500kV 3000MW	242	218
	Symmetric monopole ±500kV 1500MW	164	148
	Symmetric monopole	121	109

⁷² Full-bridge in plaats van half-bridge.

Merk op dat één rigid bipole met onze inschattingen minder kost dan twee symmetric monopoles.

7.1.2.2 Luchtlijn

Uit de technische brochure 186 'Economic assessment of HVDC links' van Cigré blijkt dat bij gelijkblijvend vermogen een DC-lijn ongeveer tweederde van een AC-lijn zou kosten. Hierbij worden vooral LCC-luchtlijnen bestudeerd. Onze budgetinschattingen voor een luchtlijn 2xLCC ± 320 kV rigid bipole 3000MW, 4x707 AMS-2Z bevestigen dit. We ramen deze op 1,2M€/km ten opzichte van 1,8M€/km voor de AC-luchtlijn. Bij de LCC ± 600 kV bipole met nulgeleider 6000MW, 4x928 AMS-3Z volgens tabel 6 kunnen we de kosten zelfs laten zakken tot 1,0M€/km.

Bij VSC zijn de luchtlijnen in ons geval duurder. De luchtlijn 2xVSC 500kV rigid bipole 3000MW, 4x707 AMS-2Z, heeft dezelfde opbouw en geleiders als zijn LCC tegenhanger, maar omdat de spanning hoger is, is de mast ook groter. Hier komen we op 1,4 M€/km.

Voor de complexe masten voor de variant 4 x VSC ± 320 kV symmetric monopole 1500MW, 2x707 AMS-2Z komen we uit op 1,9M€/km, hetgeen zelfs duurder is dan bij de AC-luchtlijn.

De subvariant 4 x VSC ± 320 kV symmetric monopole 1500MW is dus zowel qua conversiestations als qua luchtlijn duurder dan de 2xVSC 500kV rigid bipole 3000MW oplossing. We zullen verder in dit hoofdstuk enkel verdergaan met de tweede (goedkoopste) oplossing.

7.1.2.3 Kabel

De kabelverbinding van het ALEGrO-project (2500mm²Cu, ± 320 kVdc) kostte ongeveer 1,7M€/km, exclusief de tunnel onder de Maas. Voor een ± 500 kVdc-kabel hebben we slechts een ruwe inschatting van de prijs, maar we verwachten dat de prijs per kabel circuit op ongeveer 2M€/km zal komen.

De prijsevolutie van deze kabels volgen dezelfde trends als AC-kabels. Vermits we nu

minder dan de helft van de kabels nodig hebben vergeleken met 380kV AC-kabels, is de kans minder groot dat we met dit project de markt verzadigen.

De subvariant 4 x VSC ± 500 kV symmetric monopole 1500MW is duurder qua conversiestations dan de 2 x VSC 500kV rigid bipole 3000MW oplossing en de kost van de kabels is gelijk. We zullen verder in dit hoofdstuk enkel verdergaan met de tweede (goedkoopste) oplossing.

7.1.3 Conclusie

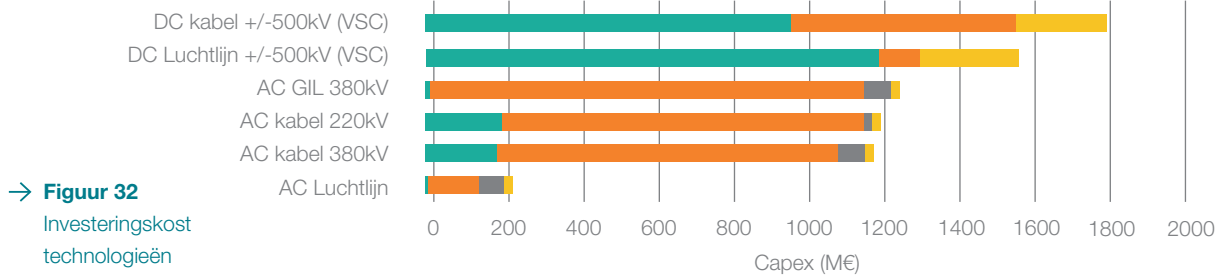
Onderstaande figuur vat de investeringskost samen voor de verscheidene technologieën, toegepast op een verbinding van 75km.

De AC-luchtlijn oplossing is veruit de goedkoopste met een investeringskost rond de 140 M€ (220 M€ indien PST's en aftakking).

Alle andere technologieën zijn merkkelijk duurder en komen voor een verbinding van 75km uit op een investeringskost van 1,2 tot 1,3 b€ voor de andere AC-oplossingen en 1,5 tot 1,8 b€. Zonder PST en aftakking zijn de andere AC-oplossingen ongeveer 8 maal duurder dan de AC-luchtlijn, de DC-luchtlijn 9 maal en de DC-kabel zelfs 11 maal. De algemene grote investeringskost voor DC vloeit voort uit de kost voor de conversiestations die ongeacht de te overbruggen afstand noodzakelijk zijn.

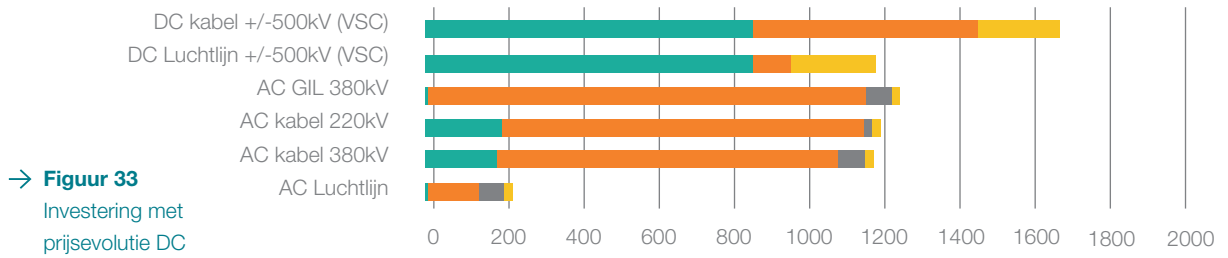
Bij de meeste technologieën verwachten we geen prijsevolutie of is de prijsevolutie onzeker. Enkel bij de VSC-conversiestations is er mogelijks een prijsdaling tot 10%. Ook zal de toeslag om te kunnen werken met OHL zo goed als wegvallen. Volgende tabel houdt rekening met deze prijsevolutie. Zonder PST en aftakkingen blijven de DC-luchtlijn en de DC-kabel respectievelijk 7 en 10 maal duurder dan de AC-kabel.

INVESTERINGSKOST TECHNOLOGIEËN



→ **Figuur 32**
Investeringskost technologieën

INVESTERING MET PRIJSEVOLUTIE DC



→ **Figuur 33**
Investing met prijsevolutie DC

- Onderstation
- Verbinding
- PST
- Aftakking

7.2 JAARLIJKSEKOST: NETVERLIEZEN & ONDERHOUDSKOST

7.2.1 AC-technologie

7.2.1.1 Luchtlijn

Voor klassieke masten 380kV blijkt uit analyses van Elia een typische kost van 4,5k€/km per jaar voor onderhoud. Een groot deel hiervan (2k€/km) zijn schilderwerken. Compacte pylonen zijn qua hoogte lager dan de klassieke masten waarmee deze prijs is berekend. Bovendien hebben de compacte masten geen armen in vakwerk. Er is dus minder schilderwerk per pyloon. Anderzijds is de veldlengte tussen de pylonen kleiner en zijn er dus meer pylonen te schilderen. We schatten de kosten voor schilderwerken van compacte masten op 75% van deze van klassieke masten wat een totale onderhoudskost geeft van 4k€/km per jaar.

De verliezen in de geleider worden bijna uitsluitend bepaald door klassieke "ohmse" of resistieve verliezen, die bepaald worden door het kwadraat van de stroom die door de geleider stroomt maal de weerstand van de geleiders ($W_{geleider}=I^2R$). Dit wil zeg-

gen dat indien de stroom verdubbelt, de verliezen maal vier gaan. Als we dit toepassen op figuur 2, waarbij opvalt dat bij standaarduitbating de belasting laag is, komen we uit dat de gemiddelde reële verliezen slechts één zestiende zijn van de verliezen bij vollast.

Gemiddeld hebben de geleiders 707-2Z een soortelijke ohmse weerstand (per geleider) van 46,5mΩ/km. In ons geval hebben we een vierbundelgeleider, waardoor de weerstand slechts een kwart zal zijn. We komen uit op een jaarlijks verlies van 0,82 GWh/km/draadstel/jaar, of 65GWh/jaar voor een verbinding van 75km. Dit komt overeen met ongeveer 0,01% van het getransporteerde vermogen en een jaarlijkse kost van 3,9M€/jaar.

7.2.1.2 Kabel

De onderhoudskost bestaat uit een jaarlijkse inspectie en occasioneel een herstelling. Onder de inspectie vallen onder andere de controlemetingen van de isolatie van het scherm en de controle van de "cross bonding" kasten die aanwezig zijn ter hoog-

↓ Tabel 7

Jaarlijkse kost voor onderhoud en netverliezen op kabelverbindingen

Type	Onderhoudskost (k€/j)	Kabels 380kV		Kabels 220kV	
		Aantal	Totaal (M€/j)	Aantal	Totaal (M€/j)
Shunt reactor	3	42	0,13	25	0,08
Schakelveld 380kV	5	67	0,34	22	0,11
Schakelveld 220kV	4	0	-	42	0,17
Transformer 380/220kV	4	0	-	22	0,09
Totaal			0,46		0,44

te van elke verbindingsmof. Elia hanteert een gemiddelde kost van 1,5k€/km/jaar⁷³ per jaar, hetgeen voor een verbinding van 75km neerkomt op 0,7M€/jaar op 380kV en 1,1M€/jaar op 220kV.

Ook de shuntreactoren, transformatoren en de aansluitvelden hebben onderhoud nodig. Voor shuntreactoren en transformatoren zijn dit vooral olieanalyses en schilderwerken. In de schakelvelden betreft dit onder andere de controle, diagnose en het mechanisch onderhoud van de verschillende toestellen zoals scheiders en vermogensschakelaars. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de jaarlijkse kost.

De verliezen in kabels moet men noodzakelijkerwijs lager houden dan in de geleiders van een luchtlijn omdat kabels de warmte moeilijker kunnen evacueren. Bij kabels zijn er drie soorten verliezen:

- Resistieve verliezen in de geleider: deze verliezen zijn vergelijkbaar met deze van luchtgeleiders.
- Resistieve verliezen in het scherm: de stroom in de geleider induceert ook een stroom in het scherm. Door de wijze van plaatsing (crossbonding – zie § Vermogen) kunnen we deze stroom sterk beperken.
- “Diëlektrische” verliezen in het isolatiemateriaal: door de hoge spanning die op de isolatie wordt geplaatst, gaan onzuiverheden in dit materiaal bewegen en dit zorgt voor opwarming. Dit effect hangt af van de spanning en zal dus altijd aanwezig zijn, ook wanneer er nagenoeg geen stroom door de verbinding vloeit.

In onze case gaan we er van uit dat de verbinding gemiddeld 25%⁷⁴ belast wordt. Voor een verbinding van 75km komt dit neer op 53 GWh/jaar op 380kV (6 parallelle circuits) en op 59 GWh/jaar op 220kV (10 parallelle wegen)

De shuntreactoren veroorzaken ook netverliezen. Deze hebben typische verliezen

van 0,23% en dit is quasi onafhankelijk van het getransporteerd vermogen⁷⁵. Hierdoor zijn deze verliezen groter dan de verliezen in de kabels zelf, namelijk 105GWh/jaar op 380kV en 69GWh/jaar op 220kV.

Op 220kV moeten we ook de verliezen van de transformatoren in de eindstations meenemen. Deze hebben ook typische verliezen van 0,23% bij vollast, maar hier moeten we wel rekening houden met de effectieve belasting. De jaarlijkse verliezen van deze transformatoren zijn 29GWh.

Dit alles geeft een totaal van 159GWh/jaar op 380kV en 157GWh/jaar op 220kV, hetgeen respectievelijk 9,5M€/jaar en 9,4M€/jaar zal kosten.

7.2.1.3 GIL

Wat het onderhoud betreft, vergt de GIL in theorie zeer weinig onderhoudsinterventies. Niettemin zet de beperkte ervaringsfeedback met betrekking tot deze technologie eigenaars ertoe aan zich behoedzaam op te stellen ten aanzien van preventief onderhoud. Ook de hulpsystemen van een tunnel vragen regelmatig onderhoud. Vermeldenswaard zijn de volgende onderhoudsacties:

- Periodieke inspectierondes. Eén keer per week (bij aanvang van de exploitatie) tot één keer per maand moet er een inspectieronde plaatsvinden. Deze inspectieronde dient om ervoor te zorgen dat er geen onregelmatigheden zijn, niet alleen op het niveau van de GIL, maar ook in de volledige installatie (inclusief tunnel, koeling,...) en de eindstations. Met name de druk in de buis (densimeter) moet visueel gecontroleerd worden. Daarnaast moet men ook de algemene toestand van de tunnel controleren (waterinsijpeling, netheid enz.).
- Periodiek (maximum elke 6 jaar) moet men met precisiedrukmeters een drukcontrole uitvoeren en de gaskwaliteit (vochtgehalte) meten. Daartoe moet het

73

Waarde volgens tariefdossier 2016.

74

Dit is een gewogen gemiddelde.

75

Indien grote vermogens getransporteerd worden door de kabels, kan een beperkt deel van de shuntreactoren afgeschakeld worden.

circuit buiten bedrijf gesteld worden. Gezien de lengte van de verbinding kan dit enkele weken in beslag nemen.

- De drukmeters moeten elke 6 jaar opnieuw getest worden. Ook hiervoor moet de installatie buiten bedrijf gesteld worden.
- De SF₆-gasdetectoren in de galerij moeten periodiek gekalibreerd worden, bijvoorbeeld iedere vijf jaar.
- De zuurstofdetectoren werken met gevoelige cellen die metertijd vanzelf opgebruikt raken en dus regelmatig weer opgeladen moeten worden.
- In de tunnel zijn ook diverse reinigingswerkzaamheden nodig. Op te merken valt dat het ventilatiesysteem ook vervuiling kan veroorzaken (daarom moet men filters installeren).
- Ook de koelsystemen en andere hulpsystemen vragen regelmatig onderhoud.
- Bovendien moeten het klassieke onderhoud van de schakelvelden in de eindstations uitgevoerd worden. Volgens onze inschattingen is er per 5 km tunnallengte één werknemer voltijds nodig, wat neerkomt op 1,5 miljoen EUR voor een 75 km lange tunnel (gerekend aan 100.000 EUR per werknemer per jaar).

Volgens onze inschattingen is er per 5 km tunnallengte één werknemer voltijds nodig, wat neerkomt op 1,5 miljoen EUR voor een 75 km lange tunnel (gerekend aan 100.000 EUR per werknemer per jaar).

De energieverliezen in een GIL zijn zoals bij de luchtlijn beperkt tot resistieve verliezen, waarbij de constructeur 6,89mΩ/km opgeeft als soortelijke weerstand. De totale energieverliezen bedragen hierdoor 47 GWh/jaar voor een dubbel systeem van 75km, wat neerkomt op 2,8M€/jaar.

In ons geval werken we met een gekoelde tunnel. Deze koeling is echter enkel nodig indien de temperatuur in de tunnel boven

20°C komt en we meer dan 4000A in een van de twee systemen willen transporteren. Vermits we meestal bij een lagere belasting uitbaten zullen we de verliezen voor de koeling in deze oefening verwaarlozen.

7.2.1.4 PST

Indien ook PST's nodig zijn, moet er per stuk rekening gehouden worden met een onderhoudskost van 10k€/jaar.

De verliezen kosten met 11GWh/jaar ongeveer 0,64M€.

7.2.2 DC-technologie

7.2.2.1 Conversiestations

Conversiestations zijn zeer complexe installaties en genereren bijgevolg veel onderhoud. Dit bestaat onder andere uit het onderhoud van het terrein en de gebouwen, het onderhoud van de transformatoren en de schakelapparatuur, het vervangen van halfgeleider elementen en het onderhoud van de koelsystemen. Afgaande van de onderhoudscontractie die aangeboden zijn voor Alegro, komt dit neer op ongeveer 2M€ per jaar per conversiestation. Volgens de constructeurs zou deze kost amper afhankelijk zijn van de grote van de installatie en ongeveer identiek voor elk type van conversiestation.

Ook de verliezen van een conversiestation zijn hoog. Deze bestaan onder andere uit resistieve verliezen, magnetisatie van de transformator en de verliezen in de halfgeleiders. Voor LCC-convertoren zijn deze verliezen al enige tijd gestabiliseerd rond 0,85% van het vermogen bij vollast. Afgaande van cijfermateriaal van de constructeur, kunnen dit we opsplitsen in:

1. 0,10% "no-load"-verliezen, zoals de magnetisatie van transformatoren. Deze verliezen zijn altijd aanwezig vanaf dat de convertor ingeschakeld is, ook al stroomt er geen vermogen door de convertor.

- 0,45% van de verliezen evolueren kwadratisch met de stroom. Hieronder vallen de resistieve verliezen.
- 0,30% evolueert lineair met de stroom.

Als we dit vertalen naar het belastingprofiel van onze verbinding, komen we uit op een verlies van 0,20% van het vermogen.

Historisch lagen de verliezen bij VSC-conversiestations hoger dan bij LCC. Dit is ondertussen sterk gedaald en de verliezen van de meest recente VSC symmetric monopoles evenaren de verliezen van deze van de LCC-conversiestations. Voor de VSC (rigid) bipoles zit men nog op 0,94% op vollast of 0,22% van het vermogen bij ons belastingsprofiel. Voor onze use case komt dit neer op 113GW/jaar voor de vier 3GW conversiestations. Indien ook twee conversiestations 555MW voor een aftakking nodig zijn, komt dit bij 20GWh per jaar.

7.2.2.2 Luchtlijn

De DC-luchtlijn is qua onderhoud gelijkaardig aan AC-luchtlijnen. Net zoals bij AC variëren de schilderwerken met de oppervlakte aan staal. We komen hierdoor uit op 4k€/jaar voor de 500kV variant en op 4,5k€/jaar voor 320kV vierdraadstel variant.

Ook qua berekening van de verliezen is dit voor DC-luchtlijnen gelijkaardig aan AC-luchtlijnen. De soortelijke weerstand van de geleider 707-2Z is identiek voor AC en DC. We komen uit voor de 500kV variant VSC op 17GWh/jaar.

Samen met de convertoren geeft dit een jaarlijkse kost van 15M€.

7.2.2.3 Kabel

Er zijn slechts 2 i.p.v. 3 kabels per set en er zijn geen cross bonding kasten te onderhouden. We schatten de kosten voor het onderhoud op maximum 50% van deze van AC-kabels, hetgeen neerkomt op 0,75k€/km. Voor 4 sets kabels van 75km komt dit neer op 0,2M€.

De kabelverliezen kunnen op eenzelfde wijze berekend worden als bij AC-kabels. Merk op dat er geen verliezen zijn in het scherm omdat een DC-stroom geen stromen induceert in naburige geleiders. Voor een verbinding van 75km komt dit neer op 36 GWh/jaar op ± 500 kV (4 circuits).

Tellen we de verliezen van een 3GW VSC-conversiestation daarbij op, dan komen we op 16M€/jaar.

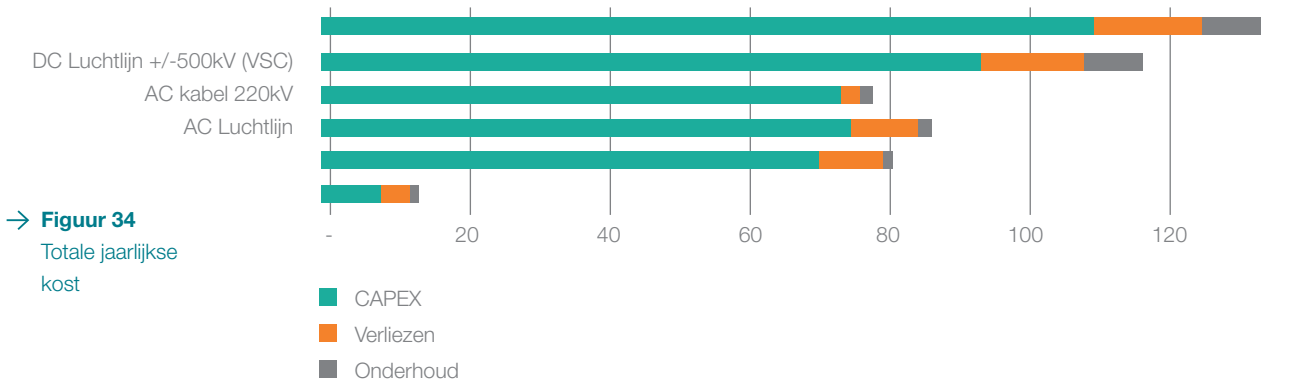
7.3 TOTALE ANNUÏTEIT

De totale annuïteit is de kost die jaarlijks betaald moet worden, enerzijds voor onderhoud & verliezen en anderzijds als vergoeding voor de investering. Onderstaande figuur vat deze totale kosten voor investering, onderhoud & verliezen samen voor de verscheidene technologieën, toegepast op een verbinding van 75 km.

De AC-luchtlijn oplossing is met een annuïteit van 13M€ veruit de goedkoopste totaaloplossing dankzij een combinatie van de laagste investeringskost, de kleinste verliezen en laagste kosten voor onderhoud.

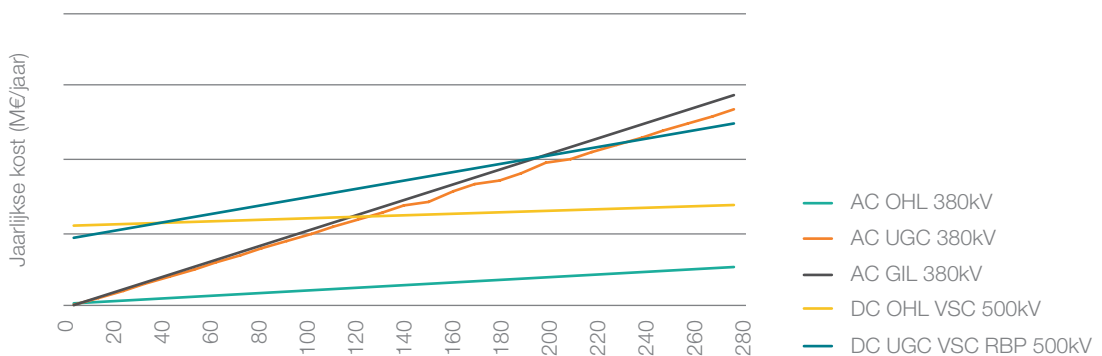
Alle andere technologieën zijn merkkelijk duurder en leveren annuïteiten op die in grootte-orde 5 tot 10 keer meer bedragen dan bij de AC-luchtlijn en dus tot ~100 M€ meer elk jaar gedurende een periode van tientallen jaren. Dit is in de eerste plaats te wijten aan de grotere investeringskosten van de andere technologieën. Bij DC-technologieën tellen bovendien de jaarlijkse kosten voor onderhoud en netverliezen zwaar door (alleen al de netverliezen voor de DC-technologie zijn groter dan de totale annuïteit van de AC-luchtlijn).

JAARLIJKSE KOST



→ **Figuur 34**
Totale jaarlijkse kost

→ **Figuur 35**
Prijs in functie van verbinding



Merk op dat we voor de prijs van de verliezen slechts 60€/MWh hebben genomen, waar de voorspellingen tussen 50€/MWh en 90€/MWh zijn. Indien de prijzen naar 90€/MWh zouden gaan maakt dit, op de GIL oplossing na, de kloof met de AC-luchtlijn enkel groter.

De prijsverhouding tussen de verschillende technologieën hangt af van de lengte van de verbinding. Onderstaande grafiek geeft de prijs in functie van de lengte van de verbinding. Voor zeer lange verbinding wordt zowel bovengronds als ondergronds een DC-verbinding goedkoper dan de AC-oplossingen. Er is echter grote afstand nodig om de hoge investeringskost van de conversiestations terug te verdienen. (+/- 200km ondergronds en +/-1700km bovengronds in onze case) Voor afstanden tussen 50 en 100km (en zelfs meer) blijven de conclusies uit dit hoofdstuk dus geldig.⁷⁶

⁷⁶

In sommige gevallen is DC de enig mogelijke oplossing en daardoor wordt DC soms ook gebruikt voor kortere afstanden.



VIA

Impact op milieu & omgeving

8.1 | Grondinname tijdens & na de werken

8.1.1 | AC-technologie

8.1.2 | DC-technologie

8.1.3 | Overzicht

8.2.2 | DC-technologie

8.3 | Geluid

8.3.1 | AC-technologie

8.3.2 | DC-technologie

8.4 | Magnetische velden

8.4.1 | AC-technologie

8.4.2 | DC-technologie

8.5 | Broeikasgasemissies

8.5.1 | Elektrische verliezen

8.5.2 | SF₆

VIII

Impact op milieu & omgeving

8.1 GRONDINNAME TIJDENS & NA DE WERKEN

8.1.1 AC-technologie

8.1.1.1 Luchtlijn

Tijdens de realisatiefase zal er een werfzone worden ingericht van ongeveer 50 m x 50 m om de masten te kunnen opbouwen. Er dienen ook toegangswegen voorzien te worden. Op bepaalde locaties zullen ook nog bijkomende werfzones zijn voor het trekken van de geleiders in het verlengde van de verbinding. Dit is uiteraard alleen tijdelijk.

→ Na de realisatiefase

Na de realisatiefase zal een lijnmast 44 m² in beslag nemen; voor buismasten zal dit iets beperkter zijn. Rondom de masten zijn landbouwwerkzaamheden wel nog steeds mogelijk.

De luchtlijn dient uiteraard aangesloten te worden op een onderstation om de stroom verder te kunnen transporteren. Indien er geen onderstation is waarop de bijkomende capaciteit beschikbaar is dient een nieuw onderstation gebouwd te worden. Een standaard onderstation omvat

ongeveer 8 ha. Bij de uitbreiding van een bestaande post zal er ongeveer 1 ha bijkomende ruimte nodig zijn voor het plaatsen van 2 aankomstvelden. Voor het voorgestelde traject zijn er 3 onderstations nodig. Bovendien zijn er ook nog bijkomende elementen nodig, zoals een phase shifter transformer (PST). De extra oppervlakte die nodig is voor een PST per uiteinde, is ongeveer 0,3 ha.

8.1.1.2 Kabel

→ Tijdens de realisatiefase

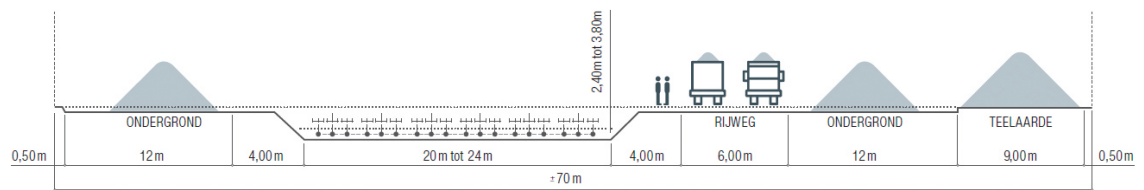
Rekening houdende met feit dat de vereiste capaciteit 6 GW bedraagt, impliceert dit de plaatsing van een ondergronds tracé bestaande uit 18 kabels, verdeeld over 6 draadstellen (3 fasen per stel). Tussen elke kabel is een tussenruimte van 1 meter nodig om onderlinge opwarming te vermijden, waardoor de werfzone, inclusief stockageplaatsen voor de verschillende soorten grond (ondergrond, teelaarde), toegangsweg en werkzone ongeveer 70 m breed is (zie figuur 37).

Indien er een gefaseerde plaatsing zou zijn van de circuits (3 draadstellen plaatsen en dichtgraven voor men aan de volgende 3 begint), dan nog zal de werfzone minstens 55m breed moeten zijn, vermits er geen aarde gestockeerd mag worden op de kabels die reeds in dienst zijn. Dit zou immers kunnen leiden tot een verlies van transportcapaciteit door de hogere isolatie met de extra aardlaag, waardoor de warmteafvoer verslechtert.

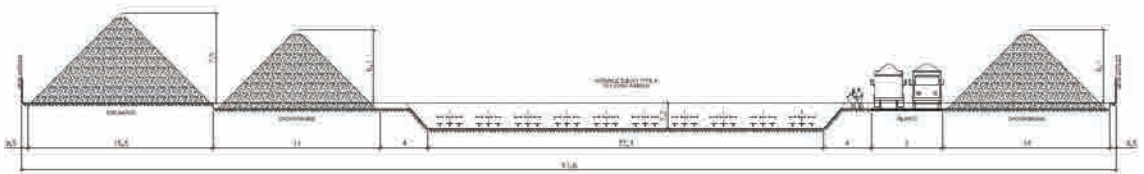
Indien er een ondergrondse 220 kV kabel bestaande uit 10 draadstellen (3 fasen per stel) wordt geplaatst, zal de sleufbreedte 30 tot 40 m bedragen (tussenafstand 1 m) en de werfzone +/-100 m, door de grote-

↓ **Figuur 36**
Voorbeeld van een werfzone voor het trekken van geleiders





↑ **Figuur 37**
Doorsnede werfzone kabels 380kV



↑ **Figuur 38**
Doorsnede werfzone kabels 220kV

re hoeveelheid aarde die gestockeerd moet worden door de bredere sleuf (zie figuur 38).

Rekening houdend met bovenstaande cijfers, is het dus niet mogelijk om zoals bij 150kV de kabels in de openbare weg te plaatsen. Er zal echter wel een impact zijn op de openbare weg door de verschillende transporten van werfmachines en kabels (30 à 50 transporten per km sleuf).

→ Na de realisatiefase

Alle mogelijke maatregelen zullen worden genomen om de oorspronkelijke staat van het terrein zo goed mogelijk te herstellen. Zo worden de verschillende bodemlagen gescheiden afgegraven, gestockeerd en in de juiste volgorde teruggeplaatst en worden drainagesystemen hersteld. De wijziging in bodemtoestand door de laag waar de kabels in liggen en de warmte door de kabels zelf is, afhankelijk van de lokale situatie, een aandachtspunt voor het landbouwgebruik. Zo mag men geen diepwortelende gewassen meer cultiveren boven de kabelzone om schade aan de kabels te vermijden.⁷⁷

Na de werken gelden er op de strook waaronder de kabels liggen, beperkingen in de mogelijkheden voor landgebruik vermits er geen verhoging of verlaging (reliëf-

wijziging) van de bedekking boven de kabel mag gebeuren. Verder dient de kabel snel bereikbaar te zijn bij een incident waardoor er geen verharding, bebouwing, begroeiing met bomen boven de kabel aangelegd mag worden.

Zoals eerder vermeld impliceert een 380 kV kabel de bouw van shuntreactoren, tussenstations en (actieve) filters. Op een traject van 75 km (6 draadstellen) zullen in totaal 42 shuntreactoren van 130 Mvar geplaatst moeten worden. Indien we uitgaan van slechts één tussenstation waarbij alle shuntreactoren op een afzonderlijk aansluitveld worden geplaatst, zal het tus-



↑ **Figuur 39**
Zijaanzicht van een standaard 380kV-veld

⁷⁷

https://renewables-grid.eu/fileadmin/user_upload/Files_RGI/RGI_Publications/Factsheets/RGI_Factsheet_Underground_Cables_Environment.pdf

senstation bestaan uit 12 kabelvelden, 21 velden voor reactieve compensatie en 1 koppeling. De onderstations aan de uiteinden moeten voorzien worden met 6 aankomstvelden voor de kabels, 10 of 11 shuntreactoren en enkele (actieve) filters⁷⁸.

Met standaard AIS⁷⁹ velden, waarbij lucht als isolator tussen de elektrische elementen dient, komt de totale oppervlakte ongeveer op:

- Station aan uiteinde: 200 m x 500 m = 10 ha per uiteinde⁸⁰;
- Tussenstation: 200 m x 850 m = 17 ha;

→ **In totaal is er dan 2 x 10 ha + 17 ha = 37 ha nodig**

Hierbij moet opgemerkt worden dat deze oppervlakte nog geen rekening houdt met groenschermen of verloren ruimte bij een niet rechthoekige vorm van het terrein, of met de nodige oppervlakte en poststructuur voor de eventuele PST's.

De oppervlakte kan echter wel verkleind worden door het nemen van verschillende ingrepen. Hieronder wordt een oplisting gegeven maar staat niet vast of deze maatregelen in dit geval kunnen worden toegepast.

- Analooq met de GIL, kan met de velden in het tussenstation ook isoleren met SF₆ in plaats van met lucht, zoals bij AIS. Dit noemt men een GIS⁸¹ station. Het gebruik van GIS in het tussenstations laat toe om compactere aansluitvelden op te bouwen, waardoor de grondinname voor een tussenstation 4 maal kleiner kan worden. Voor de bestaande eindstations zal men echter steeds de voorkeur geven om de bestaande technologie uit te breiden.
- Het parallel plaatsen van een shuntreactor en kabel op éénzelfde aansluitveld, in plaats van een apart veld voor een kabeluiteinde en voor een shuntreactor. Zoals besproken in hoofdstuk 4.1.2 kan dit voor een deel van

de shuntreactoren. Indien we aan elke uiteinde van de kabel één shunt reactor rechtstreeks op het kabelveld plaatsen kunnen we, met één tussenstation, 24 aansluitvelden besparen (6 circuits x 2 stukken bij het opdelen via een tussenstation x 2 uiteindes geeft 24 aansluitvelden). Vooral in AIS levert dit een belangrijke plaatsbesparing op (+/-0,5 ha per aansluitveld). De oppervlaktebesparing bij een GIS veld is hier miniem, gezien de compacte structuur van GIS installaties.

Indien al deze maatregelen kunnen uitgevoerd worden, zou de nuttige oppervlakte beperkt kunnen worden tot 7 ha in de eindstations en 4 ha voor het tussenstation. Dit geeft een totale oppervlakte van 18 ha voor 2 eindstations en 1 tussenstation.

Voor de 220 kV kabeloplossing (10 draadstellen) zijn de volgende zaken nodig:

- 11 transformatoren van 600MVA, met bijhorende aansluitvelden 380kV om op de bestaande 380 kV infrastructuur te kunnen aansluiten;
- Een tussenstation 220 kV: we veronderstellen hier steeds in GIS uitvoering omdat deze installaties reeds gangbaar zijn op dit spanningsniveau. De GIS uitvoering heeft hier de voorkeur door de hoge maturiteit en beperkte grondinname.
- Shuntreactoren, inclusief aankomst op 220 kV: bij een verbinding van 75km zouden, met dezelfde redenering als op 380kV, 12 shuntreactoren 130 Mvar moeten worden geplaatst aan elk uiteinde.

Dit geeft per AIS onderstation een extra oppervlakte van ongeveer 15 ha.

78

Zoals eerder beschreven moeten een gedetailleerde studie per project het aantal en de grote bepalen.

79

AIS: Air Insulated System. De installatie wordt op isolatoren geplaatst. De omgevingslucht wordt verder gebruikt als isolatiemedium.

80

Hierbij is 2ha verondersteld voor de filters. Deze oppervlakte kan geval per geval sterk wijzigen.

81

GIS: Gas Insulated System. De installatie worden in buizen geplaatst met een isolerend gas, tot op heden meestal SF₆.

8.1.1.3 GIL

De GIL in een tunnel wordt geplaatst op een beperkte diepte (bovenkant tunnel tot op -1 m). De mogelijkheden van het grondgebruik boven de tunnel is daardoor vergelijkbaar met deze boven kabels. De breedte van de corridor is zowel tijdens de werffase als nadien vergelijkbaar is met de case van een ondergrondse DC-verbinding. De breedte van de sleuf voor de tunnel is 4,9 m en de breedte van de werfzone, inclusief stockage van de afgegraven aarde is 43,4 m.

Vermits de tunnel gekoeld wordt zal ook op regelmatige afstanden een technisch station moeten worden geplaatst voor deze koelinstallaties. Deze zijn echter beperkt in oppervlakte (ongeveer 15 m x 15 m per installatie).

8.1.1.4 PST

In het geval PST's nodig zijn, zal in één van de eindstations 1ha tot 1,5ha extra terrein nodig zijn.

8.1.2 DC-technologie

8.1.2.1 Conversiestations

Op basis van de momenteel beschikbare informatie en discussies met de belangrijkste leveranciers van HVDC omvormers kan men redelijkerwijs uitgaan van de volgende minimaal ingenomen grondoppervlakken (hierna 'grondinname') om de 2x3000 MW te converteren:

- VSC-SMP van 1500 MW op ± 320 tot ± 400 kVdc
 - 1,7-2,3 ha
- VSC-BIP van 3000 MW op ± 500 kVdc
 - 6,1-8,2 ha
- VSC-RBP
 - 4,9-6,5 ha van 3000 MW op ± 500 kVdc

Ter info: door de nood aan uitgebreide hoogspanningsfilters, zie figuur 40 en Figuur 41, is de benodigde oppervlakte voor een LCC-conversiestation ruwweg dubbel zo groot dan voor een VSC-conversiestation.

8.1.2.2 Luchtlijn

Voor een DC luchtlijn zijn dezelfde conclusies als een AC luchtlijn geldig.

8.1.2.3 Kabel

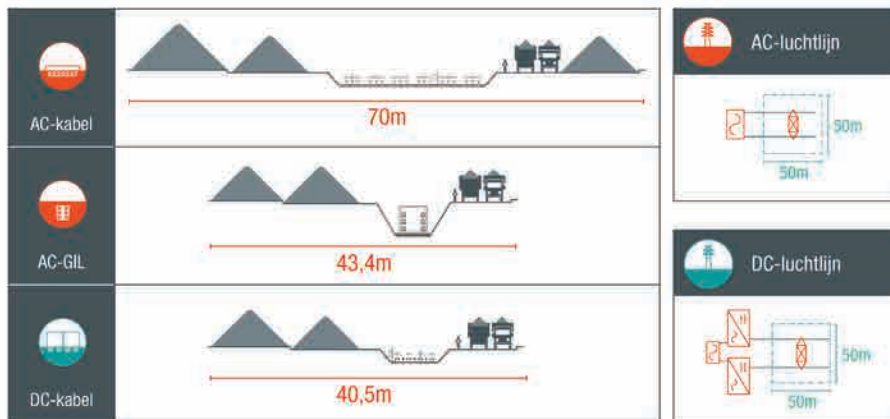
Omdat er geen inductie in de mantelschermen optreedt, kunnen DC kabels korter bij elkaar geplaatst worden zonder veel aan transmissiecapaciteit in te boeten. Ook zijn er maar twee fasen en kan op 500 kV 50% meer vermogen getransporteerd worden dan bij een 380 kV AC kabel. Hierdoor zijn 4 x 2 kabels nodig. Dit alles zorgt voor een beduidende smallere corridor.

Elke DC-circuit (2 DC-kabels, positieve pool en negatieve pool), heeft een sleufbreedte van ongeveer 1 meter. Erreur: source de la référence non trouvée. Om te vermijden dat bij graafwerken door derden meerdere sets kabels gezamenlijk worden beschadigd, worden mechanische beschermingen (bvb betonblokken) tussen de sets geplaatst. In totaal is een strook van 6 m voldoende voor de 4 sets DC-kabels (8 kabels in totaal). Tijdens de werffase zal de werkzone ook versmald kunnen worden tot ongeveer 40,5 m ten opzichte van 70 m brede 380 kV AC-kabel oplossing, zie figuur 38.

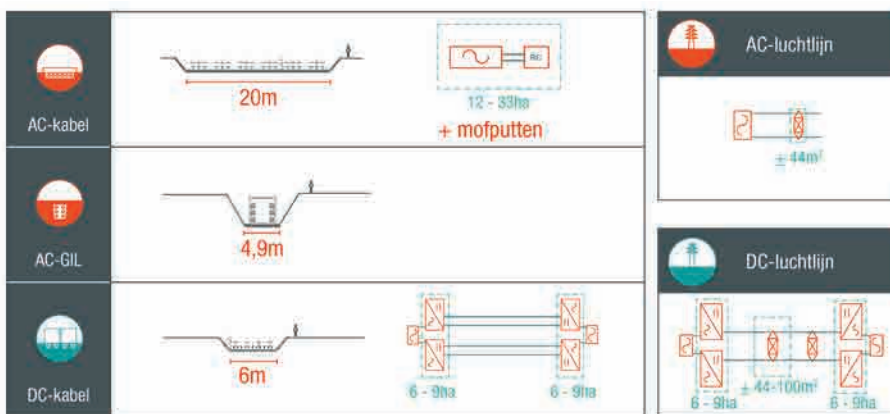
Doordat DC kabels ook geen capacitief vermogen genereren, is er voor lange verbindingen ook geen reactieve compensatie nodig en zijn tussenstations dus overbodig.

8.1.3 Overzicht

Hieronder wordt er een overzicht gegeven van de breedtes per technologie tijdens en na de realisatiefase.



→ **Figuur 40**
Breedtes van de werfzones



→ **Figuur 41**
Grondinname van de sleuven of masten

8.2 VISUELE IMPACT

8.2.1 AC-technologie

8.2.1.1 Luchtlijn

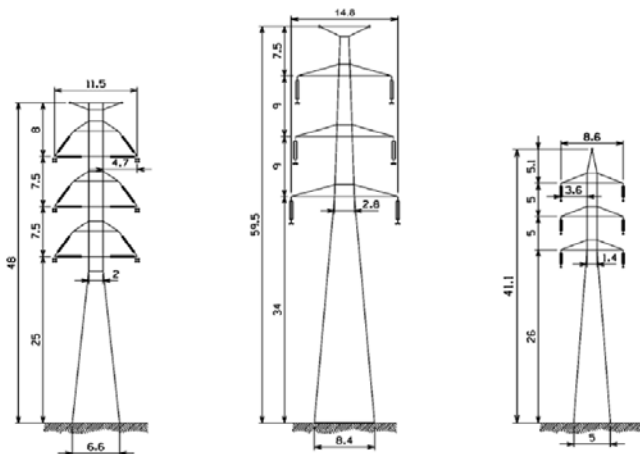
Een belangrijk aandachtspunt van de luchtlijn is de visuele impact. Er kunnen mitigerende maatregelen worden genomen, zoals de hoogspanningslijn bundelen met andere hoogspanningslijnen (zie hieronder), op de plaats van een oude lijn bouwen, parallel met andere infrastructuur plaatsen (bv. een autosnelweg) of de layout van de masten wijzigen (compacter, lager, “esthetischer”,...). Zo leunt de omvang van de compacte 380kV masten dicht aan de omvang van een 150kV mast dan aan een klassieke 380kV mast t (zie hieronder).

In functie van de precieze locatie en hoogte van de masten dienen er op de geleiders bebakeningsbollen (figuur 43) of op de masten lichten te worden geplaatst of masten geschilderd te worden als gevolg van de wetgeving met betrekking tot het lucht-

verkeer volgens Circulaire CIR-GDF03. Aan de kruising van snelwegen dienen lokaal signalatiebollen geplaatst te worden.

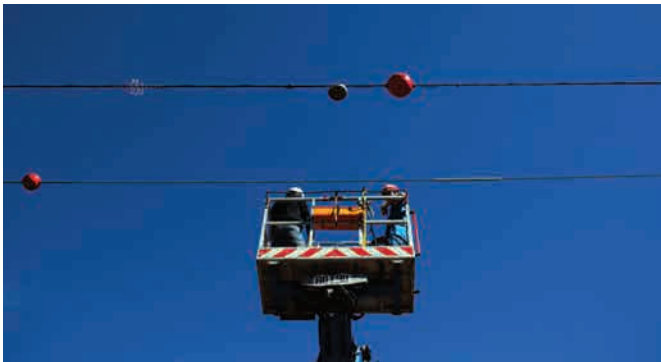
Naast het mastontwerp wordt ook ingezet op een landschappelijke integratie door tracés te zoeken met zo weinig mogelijk bochten. Enerzijds zijn rechte lijnen visueel minder storend en anderzijds beperkt dit het gebruik van visueel zwaardere en grotere hoekmasten, zie 4-5. Daarnaast kan men ook investeren in de realisatie van groenschermen. Bij plaatsing van groenelementen op grotere afstand is een inpassing van de masten in het landschap mogelijk. Verdere informatie over de visuele impact van masten wordt besproken in de studie over nieuwe mastconcepten.

Rondom de hoogspanningslijn dient er wel een “veiligheids corridor” te worden ingesteld dewelke afhankelijk is van de doorhang van de geleiders, hun uitzwaai gabarit en de te respecteren veiligheidsafstanden. Een corridor impliceert dat er binnen deze



↑ **Figuur 42**

Schema van een 380kV-compacte mast met 2 circuits (links) naast een klassieke 380kV-mast (midden) en een klassieke 150kV-mast (rechts)

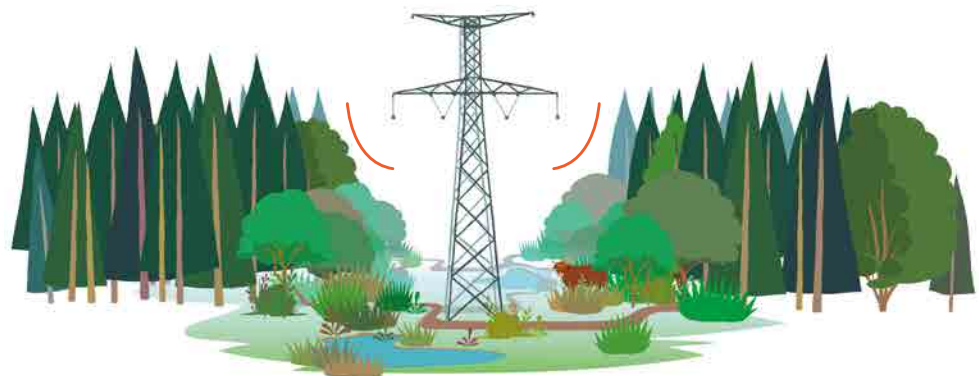


↑ **Figuur 43**

Plaatsing van bebakeningsballen (bron: RTE)

→ **Figuur 44**

Voorstelling van de veiligheids-corridor rond een geleider



veiligheidszone geen enkel object mag zijn dewelke de hoogspanningslijn mag raken. Elia tracht deze corridors op een ecologische manier uit te baten⁸².

8.2.1.2 Kabel

Na de realisatie zal de kabel niet meer zichtbaar zijn, uitgezonderd de inspectieputten waar de kabels aan elkaar gelast zijn om de verbinding te beheren en te onderhouden. Elke kilometer is er een set van inspectieputten nodig. Deze komen ongeveer een halve meter boven de begane grond, worden zo dicht mogelijk tegen de rand van de percelen geplaatst en worden omheind.

In aanvulling zullen de shuntreactoren, de filters en de tussenstations ook een visuele impact hebben.

Indien de kabel geplaatst wordt in bosrijk gebied zullen er zich op het tracé van de kabel geen bomen meer bevinden. Aangezien diepwortelende gewassen de kabel kunnen beschadigen, is zulke aanplanting verboden in de kabelzone. Deze kan tot 20 m breed zijn (zie figuur 40), exclusief een toegangszone langs weerszijden. Tijdens de realisatiefase worden alle gewassen binnen de werfzone (figuur 44) gekapt, waardoor er over een breedte tot 70 m gedurende enkele jaren geen hoge gewassen meer te zien zullen zijn.

82

www.life-elia.eu



↑ **Figuur 45**
Simulatie van een conversiestation



↑ **Figuur 46**
3D-model van een conversiestation

8.2.1.3 GIL

Een GIL installatie is zoals een kabel niet zichtbaar, uitgezonderd de koelinstallaties voor de koeling van de tunnel (zie Hoofdstuk Ondergronds.). Deze koelinstallaties bevinden zich in kleine gebouwen langs het tracé van de GIL. De tussenafstand tussen deze koelinstallaties ligt op dit moment niet vast, maar wordt ingeschat op 1 kilometer.

Ook zoals bij een kabel zijn bij een GIL snoeiwerken nodig tijdens de realisatiefase (tot 44 m), en zal er na de realisatiefase een corridor van minstens 5 m overblijven waarop er geen diepwortelende gewassen mogen groeien.

8.2.2 DC-technologie

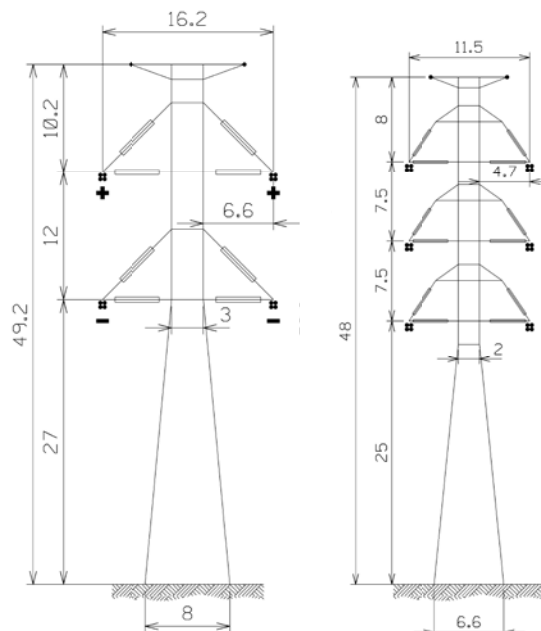
8.2.2.1 Conversiestation

De visuele impact van een conversiestation is beperkt tot de visuele impact van een groot gebouw of loods. De grootte van het gebouw is afhankelijk van de benodigde oppervlakte voor de gekozen conversietechnologie (zie vorige paragraaf).

Door middel van het plaatsen van groenelementen is een inpassing van het gebouw in het landschap mogelijk.

8.2.2.2 Luchtlijn

De visuele impact van een AC luchtlijn en een DC luchtlijn is gelijkaardig, behalve dat het aantal geleiders, en dus het aantal mastarmen op een mast, lager is bij een DC luchtlijn (2 x 2 geleiderbundels) dan bij een AC luchtlijn (2 x 3 geleiderbundels).



↑ **Figuur 47**
HVDC 500kV-luchtlijn met 2 draadstellen op compacte mast naast AC 380kV-luchtlijn op compacte mast

8.2.2.3 Kabel

Bij een DC kabel zijn er, net zoals een AC kabel, inspectieputten nodig, en geldt er een beperking op diepwortelende gewassen in de buurt van het tracé. Bij een DC kabel is er echter geen reactieve compensatie nodig, waardoor er geen nood is aan tussenstations en shunt reactors langs het tracé.

8.3 GELUID

8.3.1 AC-technologie

8.3.1.1 Luchtlijn

De opbouw van de geleiders heeft een impact op het geluidsniveau dat een luchtlijn kan produceren. Dit is afhankelijk van het aantal subgeleiders (aantal geleiders in een bundel) en hun diameter. Zo daalt het geluid indien er meer en dikkere subgeleiders worden gebruikt. De geleider dient te voldoen aan de geldende normen EN50341 en de normen uit regionale milieuwetgeving.

Dus indien er een hoogspanningslijn gebouwd wordt met het type geleider 4x707 AMS-2Z met 32,4 mm diameter ligt het geluidsniveau met 45dB(A)⁸³ duidelijk onder het wettelijk vastgelegde niveau van 53 dB(A) volgens Belgische Normative Aspects EN50341 "Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV" (2012).

8.3.1.2 Kabel

Bij het plaatsen van een groot aantal shuntreactoren op één site mag de geluidsproblematiek niet onderschat worden. Omwille van zijn constructie heeft een shuntreactor +10 dB extra geluidsvermogen in vergelijking met een transformator met een equivalente capaciteit, hetgeen neerkomt op zo'n 90dB(A) voor een shuntreactor van 130Mvar. In de 220kV variant zijn ook grote transformatoren nodig waarbij het geluid ook bijna 90dB(A) bereikt per stuk. Tot slot produceren ook de filters geluid. Dit geluid hangt af van de omstandigheden, maar

kan 90dB(A) tot zelfs 100dB(A) bedragen.

Er zijn een aantal maatregelen mogelijk om dit geluid te mitigeren, zoals geluidsschermen, maar dit heeft zijn limieten. De eind- en tussenstations zijn daarom niet geschikt voor gebieden met strenge geluidsnormen.

8.3.1.3 GIL

Het geluid bij een GIL installatie wordt geproduceerd door de ventilatie en de koeling van de tunnel. Een standaard industriële luchtkoelinstallatie produceert een geluidsniveau tussen 80 en 90 dB(A). Ook komen op de uiteinden een beperkt aantal shuntreactoren (in totaal 3 voor onze case). Het naleven van de geluidsnormen is dus moeilijker dan bij een luchtlijn en zal meer maatregelen zoals geluidsschermen vergen.

8.3.2 DC-technologie

8.3.2.1 Conversiestation

Het DC-conversiestation telt twee belangrijke geluidsbronnen⁸⁴:

- De transformatoren: bij een symmetrische monopool is dit te vergelijken met een AC-transformator van hetzelfde vermogen. Bij een bipool neemt het geluid zelfs toe.
- Koelinstallaties: de hoge energieverliezen in een conversiestation moeten afgevoerd worden om de vermogens-elektronica niet te oververhitten. Hiervoor is een omvangrijke koelinstallatie nodig. Een batterij buiten opgestelde ventilatoren zijn hierbij nodig om de warmte af te staan aan de omgevingslucht.

Er zijn een aantal maatregelen mogelijk om dit geluid te mitigeren, zoals geluidsschermen, maar dit heeft zijn limieten. Conversiestations zijn daarom niet geschikt voor gebieden met strenge geluidsnormen.

⁸³ Gemeten bij vochtige weersomstandigheden.

⁸⁴ In de veronderstelling dat geen hoogspanningsfilters nodig zijn.

8.3.2.2 Luchtlijn

Het totale geluidsniveau van een DC luchtlijn is vergelijkbaar met het geluidsniveau van een AC luchtlijn. Een DC-lijn produceert bij droge weersomstandigheden meer geluid, terwijl de 380kV AC-lijn meer geluid bij vochtig weer produceert (max. 53 dB(A)). De positieve pool bij een DC-luchtlijn geeft meer geluid dan de negatieve pool. Bij andere TSO's wordt de limiet van 40-42 dB(A) (Cigré TB388) gehanteerd op de grens van de corridor. Deze limiet zal mee de configuratie bepalen (aantal geleiders in een bundel en de diameter van de geleiders).

Bij gebrek aan wetgeving voor DC-luchtlijnen baseren we ons op de richtwaarden die opgenomen zijn in de Belgische NNA's van de Europese Norm EN50341 voor het ontwerp van de AC-luchtlijnen van meer dan 1 kV. Het geluid moet hierbij in twee weersomstandigheden nagekeken/gemeten worden:

- Vochtige weersomstandigheden: max. 53 dB(A) op 20 m van de dichtste geleider
- Droge weersomstandigheden: max. 40 dB(A) 2 m boven de grond in woongebieden

In tegenstelling tot AC-luchtlijnen is het geluid bij DC het hoogst bij (langdurig) droog weer⁸⁵, waardoor deze norm veel moeilijker te behalen is. Met de masten en hun bijhorende geleiders voorgesteld in §Luchtlijn, zal de 40 dB(A) limiet gehaald worden op 30 m van de as van de luchtlijn. Dit betekent dat in een corridor van 60 m geen woongebieden zijn toegestaan.

In Vlaanderen gelden bovendien de VLA-REM II richtwaarden voor geluid in open lucht.⁸⁶ In "Agrarisch gebied" (waar deze luchtlijnen meestal worden geplaatst) moet het geluid's nachts beperkt worden tot 35 dB(A), ook net onder de luchtlijn. Voor "Landelijk gebied" of "Gebied voor verblijfsrecreatie" zijn de richtwaarden zelfs 5 dB(A) strenger.

Ofwel is een afwijking nodig van de VLA-REM II richtwaarden, ofwel dient de opbouw van de mast gewijzigd te worden. Dit kan door:

- Afstanden te vergroten tussen de geleiders. Dit kan bijvoorbeeld door voor een klassiek mastsilhouet te kiezen in plaats van een compacte mast.
- De uitbatingsspanning te verlagen.
- De sectie van de geleiders te verhogen en/of het aantal geleiders in een bundel te vermeerderen.

De ±320kV-variant op een klassieke mast (zoals de complexe mast) zal dus het meest geschikt zijn om deze richtlijnen te kunnen halen. Zeker bij VSC zullen de (bundel-) geleiders bovendien overgedimensioneerd moeten worden.

8.3.2.3 Kabel

Aangezien er bij een DC-kabel geen extra shuntreactoren vereist zijn, is de geluidsproductie langs het tracé nihil.

8.4 MAGNETISCHE VELDEN

8.4.1 AC-technologie

8.4.1.1 Luchtlijn

Rond elektrische toestellen en netten voor het transport en de distributie van elektriciteit worden door de wisselende velden in spanning en stroom (zoals de naam van AC het definieert: alternating current) elektrische en magnetische velden gegenereerd. Deze velden worden gekenmerkt door hun frequentie (50 Hz) en hun intensiteit. Een elektrisch veld wordt gegenereerd door de aanwezigheid van elektrische ladingen terwijl een magnetisch veld opgewekt wordt door de verplaatsing van deze elektrische ladingen. Het magneetveld van een bovengrondse lijn is, in eerste benadering, evenredig met de sterkte van de stroom die er doorvloeit; het hangt af van de geometrische opstelling van de geleiders.

85

Vuil stapelt zich in dit geval op de geleider, wat meer corona-geluid creëert.

86

De beschreven meetmethode is lichtjes verschillend van deze van de Belgische en Europese norm.

ders, neemt toe met de onderlinge afstand tussen de geleiders zelf, en neemt af met de afstand tot de lijn.

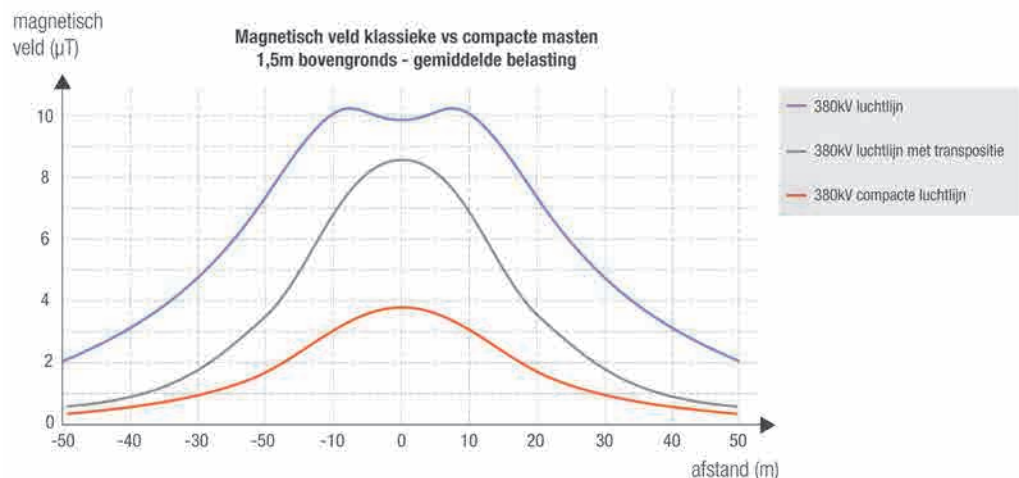
Het maximaal elektrisch veld dat onder een bovengrondse hoogspanningslijn aanwezig is, is in eerste benadering evenredig met de spanning van de lijn en omgekeerd evenredig met de afstand tussen de onderste geleider en de grond.

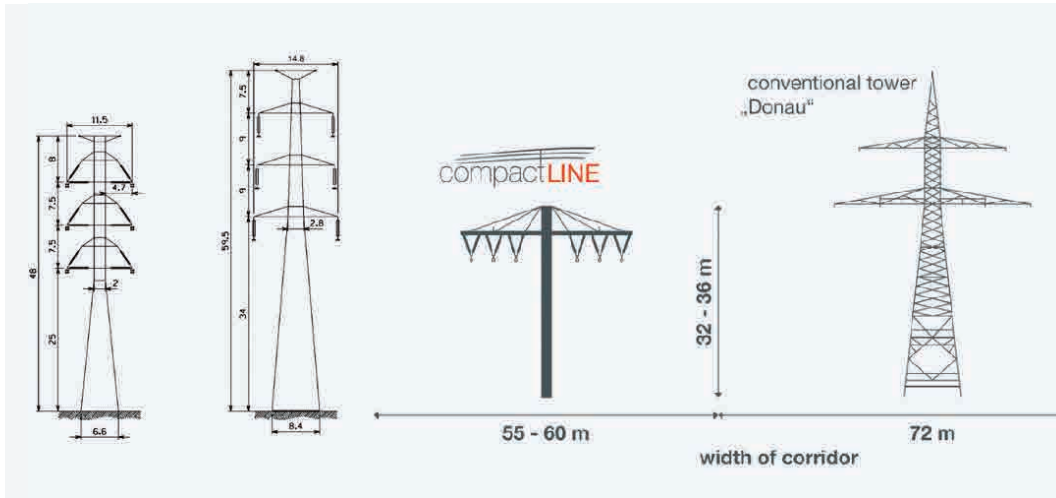
De sterkte van de magnetische velden in de omgeving van de hoogspanningsverbindingen wordt behalve de afstand tot de geleiders ook bepaald door de schikking van de fasen (hoe de drie geleiders geplaatst worden). Door de fasen op een bepaalde manier te schikken (faseschikking of transpositie) kunnen de magnetische velden verlaagd worden. Bij de nieuwe hoogspanningslijnen met 2 draadstellen wordt dit standaard toegepast. Het type geleider dat bij de nieuwe lijnen in het kader van het nieuwe project gebruikt kan worden, zal geen invloed hebben op de magnetische velden. De stromen die nodig zijn voor een capaciteit van 3GW zijn immers onafhankelijk van het type geleider (HTLS of 4 x 707 AMS-2Z), en zijn hetzelfde voor alle types.

Bij compacte masten, zoals gebruikt bij het Stevin-project, is de afstand tussen de geleiders onderling een stuk kleiner dan bij het klassieke mastontwerp, hierdoor wordt het effect van transpositie nog verstrekt, wat uiteindelijk resulteert in een magnetische invloedzone die 3 keer kleiner is. Figuur 50 illustreert het profiel van het magnetisch veld (veldsterkte in functie van de afstand tot de as van de lijn) voor verschillende types van mastconfiguraties met een dubbel draadstel

Ook de configuratie van de geleiders heeft een invloed. We onderscheiden drie basisconfiguraties: verticaal (zoals compacte masten), horizontaal en in driehoek, zoals de Donauconfiguratie.

→ **Figuur 48**
Magnetisch veld van klassieke vs compacte masten 380kV





↑ **Figuur 49**

Verschillende types van mastconfiguraties

Van links naar rechts: compact, klassiek, horizontaal, Donau

De laagste (maximum) waarde wordt bereikt indien aan beide zijden de drie fasen in driehoek worden geplaatst ("Donau").
 Erreur : source de la référence non trouvée

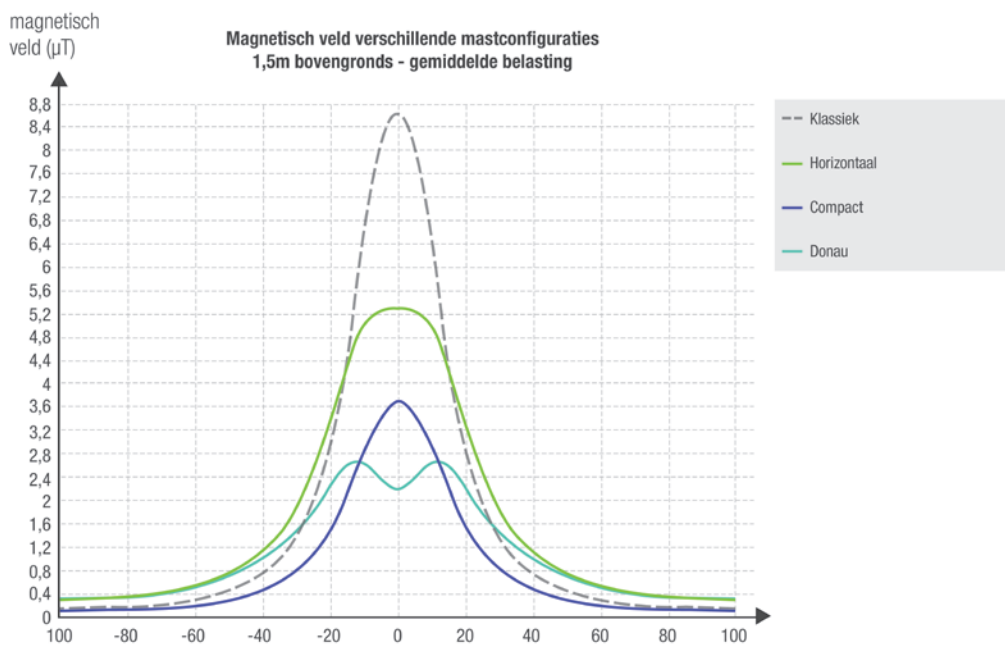
Ten opzichte van de horizontale configuratie zullen de andere configuraties in figuur 49 een lagere intensiteit van de magnetische veldsterkte opwekken op een grotere afstand van de lijn. Een horizontale confi-

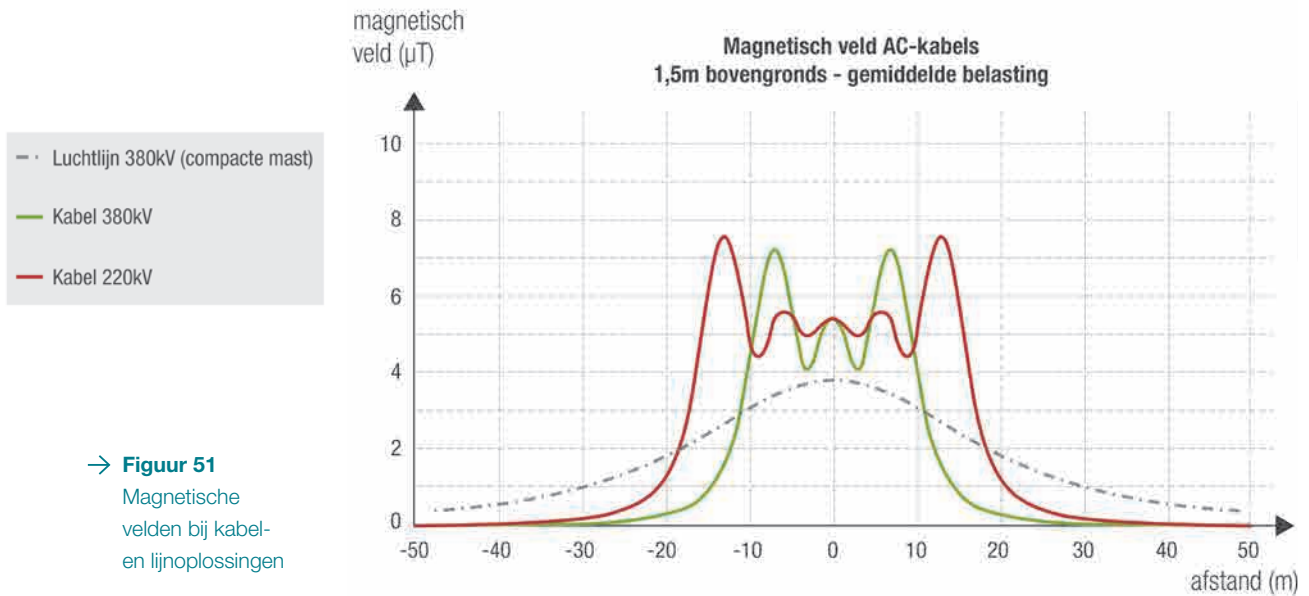
guratie heeft een piek die is hoger dan bij de compacte configuratie en velden dalen slechts even traag als de Donau-configuratie.

Er zal een afweging moeten worden gemaakt tussen de totale hoogte van de mast en de grootte van de intensiteit van de magnetische velden naast de lijn.

→ **Figuur 50**

Magnetische velden bij verschillende mastconfiguraties





→ **Figuur 51**
Magnetische velden bij kabel- en lijnoplossingen

8.4.1.2 Kabel

Zowel een kabel als een lijn genereren magnetische velden, maar ondergrondse kabels genereren geen elektrische velden omdat deze velden worden tegengehouden door de geaarde mantel van de kabel. Het magnetisch veld dat door een ondergrondse kabelverbinding opgewekt wordt, hangt in principe alleen af van de stroom die er door vloeit en de opstelling van de geleiders. De opstelling zelf hangt af van hun relatieve onderlinge positie. Hoe kleiner de afstand tussen de assen van de vermogensgeleiders is, hoe zwakker het gegenereerde magneetveld zal zijn. Daarnaast verschilt het magnetisch veldprofiel van een bovengrondse hoogspanningsverbinding duidelijk met een ondergrondse verbinding.

Om het transportvermogen van een kabel evenwel te optimaliseren, worden de verschillende fasen van een kabel op een zekere afstand horizontaal uit elkaar geplaatst. Als de 380kV kabels in klaverbladconfiguratie (tegen elkaar) geplaatst zouden worden, zou de onderlinge opwarming te groot worden, waardoor de transportcapaciteit sterk afneemt. Een tussenafstand van 1 m zorgt ervoor dat er voldoende tussenruimte is voor de evacuatie van de warmte in de grond.

⁸⁷ Deze oplossing werd niet weerhouden omdat hiermee kan de gevraagde 6,6 GVA niet bereikt kan worden.

Deze laatste opstelling is, wat het opgewekt magnetisch veld betreft, minder gunstig dan de klaverbladopstelling, aangezien de magnetische velden minder goed gecompenseerd worden dan bij een plaatsing tegen elkaar in driehoek, zoals gebruikelijk voor lagere vermogens. In figuur 51 is een fictieve variant toegevoegd van de 220kV-oplossing⁸⁷, waarbij de kabels in driehoek zijn geplaatst (rode lijn, type A) in plaats van vlak (donkerrode lijn, nappe). Deze driehoeks- of klaverbladconfiguratie blijft echter fictief omdat de hierdoor opgewekte warmte rond te kabels te groot zou zijn om de gewenste transportcapaciteit van de kabels te behouden.

Ook bevinden de kabels zich op slechts één tot enkele meters onder de grond, terwijl een luchtlijn zich op het laagste punt een tiental meters boven de grond bevindt. Hierdoor is voor een 380kV-kabeloplossing (groene lijn) de grootte van het veld op grondniveau een stuk hoger dan bij een compacte luchtlijn (paarse lijn). De magnetische velden dalen wel veel sneller bij de kabeloplossing naarmate men verder verwijderd is van het centrum van de lijn- of kabelverbinding.

Magnetische velden zijn evenredig met de elektrische stroom. De spanning heeft geen rechtstreekse invloed op deze velden. Op

220kV is de totale elektrische stroom voor een zelfde vermogen bijna 1,8 keer hoger. In onze case vertaalt zich dat naar extra pieken in figuur 51 (vier extra circuits) en de hoogste piek is bovendien 7% hoger. Een 380 kV kabelverbinding heeft dus een gunstiger profiel voor het magnetisch veld dan een 220 kV kabelverbinding (lagere pieken, minder pieken en smallere corridor).

8.4.1.3 GIL

Circulatiestromen zijn vrij mogelijk in de aluminium behuizing van de GIL. Deze genereren een tegengesteld magnetisch veld aan dat van de stroom door de geleider. Er zijn daarom nauwelijks elektromagnetische velden rond een GIL.

8.4.2 DC-technologie

Enkel een continu magnetisch veld wordt opgewekt, vergelijkbaar met het magnetisch veld van de aarde.

8.5 BROEIKASGASEMISSIES

8.5.1 Elektrische verliezen

Zoals vermeld in de beschrijving van de criteria, wordt er rekening gehouden met een uitstoot over de levensduur van een verbinding van 100g CO₂ per kWh. Bij het transporteren van energie door de installaties zal een deel van de energie verloren gaan door warmteverliezen. In de economische analyse hebben we reeds de elektrische verliezen bepaald. Op basis van deze verliezen kan de uitstoot van de verbinding berekend worden. De resultaten van deze berekening worden hieronder gegeven.

	AC	DC
Luchtlijn	6,5	23-24
Kabel	16	25-26
GIL	47	—

↓ Tabel 8

CO₂-uitstoot voor de verbinding (in 1000 ton CO₂/jaar voor een verbinding van 75km)

8.5.2 SF₆

Een GIL is gevuld met 80% CO₂ en 20% SF₆. In normale omstandigheden komen deze gassen niet in de atmosfeer terecht, doordat de buizen hermetisch afgesloten zijn van de buitenwereld. Men mag echter het risico van het gebruik van SF₆ niet onderschatten, aangezien het aardopwarmingsvermogen of GWP (Global Warming Potential) van dit gas 22.800 keer hoger ligt dan dat van CO₂.

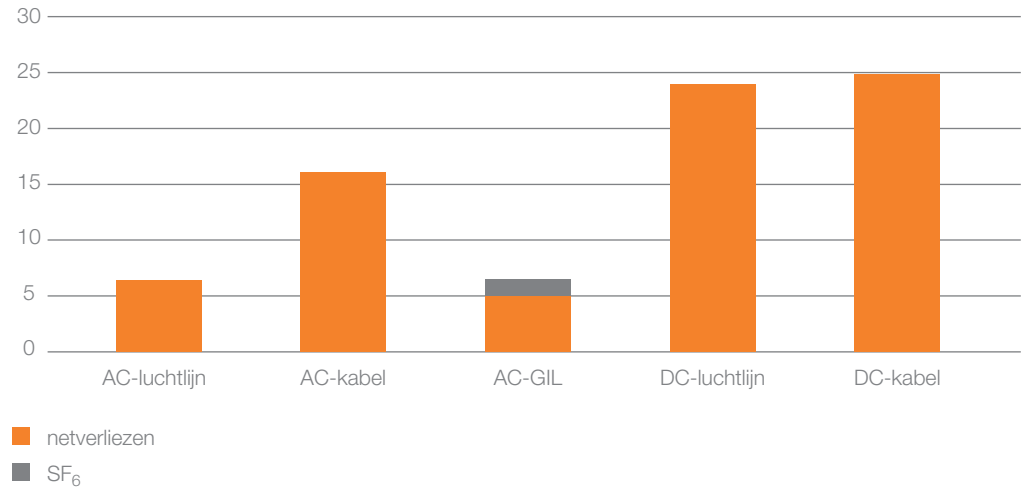
Rekening houdend met het volume van de buizen, bevat 1km systeem naar schatting 5 ton SF₆. Dit betekent 750 ton SF₆ voor een dubbel systeem van 75 km of een equivalent van 17 miljoen ton CO₂.

Ondanks dat de buizen van de GIL aan elkaar gelast worden, is een beperkt lekpercentage onvermijdelijk. Indien we dit lekpercentage schatten op <0,01%, komt dit neer op een equivalente CO₂-uitstoot van 1700 ton per jaar, hetgeen ongeveer één derde is van de uitstoot door verliezen.

Ook andere elektrische installaties kunnen SF₆ bevatten, zoals bijvoorbeeld GIS. Het volume SF₆ hiervan is echter verwaarloosbaar in deze vergelijking.

→ **Figuur 52**
 Overzicht van de verschillende broeikasgasemissies van de verschillende technologieën

BROEIKASEMISSIES (1000 TON CO₂ EQUIVALENT / JAAR)



Tegenwoordig zijn er op de markt alternatieven voor SF₆ beschikbaar. De enige GIL-fabrikant, Siemens, zou ook een SF₆-vrije oplossing bestuderen, maar tot op heden hebben we geen garantie dat dit op de markt zal komen en wanneer. Zelfs als dit over enkele jaren op de markt zou komen, is het wenselijk om eerst een pilootproject uit te voeren alvorens dit te gebruiken voor lange verbindingen in de backbone van Elia, waardoor dit te laat zal komen voor onze use case.

Ter informatie: General Electric biedt momenteel op 380kV een GIB aan met de alternatieve gasmengeling "g³". Hiermee ligt de equivalente hoeveelheid CO₂ meer dan 10 keer lager. De verbindingen zijn evenwel niet gelast, waardoor het lekpercentage veel hoger ligt, typisch rond 0,1% per jaar. De uitstoot zal hierdoor van dezelfde grootteorde zijn als onze schattingen voor de GIL met SF₆.



IX

380-19

Hybride systemen

- 9.1 | Technologie voor plaatselijk ondergronds brengen van AC-luchtlijn
 - 9.1.1 | DC-kabels
 - 9.1.2 | AC-GIL
 - 9.1.3 | 220kV-kabels
 - 9.1.4 | 380kV-kabels
- 9.2 | Afstand van de ondergrondse AC-kabelverbinding
 - 9.2.1 | Beperkt overgangsstation
 - 9.2.2 | Volledig overgangsstation
 - 9.2.3 | Hoeveel keer ondergronds?
- 9.3 | Conclusie

IX

Hybride systemen

In de vorige hoofdstukken bestudeerden we de technologie voor de volledige use case. Daaruit bleek dat de AC-luchtlijn zowel technisch als economisch de enige technologie is die geschikt is voor de volledige verbinding. Er is echter een evolutie bij AC-luchtlijnen nl. dat bepaalde delen van de verbinding ondergronds gebracht kunnen worden. Bij het ondergronds brengen van de AC-technologie dient er echter wel rekening gehouden met enkele belangrijke technische factoren die een impact zullen hebben op de maximale lengte voor het ondergronds brengen. Uiteraard spelen ook economische aspecten alsook een impact op de omgeving.

In dit hoofdstuk wordt een antwoord geboden op verschillende vragen die zich stellen wanneer men spreekt over het ondergronds brengen van een AC-luchtlijn, meer bepaald:

- met welke technologie wordt er ondergronds gegaan;
- wat is de maximale afstand om ondergronds te brengen bij de use case;
- hoeveel keer kan er ondergronds gegaan worden?

Deze vragen worden hieronder geanalyseerd op basis van een technische analyse maar ook het economische aspect alsook de impact op het milieu en de omgeving worden toegelicht.

9.1 TECHNOLOGIE VOOR PLAATSELIJK ONDERGRONDS BRENGEN VAN AC-LUCHTLIJN

Er zijn drie technologieën die we in overweging kunnen nemen om voor beperkte lengtes ondergronds te gaan: DC-kabels, AC-GIL en AC-kabels. Hieronder volgt de beschrijving van de combinatie van de AC-luchtlijn met elk van deze technologieën.

9.1.1 DC-kabels

In theorie kan men een AC-luchtlijn laten overgaan naar een DC-kabel. Uit voorgaande hoofdstukken is gebleken dat de meeste bezwaren rond de DC-technologie verband houden met de conversiestations en dit zowel technologisch, economisch als naar milieu en omgeving toe. Deze conversiestations blijven in deze oplossing bestaan. Plaatselijk ondergronds gaan met DC-kabels is dus niet zinvol.

9.1.2 AC-GIL

De ervaring met GIL is zeer beperkt, ook voor korte lengtes. Er zijn slechts enkele projecten en deze gaan tot lengtes van +/- 1km. Ook blijft het feit dat slechts één leverancier deze technologie kan leveren. De use case heeft echter betrekking op onze backbone en het is dan ook niet wenselijk om risico's te nemen door niet mature technologieën, met potentieel langdurige onbeschikbaarheid, in deze verbinding te integreren. AC-GIL wordt bijgevolg ook niet geschikt geacht voor gebruik binnen de use case.

→ **Figuur 53**
Overgangsstation
Gezelle in Brugge



9.1.3 220kV-kabels

Het gebruik van korte kabelstukken 220kV is niet zinvol omdat dan telkens aan beide zijden een omvangrijk transformatiestation nodig is. Net zoals voor de conversiestations bij DC-kabels is ook aan deze transformatiestations de grootste technische, economische en omgevingsimpact gelinkt.

9.1.4 380kV-kabels

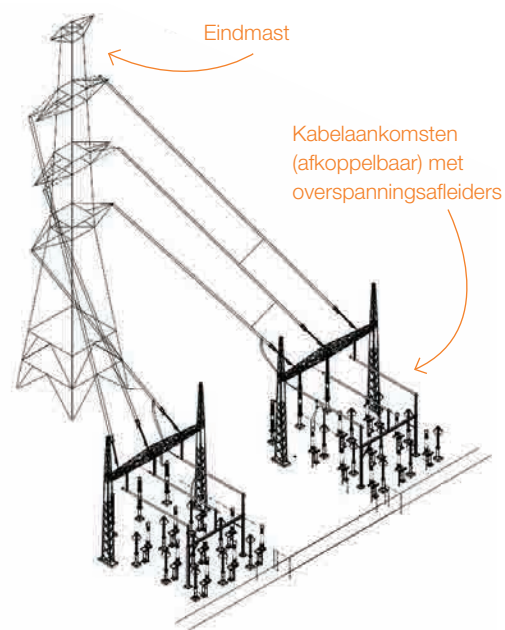
In vergelijking met de voorgaande alternatieven zijn 380kV-kabels de beste technologie om plaatselijk ondergronds te gaan. Ze kunnen echter maar voor een beperkte lengte gebruikt worden. Dit zal in de volgende paragraaf verder worden uitgeduid.

9.2 AFSTAND VAN DE ONDERGRONDSE AC-KABELVERBINDING

Op de plaats van de overgang van een bovengrondse naar een ondergrondse hoogspanningsverbinding is een overgangsstation nodig. Dit kan een beperkt overgangsstation zijn, waarbij de elektrische toestellen tot een minimum worden beperkt, of een volledig overgangsstation, waarbij elke luchtlijn en elk kabel circuit afzonderlijk schakelbaar is. De oplossing met een beperkt en een volledig overgangsstation wordt hieronder geanalyseerd volgens de gekende criteria nl. technisch, economisch en impact op milieu en omgeving.

9.2.1 Beperkt overgangsstation

In dit geval worden telkens drie kabelcircuits rechtstreeks met één draadstel van de luchtlijn verbonden zonder dat ertussen schakelmaterieel wordt geplaatst. Er ontstaan zo twee verbindingen van eindstation tot eindstation van elks 3GW. De belangrijkste elementen zijn de eindmast alsook de structuren voor de lijnafdeling en een beperkt aantal hoogspanningstoestellen. Onderstaande figuur toont een concreet ontwerp.



↓ **Figuur 54**
Ontwerp van overgangsstation

→ Technisch

Doordat telkens drie kabelcircuits vast verbonden zijn met een draadstel van de luchtlijn, kan de verbinding nog steeds als één verbinding worden beschouwd alsook worden beheerd. Hierdoor is de **complexiteit** in normale uitbating **gelijkaardig aan deze van een gewone luchtlijn**.

Naar **betrouwbaarheid** blijft het aantal falingen per kilometer kabeltraject ongewijzigd. Bij het verlies van een verbinding zal dit zoals bij de luchtlijn 3GW zijn en zal bovendien het aantal dagen dat het kabelgedeelte onbeschikbaar is met een factor 3 omhoog gaan. Dit kan gedeeltelijk gemitigeerd worden door de afzonderlijke kabels, zoals voorzien in het ontwerp op figuur 54.

Met betrekking tot de **maturiteit** stellen we vast dat er een (beperkte) ervaring is met luchtlijnen met korte kabellengtes tot ongeveer twee maal 40km circuitlengte⁸⁸.

→ Economisch

Vanuit **economisch** standpunt gezien is de kost voor een beperkt overgangsstation zeer beperkt (grootte-orde een paar M€). Belangrijker is de kost per kilometer ondergronds kabeltraject. Inclusief de reactieve compensatie bedraagt deze 14,4M€ per kilometer tegenover 1,8M€ voor de luchtlijn, ofwel een meerkost van 12,6M€ per kilometer.

→ Impact op de omgeving

De impact op de **grondinname** is ook beperkter dan bij een volledig overgangsstation en is beperkt tot ongeveer een halve hectare (exclusief eindmast) langs elke zijde.

→ Maximale afstand ondergronds

Om de afstand te bepalen voor het ondergronds brengen van de verbinding dienen verschillende technische aspecten in rekening te worden gebracht.

Bij het **berekenen van resonanties** dienen ondergrondse delen in het naburige

net in rekening te worden gebracht. Van zodra er meer ondergrondse delen zijn, wordt het ook steeds moeilijker om de resonanties te berekenen en te voorspellen. Voor de use case moet rekening gehouden worden met de 40km technische kabellengte van de Stevin-verbinding en de verschillende 220kV offshore kabels naar de windmolenparken op de zee.

De **spanning** zal ook onder controle moeten worden gehouden bij het ondergronds brengen van de verbinding. Het 380kV-net kan spanningen aan tot maximaal 420kV en indien de spanning boven 420kV komt, kan er een doorslag (kortsluiting) ontstaan in de hoogspanningstoestellen. Momenteel bereiken we in het Elia-net regelmatig spanningen van 410kV en soms zelfs meer. De spanningsstijging over een verbinding mag daarom **nooit meer dan 10kV bedragen** (aan het begin van de verbinding is de spanning lager dan op het einde en het verschil mag niet meer dan 10kV zijn) en zelfs dan zullen in sommige gevallen maatregelen genomen moeten worden om de spanning te laten dalen.

Bij het inschakelen van een verbinding met daarin de sets van kabels zullen er **spanningssprongen** plaatsvinden alsook **spanningsstijgingen** wanneer er slechts één zijde is ingeschakeld. Interne berekeningen hebben aangetoond dat voor verbindingen tussen 50km en 100km, het ondergronds gedeelte **moet beperkt blijven tot een totaal van maximaal 8km trajectlengte per use case** wat overeenkomt met **48km circuitlengte** om in alle gevallen de spanningsstijging te kunnen beperken tot 10kV.

Spanningssprongen kunnen beperkt worden door shuntreactoren rechtstreeks op de lijn te plaatsen. Zoals geschreven in §4.1.2 kan maar 80% van de kabel rechtstreeks op de verbinding gecompenseerd worden. Dit moet ook gelden indien één kabel *of verbinding* is afgekoppeld voor een herstelling. Hierdoor zullen we in ons geval slechts iets meer dan 50% kunnen

88

Circuitlengte : totale lengte van alle circuits. Bijvoorbeeld: een traject van 1 km met 6 parallelle circuits geeft 6 km circuitlengte.

compenseren. Dit is bij een verbinding van 50 tot 100km met 8km ondergrondse kabels voldoende om de spanningssprongen te beperken tot onder de strengste limieten (<3%).

In de eindstations zullen nog steeds een aantal shuntreactoren moeten worden geplaatst, pro rata de lengte die ondergronds wordt geplaatst. Bij 8km ondergronds zal aan elk uiteinde van elke verbinding een shuntreactor van 75Mvar rechtstreeks op elk uiteinde van de verbinding moeten worden geplaatst. Bovendien zal in elk eindstation ook een shuntreactor van 130Mvar op een afzonderlijk schakelveld moeten worden geplaatst.

Door het kabeltraject te beperken tot maximaal 8km wordt ook het risico van de resonanties beperkt tot een aanvaardbaar niveau. Niettemin zullen er echter voor elk concreet geval een aantal studies uitgevoerd moeten worden om de haalbaarheid te bevestigen, waarbij ook de ondergrondse delen in het omliggende net in rekening moet worden gebracht.

Bovendien zal aandacht moeten geschonken worden aan de wisselwerking tussen de (capacitieve) kabels en de (inductieve) luchtlijn en shuntreactoren. Dit zal onder andere een impact hebben op de beveiliging van de verbinding. Sommige beveiligingsrelais⁸⁹ zullen namelijk niet correct werken.

Rekening houdend met de technische limieten en risico's is **een kabeltraject tot maximum 8km in totaal per use case** mogelijk. Toch zullen er in dit geval nog steeds grote technische vraagtekens blijven die in detail onderzocht moeten worden. In vergelijking met de Stevin-verbinding waarbij in totaal 40km kabelcircuit ondergronds werd gebracht (over een afstand van 10km) zou dit voor elke use case een totaal van 48km ondergrondse kabel impliceren (nl. 6 circuits x 8km) over een totale afstand van 8km.

9.2.2 Volledig overgangsstation

Indien het ondergrondse deel van de verbinding een bepaalde lengte overschrijdt, dient er een overgangsstation geplaatst te worden, zodat elk kabelcircuit afzonderlijk in en uitgeschakeld kan worden. De spanningsstijging over de kabel, hetgeen de limiterende factor was in vorige paragraaf, gaat hierdoor minder snel.

Wel stijgt hierdoor de complexiteit sterk en voegen we veel extra onderdelen toe aan het systeem met elk een kans op falen.

Om de effecten in verband met resonanties te analyseren, moet niet enkel naar de verbinding zelf gekeken worden maar ook naar het omliggende net. Indien we de maximale lengte ondergronds uit vorige paragraaf (8km) toepassen op beide projecten beschreven in hoofdstuk 3, geeft dit reeds 48km circuitlengte per project. In de buurt van deze projecten bevindt zich ook de 40km circuitlengte van de Stevin-as en enkele 220kV offshore kabelverbindingen naar de windmolenparken. Hiermee komen we reeds tot boven het gebied met ervaring uit. Er is geen enkele maturiteit voor nog langere kabellengtes (gerekend in circuitlengte). Dat is de enige reden waarom we volledige overgangsstations zouden bouwen. Doordat in de overgangsstations elk element afzonderlijk kan in- of uitgeschakeld worden, zijn er bijkomend zeer veel combinaties van inductieve en capacitieve stromen mogelijk waardoor de resonanties quasi onmogelijk te voorspellen worden en de risico's nog verder worden verhoogd.

Vanuit **economisch** standpunt dient er voor elk bijkomend onderstation ook een kost van 15M€ te worden voorzien. Vermits er telkens 2 onderstations nodig zijn, betekent dit per keer dat er ondergronds gedaan wordt een **meerkost** van ongeveer **30M€**. Net als bij de beperkte onderstations komt daarboven de meerkost van kabels ten opzichte van een luchtlijn (12,7M€ per kilometer).

89

Met name de afstandsbeveiliging

Naar impact op **milieu en omgeving** stellen we vast dat het onderstation voor de use case ongeveer **4 à 5ha** in beslag zal nemen⁹⁰. Dit is dan opnieuw te vermenigvuldigen met twee vermits we langs beide kanten een onderstation moeten plaatsen.

Tot op heden is er maar **één AC-verbinding** waarbij voor de overgang van luchtlijn naar kabel met volledige onderstations gewerkt wordt, nl. de Stevin-verbinding. In dat specifiek geval kon men het aantal parallele kabelcircuits terugbrengen van zes naar vier, hetgeen de verschillende nadelen van een volledig onderstations compenseerde. Dit voordeel gaat echter niet op in onze use case.

Zowel technisch, economisch als naar de omgeving toe hebben volledige overgangsstations een negatieve impact ten opzichte van beperkte overgangsstations. Bovendien is er geen ervaring met meer ondergrondse kabels (gerekend in circuitlengte) dan wat mogelijk is met beperkte overgangsstations, hetgeen de enige reden was waarom we volledige overgangsstations zouden plaatsen.

Gelet op de bovenstaande argumenten leidt dit tot de conclusie dat er geen reden is om met volledige onderstations te werken voor de use case.

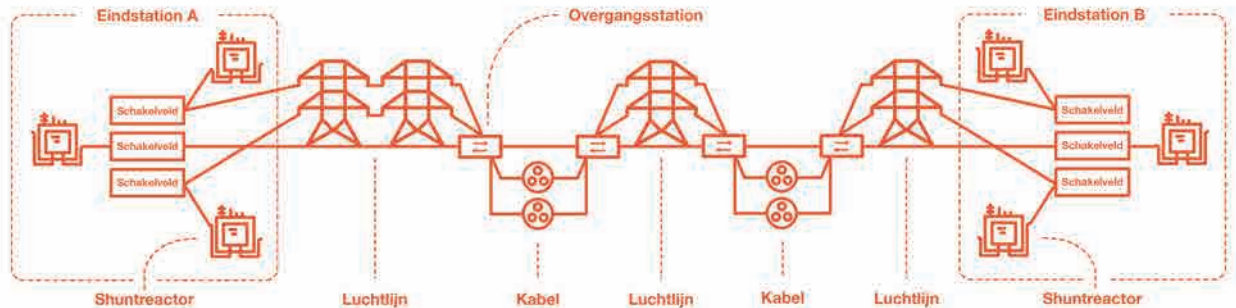
9.2.3 Hoeveel keer ondergronds?

Hierboven wordt gesteld dat het totale kabeltraject maximaal 8km per use case is. Dit kan één keer 8km zijn maar er is ook een mogelijkheid dat de 8km opgedeeld wordt. Er dient echter wel benadrukt te worden dat elke keer men ondergronds gaat er wel een lijn-kabel-transitie gerealiseerd moet worden wat de kans op een falen steeds verhoogt.

Vanuit technisch standpunt is het dus te verkiezen om het aantal keer ondergrondse verbindingen te beperken tot 1 of maximaal 2 voor elke use case.

90

Dit wordt zelfs een twintigtal hectares indien we AIS-materieel gebruiken.



↑ **Figuur 55**
Maximale
mogelijke
ondergrondse
oplossing

9.3 CONCLUSIE

Een luchtlijn met een beperkt gedeelte uitgevoerd in AC-kabel is technisch mogelijk, maar niet wenselijk binnen de backbone van het 380kV net. Met elke kilometer die ondergronds wordt geplaatst stijgt namelijk het aantal falingen, het risico op resonanties en de kostprijs.

Rekening houdend met de technische limieten en risico's is **een kabeltraject tot maximum 8km in totaal per use case** mogelijk. Indien toch stukken ondergrondse kabels wenselijk zijn, is het sterk aan te raden om zich te beperken tot een luchtlijn met 1 of maximaal 2 korte kabelstukken, waarbij geen tussenstations nodig zijn.

De maximumlengte die ondergronds kan, zal steeds moeten gevalideerd worden aan de hand van een aantal studies waarbij ook AC-kabels in het naburige net mee in beschouwing moeten genomen worden.

Onderstaande figuur geeft schematisch de maximale oplossing weer.



Conclusie

De technologiestudie geeft een overzicht van technologieën die vandaag bestaan en bestudeert hun toepasbaarheid voor de use cases (“Ventilus” of “Boucle du Hainaut”) aan de hand van technische en economische criteria. Ook de impact ervan op het milieu en de omgeving wordt beschreven.

Uit de analyse komt duidelijk naar voor dat niet alle bestaande technologieën toepasbaar zijn op de use case. De AC-luchtlijn zowel technisch als economisch **de enige redelijke technologie is voor deze verbindingen**. Op de technische criteria scoort deze technologie goed: een hoge maturiteit alsook betrouw- en beschikbaarheid en eenvoudig te integreren in het bestaande Belgische maar ook Europese elektriciteitsnet. Verder biedt deze technologie ook de nodige flexibiliteit om toekomstige noden in te vullen zoals ondersteuning van de lokale elektriciteitsnetten voor lokale groei en aansluiting van decentrale productie. Bijkomend brengt deze gekende technologie ook weinig bijkomende risico's met zich mee voor de efficiënte en veilige uitbating van het elektriciteitsnet. Ook op economisch vlak scoort de AC-luchtlijn met groot verschil het best, zowel naar onderhouds- en investeringskosten. Er is weliswaar een impact op het milieu en de omgeving en het visuele aspect speelt hierbij een belangrijke rol.

Naast de AC-luchtlijn wordt ook de AC-kabel geanalyseerd voor het volledige traject. Op basis van de technische criteria (maturiteit en impact op netuitbating) is deze technologie technisch niet haalbaar voor de use case. Er is tot op heden geen kennis voorhanden over hoe deze kabels zich zullen gedragen in het elektriciteitsnet en zodoende kan hier een stabiele uitbating van het net niet gegarandeerd worden.

Verder worden de DC-technologieën beschreven. Uit analyse blijkt dat deze niet geschikt zijn voor de beschouwde verbindingen omwille van verschillende redenen: risico's op netfenomenen, een lagere be-

schikbaarheid, te weinig flexibiliteit om aftakkingen (o.a. verbindingen met lokale netten) te realiseren. Naast het technische aspect is er ook nog de kostprijs die ongeveer 10 keer hoger ligt dan deze van de AC-luchtlijn. Er dient bij een DC-technologie ook een aanzienlijke oppervlakte te worden voorzien voor de conversiestations.

Ook worden de GIL en de supergeleiders geanalyseerd en dit zowel in AC- en DC-uitvoering. Deze technologieën staan echter nog in de kinderschoenen. Het is niet verantwoord om voor de belangrijkste verbindingen van het land een niet mature technologie toe te passen waarover vandaag nog een zeer beperkte kennis is.

Voor de **volledige verbinding** is het dus duidelijk dat de **enige redelijke technologie een AC-luchtlijn** is, ook indien PST's moeten bijgeplaatst worden om een beperkte sturing van de stromen mogelijk te maken. Het **ondergronds brengen** van een deel van de AC-luchtlijn **kan** met AC-kabels met **extra technische risico's** en een belangrijke **meerkost** (12,6M€/km + overgangsstations). De AC-kabels hebben ook een **impact op milieu en omgeving**, meer bepaald wegens geluid (shunt reactoren) en grondinname.

De afstand bij gedeeltelijke verkabeling wordt bepaald door technische limieten die gebaseerd zijn aan de spanningsstijgingen die beperkt moeten worden en de beheersbaarheid van neteffecten (dynamische effecten of resonanties). De combinatie hiervan leidt tot een afstand van 8km geografische trajectlengte equivalent aan 48km kabelcircuit per use case. Het is immers het aantal effectieve km kabel dat ondergronds wordt geplaatst dat bepalend is voor het gedrag van de kabel in het elektriciteitsnet. De 8km ondergronds wordt best zo weinig mogelijk opgesplitst en in één tot twee keer per use case gerealiseerd om een verhoogde faalkans te vermijden.



XI

Lijst met afkortingen

- **AC**
Alternating Current – wisselstroom
- **AIS**
Air Insulated System
- **AREI**
Algemeen Reglement op Elektrische Installaties - vastgelegd door het koninklijk besluit van 10 maart 1981.
- **DC**
Direct Current – gelijkstroom
- **GIB**
Gas Insulated Bus duct
- **GIL**
Gas Insulated Line
- **GIS**
Gas Insulated Switchgear
- **GWP**
Global Warming Potential
- **LCC**
Line Commutated Converter
- **PST**
Phase Shifting Transformer
- **VSC**
Voltage Source Converter
- **XLPE**
Cross-linked of vernette polyethyleen

