



# Impact van het 20 kV beleid van Liander op de netverliezen in het middenspanningsnet

23-12-2015

Auteur: Martin Buitink

Begeleiders: Martijn van der Eerden en Lianne Saes



## Samenvatting

Liander is belast met onderhoud en aanleg van het elektriciteitsnet en is daarmee verantwoordelijk voor een betrouwbaar net. Een groot deel van het net, vooral in Noord-Holland, heeft een 150/50/10/0,4 kV structuur. Dus de stroom wordt getransporteerd via verschillende spanningsniveaus. In 2007 is er een onderzoek geweest of een 20 kV net qua installatiekosten beter is dan een 50/10 kV net. Hieruit volgde het 20 kV-beleid, welke in 2015 wordt geëvalueerd. In dit verslag zal gekeken worden naar wat 20 kV-beleid doet met de netverliezen. Netverliezen zijn voor Alliander belangrijk omdat dit een grote kostenpost is. Daarnaast is het voor het streven naar een duurzaam bedrijf goed om de netverliezen te minimaliseren. In het verslag zal eerst besproken wat de energieverliezen in het net zijn. Daarna zal een model uitgewerkt worden die een 50/10 kV net vergelijkt met een 20 kV net. Verder zal het model toegepast worden op het elektriciteitsnet in Anklaar. Tevens zullen alle aannames van het model besproken worden.

Vervangen van 50 kV naar 20 kV zorgt voor meer netverliezen, het vervangen van 10 kV naar 20 kV zorgt voor minder netverliezen. Uit het onderzoek komt naar voren dat de verhouding van wanneer dit elkaar precies opheft onafhankelijk is van de het gevraagde vermogen.

De belangrijkste conclusie is dat 50 kV vervangen door 20 kV een grotere negatieve impact heeft op de netverliezen dan de positieve impact van vervangen van 10 kV naar 20 kV. Dit komt doordat in het 10 kV net de afgaande velden zit, waardoor er per streng minder vermogen loopt, zodat het verschil tussen 10 en 20 kV minder groot is. Terwijl in de parallelle kabels het gehele vermogen getransporteerd moet worden. Doordat in de 20 kV situatie minder transformatoren zitten wordt het extra verlies van de parallel kabels grotendeels gecompenseerd.

## Inhoudsopgave

Samenvatting .....	i
1. Inleiding.....	1
2. Netverliezen .....	2
2.1 Ohmse verliezen .....	2
2.2 Diëlektrisch verlies .....	3
2.3 Energieverlies in transformatoren .....	3
3. Model .....	4
3.1 Parallelkabels .....	5
3.2 Afgaande velden .....	5
3.3 Transformatoren .....	5
4. Uitwerking model.....	6
4.1 Netverliezen parallelkabels.....	6
4.2 Netverliezen afgaande velden tot de eerste MSR .....	7
4.3 Energieverlies achter eerste MSR.....	7
5. Verhouding verschil in netverlies van parallelkabels ten op zichte van verschil in netverlies van de afgaande velden.....	9
6. Onevenredige verdeling over de afgaande velden.....	11
6.1 Netverlies tot de eerste MSR .....	11
6.2 Netverlies na de eerste MSR.....	12
7. Case Anklaar.....	13
7.1 Energieverlies bij evenredige verdeling over afgaande velden .....	13
7.2 Energieverlies in transformatoren.....	14
7.3 Energieverlies totaal systeem met evenredige verdeling over de strengen .....	15
7.4 Netverliezen onevenredig.....	16
7.5 Energieverlies totaal systeem met onevenredige verdeling over de strengen .....	17
8. Discussie.....	19
9. Conclusie .....	21
10. Referenties.....	22

## 1. Inleiding

Liander is belast met verzorgen van een betrouwbaar elektriciteitslevering aan een groot gedeelte van Nederland. Een belangrijke taak is, naast het aanleggen van nieuwe netten, de instandhouding van het huidige netwerk. Veel oude componenten in dat netwerk zijn ruim een halve eeuw oud en staan op de planning om vervangen te worden.

Binnen Alliander is er in 2007 een studie gedaan naar de toekomst van het 50kV net ten noorden van Haarlem. De aanleiding hiervoor was dat dit netwerk voor namelijk is uitgevoerd met oliedrukkabels en olie-gevulde installaties [1]. Studies [2, 3] hadden laten zien dat wanneer het 50 kV net vervangen wordt, de investeringskosten lager liggen wanneer er niet een 50 kV maar een 20 kV net gelegd wordt. Na aanleiding hiervan is het 20 kV beleid ontstaan. De studie ging uit van een 150/50/10kV netstructuur dat via een 150/20/10kV tussenfase uiteindelijk naar een 150/20kV netstructuur wordt omgebouwd.

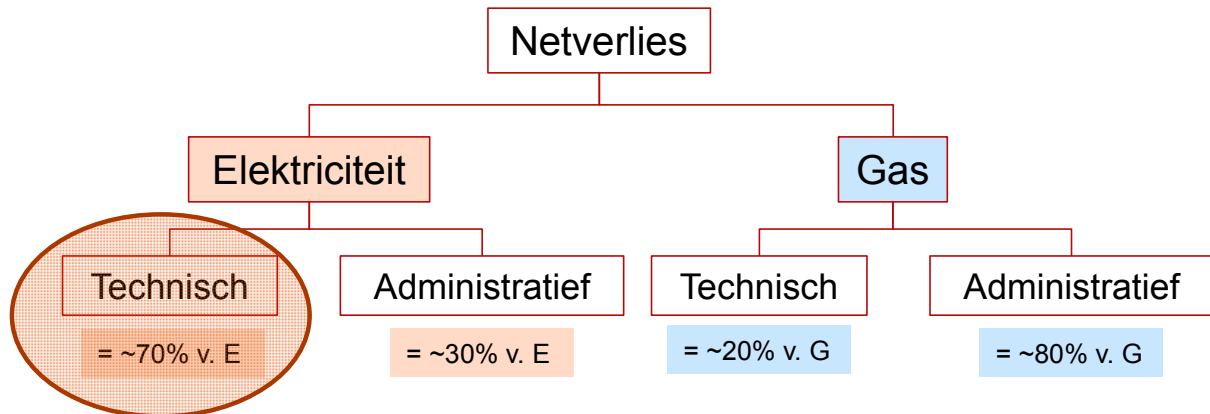
Redenen om naar een 20kV net te willen gaan is dat hierdoor het net ook wordt gestandaardiseerd. Standaardiseren heeft als voordeel dat je minder verschillende onderdelen hebt, wat kosten bespaart door opslag, verder wordt het ook voor monteurs makkelijker, ze hebben minder verschillende materialen nodig en in de opleiding hoeven minder verschillende situaties geleerd te worden.[4] Nu wordt het beleid geëvalueerd omdat er nieuwe prijsontwikkelingen zijn en nieuwe inzichten in de energie transitie. [1]

De laatste jaren is de aandacht voor duurzaamheid flink gegroeid. Binnen Liander is de doelstelling uitgesproken dat over 5 jaar de tijd de CO<sub>2</sub>-footprint structureel met 20 kiloton gedaald moet zijn. Om die reden wordt bekeken wat de impact van het 20 kV beleid is op de technische netverliezen en dus CO<sub>2</sub> uitstoot. Dit verslag beschrijft netverlies berekeningen en het model dat daarvoor ontwikkeld is.

Doordat het elektriciteitsnet in het Liander voorzieningsgebied vele verschillende standaarden heeft gekend in de historie, en vanwege gebiedsverschillen, zijn er bij het opstellen van het model aannames gemaakt. Deze zijn gedaan op basis van beleidsstukken, algemene informatie en interviews met kennisdragers binnen Liander.

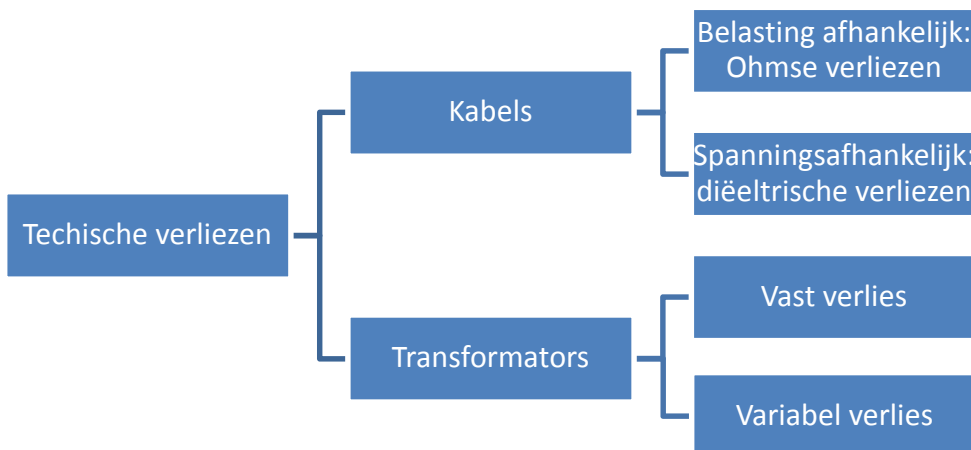
## 2. Netverliezen

In het elektriciteitsnet wordt gemeten hoeveel elektriciteit er ingevoerd wordt en hoeveel er gebruikt wordt door de gebruikers. Er wordt altijd meer ingevoerd dan er door de klanten verbruikt. Dit heeft verschillende oorzaken. Zo raakt een deel verloren door het transport en heeft dus een technische oorzaak, maar er is ook deel wat een administratieve reden heeft, zie Fig. 1. Binnen Alliander wordt gezegd dat 70 procent van de netverliezen technische verliezen zijn en de rest administratieve. Onder de administratieve verliezen valt bijvoorbeeld stroom die illegaal wordt



Figuur 1: Netverliezen Alliander [5]

afgetapt of bij verhuizingen waar wel energie gebruikt wordt maar nog niet betaald. De technische verliezen zitten vooral in het energieverlies door transport over kabels en lijnen, welke onderverdeeld kunnen worden in belasting afhankelijke verliezen en spanningsafhankelijke verliezen. In de transformatoren is er vast verlies en energie verlies die afhankelijk is van het te transformeren vermogen. Zie ook Fig. 2. In de volgende paragrafen zullen deze netverliezen nader toegelicht worden.



Figuur 2: Technische verliezen zitten in verschillende onderdelen

### 2.1 Ohmse verliezen

Het grootste verlies in de kabels is de warmte ontwikkeling en wordt ook wel Ohmse verliezen genoemd. Het energieverlies in de kabels is:

$$E_v = I^2 R, \quad (1)$$

waar  $I$  de stroomsterkte is en  $R$  de weerstand. De stroomsterkte is ook als volgt te schrijven:

$$I = \frac{S}{U}, \quad (2)$$

waarin  $S$  het schijnvermogen is en  $U$  de spanning. Verder kan de weerstand ook geschreven worden als:

$$R = \frac{\rho l}{A}, \quad (3)$$

waar  $\rho$  de elektrische resistiviteit is,  $l$  de lengte en  $A$  is het oppervlak van de doorsnede van de kabel is. De elektrische resistiviteit is materiaal specifieke eigenschap en hangt ook af van de temperatuur. Koper en aluminium zijn de meest gebruikte geleiders aangezien deze een lage resistiviteit hebben en relatief goedkoop zijn.

Vergelijking 1, 2 en 3 combineren geeft dat het energieverlies in een kabel gelijk is aan:

$$E_v = \left(\frac{S}{U}\right)^2 \frac{\rho l}{A}. \quad (4)$$

## 2.2 Diëlektrisch verlies

Daarnaast is er ook nog het diëlektrisch verlies. Het diëlektrische verlies is het energieverlies wat wordt veroorzaakt door het wisselende elektrische veld in de isolatie. Deze is onafhankelijk van de stroom door de kabel maar wel afhankelijk van de spanning op de kabel en wordt daarom ook wel spanningsafhankelijk verlies genoemd:

$$E_v = 2\pi f C U^2 \tan \delta, \quad (5)$$

Hier is  $f$  de frequentie van het net, welke 50 Hz is.  $C$  is de capaciteit van de kabel per kilometer.  $U$  is de spanning en  $\tan \delta$  de verlieshoek. De verlieshoek geeft de hoek aan tussen de spanning en de stroomsterkte in het diëlektricum en neemt toe bij een stijgende temperatuur. [6]. De waarde van de verlieshoek is 0.0004 aldus het data bestand 'types' van Phase to Phase [7]. De diëlektrische verliezen zijn veel kleiner dan de Ohmse verliezen en kunnen daarom verwaarloosd worden. De diëlektrische verliezen zijn in de orde grootte van enkelen tientallen Watts per kilometer. Aan het eind van een streng zou het een rol kunnen spelen aangezien hier de Ohmse verliezen dezelfde orde grootte hebben. In de rest van het systeem heeft het weinig invloed, hier is het namelijk 1 procent van het energieverlies. Voor het gehele systeem zal het dan ook verwaarloosbaar zijn.

## 2.3 Energieverlies in transformatoren

De energie verliezen in de transformatoren zijn afhankelijk van de belasting en hebben een constant verlies. De energieverliezen in de transformator zijn als volgt:

$$E_{v,trafo} = P_0 + P_k * \left(\frac{S}{S_{nom}}\right)^2, \quad (6)$$

waarin  $P_0$  de verliezen in de transformator zijn zonder belasting, ook wel de kernverliezen genoemd.  $P_k$  is het kortsluitverlies, ook wel koperverlies genoemd. Dit is de warmte die vrijkomt door het getransporteerde vermogen.  $S$  is het vermogen wat door de transformator gaat en  $S_{nom}$  is het nominale vermogen van een transformator.

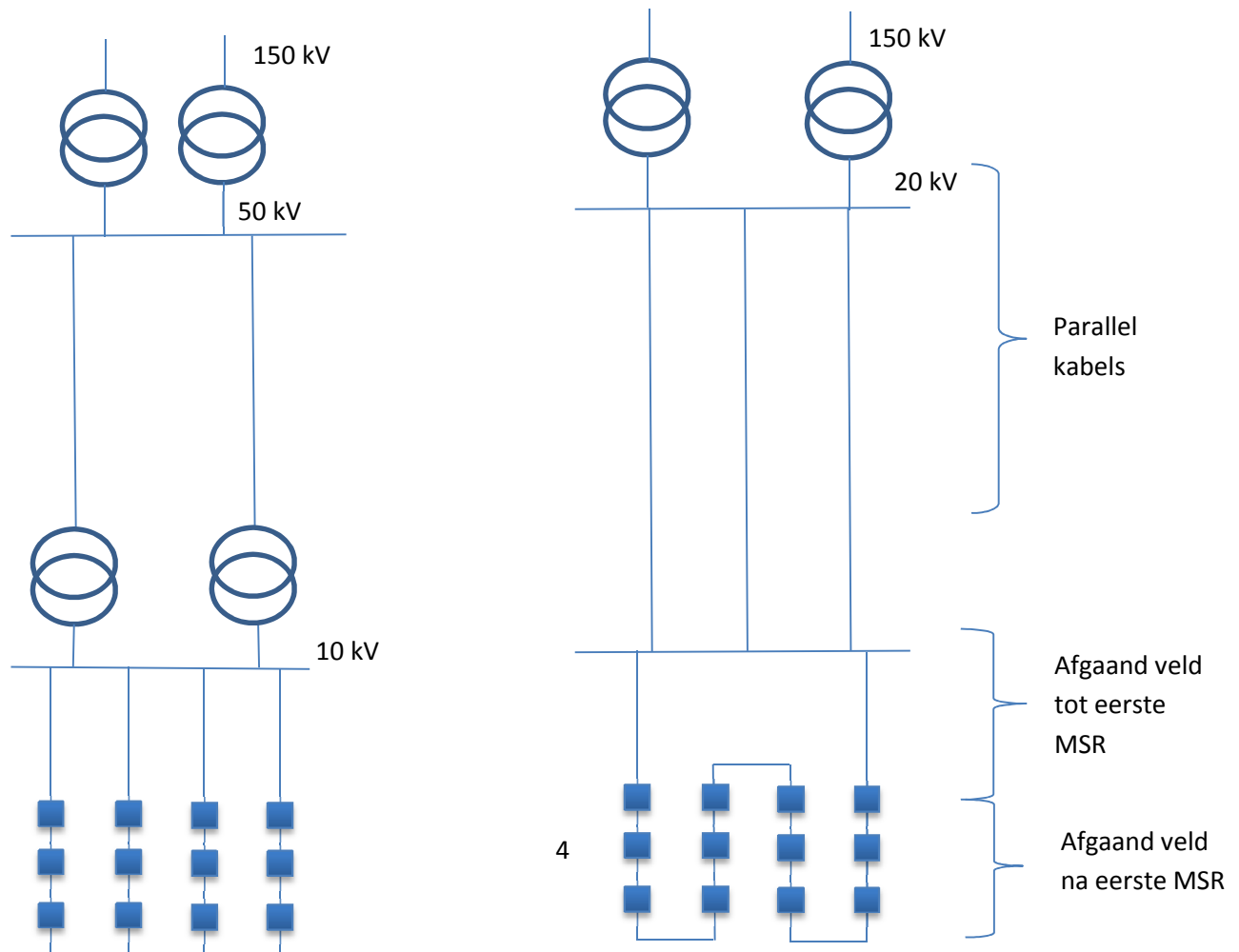
### 3. Model

Om te weten wat de impact is van het 20 kV beleid op de netverliezen is er een model gemaakt. Er is een vergelijking gemaakt tussen twee mogelijke toekomst scenario's. Het eerste scenario is een 50/10 kV situatie waarin de 10 kV kabels gestandaardiseerd worden naar één bepaalde doorsnede (200 mm<sup>2</sup>). Dit is eigenlijk een optimale 50/10 kV situatie. Het andere scenario is de 20 kV situatie, ook hier gaat het om een optimale situatie, dus dat de doorsnede en soort kabel gelijk zijn in elk deel van het net. Het gaat dus om een vergelijking van een 150 kV/ 50 kV/ 10 kV/ 0.4 kV elektriciteitsnet met een 150 kV/ 20 kV/ 0.4 kV net. Welke ook te zien is in Fig. 3.

Er zal gekeken worden naar het verschil tussen deze twee situaties, omdat het beleid 50/10 kV wil vervangen door 20 kV wordt er gekeken vanuit wat de netverliezen zijn in een 50/10 kV situatie en wat er verandert door te kiezen voor een 20 kV situatie. Aangezien er nu vooral 50/10 kV situatie zijn, zal dit leidend zijn voor de berekeningen, aangezien hier gegevens van bekend zijn, zoals het aantal kilometer kabels, dit zal als input genomen worden voor het model.

Zoals in het vorige hoofdstuk te zien is zijn de Ohmse verliezen en de verliezen in de transformatoren afhankelijk van het gevraagde vermogen. Het gevraagde vermogen verandert de hele dag door. Zo is er een piek vraag tussen 17:00 en 19:00 uur tijdens werkdagen, tijdens weekenden is de piek weer een stuk lager en ook de seizoenen bepalen de vraag naar elektriciteit. In het model is aangenomen dat er elk afgaand veld gemiddeld 1,5 MVA vraagt. [8] Dit is een gemiddelde waarde en wordt ook in beleidsdocument gebruikt.

Eerst zullen de verschillen besproken worden van de parallelkabels, daarna de verschillen in de afgaande velden. De afgaande velden zullen in twee stukken gesplitst worden, een deel tot de eerste Midden SpanningsRuimte (MSR) en het deel na de eerste MSR. Deze splitsing is er omdat in de 20 kV situatie minder afgaande velden zijn en het eerste deel meestal de grootste afstand overbrugd. Tot slot zullen de verliezen in de transformatoren aanbod komen.



Figuur 3: 50/10 kV situatie en een 20 kV situatie



### 3.1 Parallelkabels

Kabels kunnen een maximale stroom doorlaten, zonder te beschadigen. De stroombelastbaarheid wordt berekend met de internationaal erkende norm IEC 60287. Deze norm neemt de warmte productie in de kabel en de hoe deze warmte afgevoerd wordt mee. Hierin speelt ook de condities van de grond waar de kabel in ligt mee, aangezien deze van invloed zijn het warmte transport. Deze maximale stroombelastbaarheid betekent dat er over een 50 kV kabel meer vermogen getransporteerd kan worden dan op de 20 kV kabel, aangezien de stroom in een 50 kV kabel lager is bij eenzelfde vermogen. Dit is te zien in de vergelijking (2).

Er kan dus minder vermogen getransporteerd worden op een kabel die bedreven wordt op 20 kV. Om hiervoor te compenseren wordt er in de 20 kV situatie anderhalf keer zo veel parallelle 20kV kabels gelegd als 50 kV [8]. Zo wordt er in Fig. 3 twee parallelle (2 circuits) 50 kV kabels vervangen door drie parallelle (3 circuits) 20 kV kabels.

Om netverliezen verder te reduceren wordt er voor de 20 kV situatie een kabel met een doorsnede van 630 mm<sup>2</sup> gelegd in plaats van 400 mm<sup>2</sup> welke voor de 50 kV situatie gebruikt wordt. In beide situaties gaat het om aluminium kabels die rond massief zijn. Het gaat dus van 2 circuits 400Alrm (50 kV) naar 3 circuits 630Alrm (20kV). Deze gegevens worden gebruikt in het 20 kV beleidsstuk en zullen daarom ook in dit model gebruikt worden.

### 3.2 Afgaande velden

In het onderstation waar de 50 kV getransformeerd wordt na 10 kV wordt de stroom verdeeld over verschillende afgaande velden. Op elk afgaande veld liggen verschillende MSR's. Hier wordt de spanning verder verlaagd van 10 kV naar 0,4 kV en gaat de stroom naar de huizen in de omliggende straten. In eerste instantie zal worden aangenomen dat de stroom zich evenredig over de verschillende strengen verdeeld. Dit geeft een uiterste waarde aangezien bij een evenredige verdeling het energieverlies lager is ten opzichte van een onevenredige verdeling.

Over het algemeen is de afstand naar het eerste MSR de grootste afstand die overbrugd moet worden. De afstanden tussen de andere MSR zijn veel kleiner. [9,10]

In het model wordt het 10 kV daarom in twee stukken verdeeld. Het eerste deel is de kabel tussen het onderstation/verdeelstation en de eerste MSR en het tweede deel is de kabel die achter de eerste MSR ligt. In een 20 kV situatie kunnen twee keer zoveel MSR aangesloten worden, aangezien de spanning verdubbeld wordt kan er ook ongeveer 2 keer zoveel vermogen getransporteerd worden. Hierdoor is er één afgaande veld minder nodig. [10] In het model wordt daarom per twee afgaande velden in een 10 kV situatie slechts één afgaand veld in een 20 kV situatie genomen.

### 3.3 Transformatoren

In het 20 kV net zijn minder transformatoren nodig, de 50/10 kV transformator verdwijnt namelijk helemaal. Dit zorgt voor minder netverliezen. In beleidsstuk B4500 [2] wordt ervan uitgegaan dat de er een gelijk aantal transformatoren blijft die 150kV transformereren, er wordt aangenomen dat dit altijd geldig is. Verder wijzigt er weinig, alleen de 10/0.4 kV transformatoren moeten worden veranderd in 20/0.4 kV transformatoren. Voor het berekenen van de verliezen zijn de  $P_0$  en de  $P_k$  waarden nodig, deze zijn weergegeven in Tabel 1 voor nieuwe transformatoren.

Transformator	$P_0$ (kW)	$P_k$ (kW)
150/10 kV 100 MVA	26	235
50/10 kV 40 MVA	14	160
150/20 kV 80 MVA	20	292
20/10 kV 20 MVA	6	135

Tabel 1: Gegevens transformatoren [11]

Voor de transformatoren 10/0.4 kV en 20/0.4kV geldt dat deze een grote variëteit kennen, ze zijn er in verschillende vermogens. Echter geldt dat de verliezen hetzelfde zijn als het vermogen van de transformatoren ook gelijk zijn. [11]

## 4. Uitwerking model

In een vergelijking tussen het 50/10 kV net en een 20 kV net is het volgende bekend. De 50 kV parallelkabels hebben minder energieverlies dan de 20kV parallel kabels. De stroom neemt immers toe om hetzelfde vermogen te transporteren (zie ook vergelijking 4). Het aanleggen van anderhalf keer zoveel kabels en dikkere kabels in de 20 kV situatie compenseert dit niet. Aan de andere kant hebben de afgaande velden met 10 kV meer netverlies dan de afgaande velden als ze op 20 kV bedreven worden. Dus enerzijds is 20 kV net gunstiger voor de netverliezen en anderzijds juist niet. Dit maakt het interessant om te zien bij welke verhouding van vervanging er een break-even point is qua energie verlies.

Eerst zal er gekeken worden naar de netverliezen in de drie gedeeltes daarna zullen de energieverliezen door transformatoren ook worden meegenomen. Deze spelen ook een rol, aangezien er bij een 20 kV net minder transformatoren nodig zijn. Aangenomen hierbij is dat de spanning voldoende op 20kV blijft in het net en er dus geen regeltransformatoren nodig zijn.

### 4.1 Netverliezen parallelkabels

De energieverliezen in het 50 kV net kunnen berekend worden met vergelijking 4, dit geeft:

$$E_{v,50} = \left( \frac{S}{U_{50kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{50}}, \quad (7)$$

In de situatie dat er geen 50 kV neergelegd wordt, maar 20 kV zijn de netverliezen voor de 20 kV situatie:

$$E_{v,20} = \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{20}}, \quad (8)$$

Deze vergelijkingen gelden slechts voor één kabel. In werkelijkheid hebben we 2 kabels in de 50kV situatie en 3 kabels in 20 kV. Om het model algemeen te houden en het mogelijk te maken om ook andere verhoudingen te gebruiken, wordt  $m$  genomen voor het aantal kabels in de 50 kV situatie en  $n$  voor het aantal kabels in het 20 kV situatie. Het totale vermogen verdeelt zich dan over respectievelijk  $m$  en  $n$  kabels. Hieruit volgt dat het totale energieverlies over alle kabels is:

$$E_{v,50} = m \left( \frac{\frac{S}{m}}{U_{50kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{50}} = \frac{1}{m} \left( \frac{S}{U_{50kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{50}}, \quad (9)$$

$$E_{v,20} = n \left( \frac{\frac{S}{n}}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{20}} = \frac{1}{n} \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{20}}, \quad (10)$$

Voor de vergelijking is het nodig om te weten hoeveel kilometer kabel er vervangen wordt. De lengte  $l$  geeft in dit geval alleen de lengte van de afstand die overbrugd wordt. De echte lengte van de 50 kV kabels is eigenlijk:

$$L_{50} = ml, \quad (11)$$

Dit gecombineerd met vergelijking (9) en (10) geeft:

$$E_{v,50} = \frac{1}{m^2} \left( \frac{S}{U_{50kV}} \right)^2 \frac{\rho L_{50}}{A_{50}} \quad (12)$$

$$E_{v,20} = \frac{1}{mn} \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho L_{50}}{A_{20}}, \quad (13)$$

De energieverliezen in de 20 kV situatie worden ook uitgedrukt in de lengte van de 50 kV kabels omdat dit als basis situatie genomen wordt.

Hieruit kan het verschil in het energieverlies van de twee verschillende situaties berekend worden:

$$\Delta E_a = E_{v,20} - E_{v,50} = \left( \frac{1}{mn} \left( \frac{S}{U_{20}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{m^2} \left( \frac{S}{U_{50}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{50}} \right) L_{50} \quad (14)$$

## 4.2 Netverliezen afgaande velden tot de eerste MSR

In het 10 kV net verdeelt de stroom zich over verschillende afgaande velden, er zijn dus meerdere kabels waar de stroom zich over verdeelt vanuit het 50kV net. In eerste instantie wordt er vanuit gegaan dat de stroom zich evenredig verdeelt over de verschillende strengen en dat de lengtes van de verschillende aflopende velden gelijk zijn.

Voor het eerste gedeelte van het 10kV net (dus tot de eerste MSR) kan hetzelfde worden gedaan als in hoofdstuk 4.1. Dit geeft, met de verhouding van het aantal strengen voor 10 kV ten opzichte van 20 kV respectievelijk o en p:

$$E_{v,10} = o \left( \frac{\frac{S}{o}}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{10}} = \frac{1}{o} \left( \frac{S}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{10}}, \quad (15)$$

$$E_{v,20} = p \left( \frac{\frac{S}{p}}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{20}} = \frac{1}{p} \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{20}}, \quad (16)$$

Over het algemeen is de verhouding tussen o en p 2:1. Ook hier is  $l$  de lengte van één afgaande veld. Aangenomen dat alle afgaande velden tot de eerste MSR even lang zijn is de totale lengte van het 10 kV net tot de eerste MSR:

$$L_{10} = ol, \quad (17)$$

Het energieverlies wordt dan:

$$E_{v,10} = \frac{1}{o^2} \left( \frac{S}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho L_{10}}{A_{10}} \quad (18)$$

$$E_{v,20} = \frac{1}{op} \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho L_{10}}{A_{20}}, \quad (19)$$

Ook hier wordt het energieverlies weer uitgedrukt in de lengte van het 10 kV net. Het verschil in energieverlies tussen de beide situaties is:

$$\Delta E_b = E_{v,20} - E_{v,10} = \left( \frac{1}{op} \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{o^2} \left( \frac{S}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{10}} \right) L_{10} \quad (20)$$

## 4.3 Energieverlies achter eerste MSR

In één afgaand veld zitten verschillende MSR stations, die elk een deel van de stroom transporteren naar de klanten. In het begin van een afgaand veld zal de stroomsterkte dus hoger zijn dan aan het eind, ook dit heeft invloed op de energieverliezen. Om dit te modeleren, wordt aangenomen dat de stroom lineair afneemt tot het eind van de streng. De stroomsterkte op het afgaande veld is dan gelijk aan:

$$I(x) = I_0 - \frac{I_0}{l} x, \quad (21)$$

waarin  $I_0$  de stroomsterkte is aan het begin van de kabel,  $l$  de lengte van het afgaande veld en  $x$  een positie op het afgaande veld is. Hierbij is  $x = 0$  de plek van de eerste MSR en  $x = l$  de positie aan het eind van een afgaande veld.

De stroomsterkte is nu afhankelijk van de plek op het afgaande veld, daarom is het nodig om voor de energieverliezen over de hele kabel te integreren. De energieverliezen zijn nu:

$$E_v = \int_0^l \left( I_0 - \frac{I_0}{l} x \right)^2 \frac{\rho}{A} dx = \frac{1}{3} I_0^2 \frac{\rho}{A} l. \quad (22)$$

Deze uitkomst kan zowel gebruikt worden voor de 10 kV situatie als de 20 kV situatie. Voor twee strengen in de 10 kV situatie is het energieverlies dus:

$$E_{v,10c} = 2 \frac{1}{3} I_0^2 \frac{\rho}{A} l. \quad (23)$$

De 20 kV situatie heeft een twee keer zo hoge spanning en kan daarom twee keer zoveel vermogen transporteren. Daarom kunnen twee afgaande velden in de 10 kV situatie gecombineerd worden. Dit zorgt ervoor dat de  $I_0$  in de 10 kV situatie als in de 20 kV situatie gelijk is. Door het combineren is de lengte van het afgaande veld verdubbeld. Het energie verlies voor de 20 kV situatie is dan dus:

$$E_{v,20c} = \frac{1}{3} I_0^2 \frac{\rho}{A} 2l, \quad (24)$$

welke gelijk is aan het netverlies in de 10 kV situatie en dus een verandering van situatie geen gevolgen heeft voor het netverlies.

Tussen de twee situatie is er nu dus geen verschil in energieverlies. Alleen de spanningsafhankelijke energieverliezen zijn hierin niet meegenomen.

## 5. Verhouding verschil in netverlies van parallelkabels ten op zichte van verschil in netverlies van de afgaande velden

Aangezien er geen verschil is in energieverlies achter de eerste MSR, kan het totale verschil in energieverlies van het gehele systeem, exclusief de transformators, geschreven worden als (vergelijking 14 en 20 bij elkaar opgeteld):

$$\Delta E_a + \Delta E_b = \left( \frac{1}{mn} \left( \frac{S}{U_{20}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{m^2} \left( \frac{S}{U_{50}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{50}} \right) L_{50} + \left( \frac{1}{op} \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{o^2} \left( \frac{S}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{10}} \right) L_{10}$$

Om meer overzicht te krijgen wordt het volgende vervangen:

$$\left( \frac{1}{mn} \left( \frac{S}{U_{20}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{m^2} \left( \frac{S}{U_{50}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{50}} \right) = C_a \quad (25)$$

$$\left( \frac{1}{op} \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{o^2} \left( \frac{S}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{10}} \right) = C_b \quad (26)$$

Dit geeft:

$$\Delta E_a + \Delta E_b = C_a L_{50} + C_b L_{10} \quad (27)$$

In het model wordt gekeken naar de verhouding in energieverlies van het aantal kilometer kabels 10 kV tot de eerste MSR ten opzichte van het aantal kilometer kabels 50 kV. Dus delen we het totaal door de totale lengte van de kabels van het 50 kV gedeelte en de lengte van de kabels tot aan de eerste MSR:

$$E_{v,km} = \frac{\Delta E_a + \Delta E_b}{L_{50} + L_{10}} = \frac{C_a L_{50}}{L_{50} + L_{10}} + \frac{C_b L_{10}}{L_{50} + L_{10}} \quad (28)$$

Hieruit volgt

$$E_{v,km} = C_a \left( 1 - \frac{L_{10}}{L_{50} + L_{10}} \right) + \frac{C_b L_{10}}{L_{50} + L_{10}} \quad (29)$$

Oftewel:

$$E_{v,km} = C_a - (C_a - C_b) D_{10}, \quad (30)$$

waarin  $D_{10}$  de verhouding is van het aantal kilometers 10 kV kabels tot de eerste MSR ten opzichte van het aantal kilometers 50 kV parallel kabels en het aantal kilometer 10 kV kabels tot de eerste MSR.

$$D_{10} = \frac{L_{10}}{L_{50} + L_{10}} \quad (31)$$

Als  $C_a$  en  $C_b$  constant worden genomen, is er een lineaire functie die het energieverlies per km aangeeft van de verhouding van het aantal kilometers 10 kV tot de eerste MSR ten opzichte van het aantal kilometers 50 kV parallel kabels en het aantal kilometer 10 kV kabels tot de eerste MSR.

Het punt waarop het energieverlies nul is bepaald de verhouding van wanneer het energieverlies van een 20 kV situatie gelijk is aan die van de 50 kV situatie. Ervan uitgaande dat de 50/10 kV situatie de basis situatie is en deze vervangen zou worden door 20 kV, dan is er als x km aan 50 kV vervangen wordt er minstens y km aan 10 kV vervanging nodig om niet meer netverliezen te hebben.

Om het nulpunt te vinden wordt vergelijking 30 gelijk aan nul gesteld:

$$E_{v,km} = C_a - (C_a - C_b) D_{10} = 0 \quad (32)$$

Dit geeft:

$$C_a = (C_a - C_b) D_{10} \quad (33)$$

Welke, met behulp van vergelijking 25 en 26, omschreven kan worden naar,:

$$\frac{1}{mn} \left( \frac{S}{U_{20}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{m^2} \left( \frac{S}{U_{50}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{50}}$$

$$= \left( \frac{1}{mn} \left( \frac{S}{U_{20}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{m^2} \left( \frac{S}{U_{50}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{50}} - \frac{1}{op} \left( \frac{S}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} - \frac{1}{o^2} \left( \frac{S}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{10}} \right) D_{10}$$

In elke term is er een  $S^2$  en  $\rho$ . Deze kunnen uit de vergelijking gedeeld worden dit geeft:

$$\left( \frac{1}{mn U_{20}^2 A_{20}} - \frac{1}{m^2 U_{50}^2 A_{50}} \right) = \left( \frac{1}{mn U_{20}^2 A_{20}} - \frac{1}{m^2 U_{50}^2 A_{50}} - \frac{1}{op U_{20}^2 A_{20}} - \frac{1}{o^2 U_{10}^2 A_{10}} \right) D_{10}$$

Oftewel:

$$D_{10} = \frac{\left( \frac{1}{mn U_{20}^2 A_{20}} - \frac{1}{m^2 U_{50}^2 A_{50}} \right)}{\left( \frac{1}{mn U_{20}^2 A_{20}} - \frac{1}{m^2 U_{50}^2 A_{50}} - \frac{1}{op U_{20}^2 A_{20}} - \frac{1}{o^2 U_{10}^2 A_{10}} \right)} \quad (34)$$

Hieruit volgt dat  $D_{10}$  onafhankelijk is van de het vermogen.

Vervangen van 50 kV naar 20 kV zorgt voor meer netverliezen, het vervangen van 10 kV naar 20 kV zorgt voor minder netverliezen. Het evenwichtspunt, dus in welke verhouding waarin ze elkaar compenseren is onafhankelijk van het gevraagde vermogen. Opgemerkt dient te worden dat het percentage 10 kV gaat over alleen de stukken kabels tot de eerste MSR, hierachter is er namelijk niet meer of minder energieverlies door een verandering. Daarnaast is het nul punt nog wel afhankelijk van het aantal afgaande velden, hoe meer afgaande velden des te meer kilometers aan 10 kV er vervangen dient te worden.

## 6. Onevenredige verdeling over de afgaande velden

In het voorgaande is aangenomen dat de stroom zich evenredig verdeelt over de afgaande velden, in werkelijkheid zal dit niet zo zijn en zullen er in sommige afgaande velden meerder aansluitingen zijn en eventueel ook nog grootverbruikers. Elk afgaand veld zal dus een andere vraag hebben naar stroom. In dit hoofdstuk zal de onevenredigheid worden meegenomen, waarin nog wel de aanname gedaan wordt dat elk afgaand veld even groot is en de stroom lineair afneemt na de eerste MSR.

### 6.1 Netverlies tot de eerste MSR

In vergelijking 4 is te zien dat de energieverliezen in een 10 kV afgaand veld gelijk in de aan:

$$E_{v,10} = \left( \frac{S}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{10}}.$$

Het totale energieverlies van de afgaande velden is de som van het energieverlies per afgaand veld:

$$E_{onevenrdig,10 kV,b} = \sum_{i=0}^o \left( \frac{S_i}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{10}}. \quad (35)$$

Ook hier geldt dat bij de aanname dat alle afgaande velden even lang zijn, dat de totale lengte gelijk is aan:

$$L_{10} = ol. \quad (17)$$

Gecombineerd met vergelijking 35 geeft dit voor de totale energieverliezen:

$$E_{onevenrdig,10 kV,b} = \frac{1}{o} \sum_{i=0}^o \left( \frac{S_i}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho L_{10}}{A_{10}} \quad (36)$$

Het energieverlies in de 20 kV situatie is :

$$E_{onevenrdig,20 kV,b} = \sum_{i=0}^p \left( \frac{S_i}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho l}{A_{20}} \quad (37)$$

In het Excel model zijn hiervoor de vermogens van de opeenvolgende afgaande velden uit de 10 kV situatie bij elkaar opgeteld. Ook hier kan  $l$  weer omgezet worden in  $L_{10}$ , aangezien het afgaande veld nog steeds even lang is. Dit geeft:

$$E_{onevenrdig,20 kV,b} = \frac{1}{o} \sum_{i=0}^p \left( \frac{S_i}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho L_{10}}{A_{20}} \quad (38)$$

Het verschil in energieverlies is dan:

$$\Delta E_{onevenrdig,b} = \frac{1}{o} \sum_{i=0}^p \left( \frac{S_i}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho L_{10}}{A_{20}} - \frac{1}{o} \sum_{i=0}^o \left( \frac{S_i}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho L_{10}}{A_{10}} \quad (39)$$

Wat vereenvoudigd kan worden naar:

$$\Delta E_{onevenrdig,b} = \frac{\rho L_{10}}{o} \left( \sum_{i=0}^p \left( \frac{S_i}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{1}{A_{20}} - \sum_{i=0}^o \left( \frac{S_i}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{1}{A_{10}} \right). \quad (40)$$

## 6.2 Netverlies na de eerste MSR

Bij een gelijke vermogensverdeling over de afgaande velden was er geen verschil in energieverlies tussen de 10 en 20 kV situatie. Bij een onevenredige verdeling is dit er echter wel.

Zoals we in hoofdstuk 4.3 zagen is het energieverlies in een kabel achter de eerste MSR gelijk aan:

$$E_v = \frac{1}{3} I_0^2 \frac{\rho}{A} l. \quad (22)$$

Voor alle afgaande 10 kV kabels geldt dat het gemiddelde energieverlies per afgaande veld gelijk is aan de som van alle velden gedeeld door het aantal afgaande velden:

$$E_{\text{onevenredig gemiddeld, 10 kV, c}} = \frac{1}{o} \sum_{i=0}^o \frac{1}{3} \left( \frac{S_i}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{10}} l. \quad (41)$$

Voor de 20 kV situatie geldt hetzelfde, dit geeft de volgende vergelijking voor het energieverlies:

$$E_{\text{onevenredig gemiddeld, 20 kV, c}} = \frac{1}{p} \sum_{i=0}^p \frac{1}{3} \left( \frac{S_i}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} l \quad (42)$$

In het Excel model zijn ook hier steeds de opeenvolgende vermogens van de 10 kV strengen bij elkaar opgeteld. Zodat er in de 20 kV situatie de helft van het aantal 10 kV afgaande velden zijn. Aangezien de lengte voor zowel 10 kV als 20 kV kabels gelijk zijn, is  $l$  gelijk aan de totale lengte  $L_{10,c}$

$$\Delta E_{\text{onevenredig, c}} = \frac{1}{p} \sum_{i=0}^p \frac{1}{3} \left( \frac{S_i}{U_{20kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{20}} L_{10,c} - \frac{1}{o} \sum_{i=0}^o \frac{1}{3} \left( \frac{S_i}{U_{10kV}} \right)^2 \frac{\rho}{A_{10}} L_{10,c}, \quad (43)$$

welke vereenvoudigd kan worden naar:

$$\Delta E_{\text{onevenredig, c}} = \frac{\rho L_{10,c}}{3} \left( \frac{1}{p A_{20}} \sum_{i=0}^p \left( \frac{S_i}{U_{20kV}} \right)^2 - \frac{1}{o A_{10}} \sum_{i=0}^o \left( \frac{S_i}{U_{10kV}} \right)^2 \right). \quad (44)$$



## 7. Case Anklaar

Het model is toegepast op de situatie in Anklaar. Anklaar is een wijk van ongeveer 1 km<sup>2</sup> in Apeldoorn met ongeveer 1800 huishoudens, zowel 65+ers als gezinnen wonen hier.[12] De wijk Anklaar krijgt haar elektriciteit vanuit het onderstation Apeldoorn. Dit wordt getransporteerd met twee 50 kV kabels, er wordt verondersteld dat deze beide worden gebruikt. In de 20 kV situatie zullen er 1,5 keer meer kabels komen te liggen. [8] Dus in de 20 kV situatie liggen er dan 3 kabels. In Anklaar wordt de spanning terug gebracht naar 10kV en verdeeld over 16 afgaande velden, waarvan sommige van de achterliggende MS-strengen kort en andere lang zijn. In de 20 kV situatie zullen, zoals eerder besproken 8 afgaande velden zijn.

Uit een meting gedaan met behulp van het programma 'Vision', een programma waarin berekeningen aan het net te doen zijn, zijn de volgende lengtes gevonden voor de verschillende onderdelen van het net in Anklaar, hiervoor is een data bestand gebruikt die de maximale waarden van de afgelopen 3 jaar heeft. Voor het bepalen van de lengte van het 50 kV gedeelte is gebruik gemaakt van de waarde van de weerstand  $R$  die Vision aangeeft, hieruit kan dan met behulp van vergelijking (3) de lengte worden bepaald. In het gedeelte achter de eerste MSR zijn de kabels die de afgelopen 3 jaar minder dan 10 A hebben vervoerd verwaarloosd. Dit stuk draagt namelijk weinig bij aan het netverlies, minder dan 7 W/km. De gevonden waarden zijn te zien in Tabel 3.

Kabel	Totale lengte (km)
Parallelkabels 50 kV	13.54
Afgaande velden tot eerste MSR	9.6
Afgaande velden na eerste MSR	64.28

Tabel 2: Lengte kabels in de Anklaar case

### 7.1 Energieverlies bij evenredige verdeling over afgaande velden

Het energie verlies kan nu voor de drie gedeeltes worden uitgerekend, dus voor de parallel kabels, het stuk van het begin van een afgaande veld tot de eerste MSR en het gedeelte na de eerste MSR. Ervanuit gaande dat de stroom zich evenredig verdeeld over de afgaande velden, kan Tabel 3 voor de energieverliezen gemaakt worden:

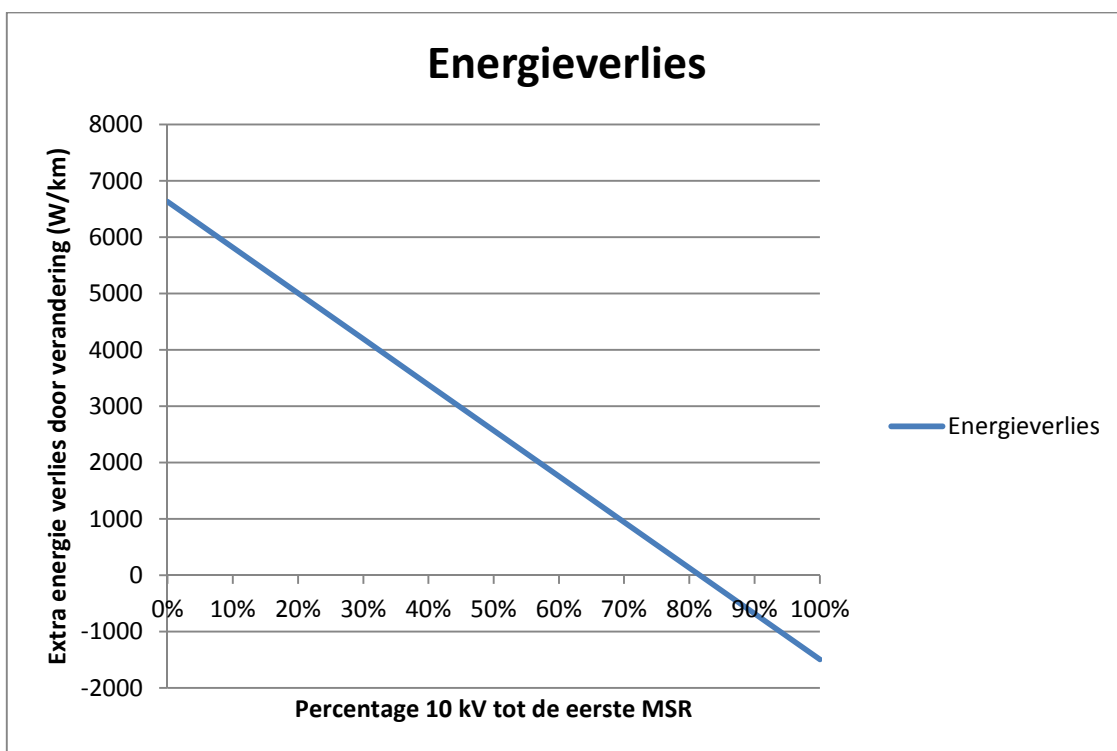
	Energieverlies 50/10 kV situatie (kW/km)	Energieverlies 20 kV situatie (kW/km)	Verskil tussen 20 kV situatie en 50/10 kV situatie (kW/km)
Parallelkabels	3,5	10.1	6,6
Afgaande velden tot eerste MSR	2,5	1,2	-1,2
Afgaande velden na eerste MSR	0.8	0.8	0

Tabel 3: Energieverlies per gedeelte van het net in kW/km

Uit Tabel 3 volgt dat 20 kV parallel kabels 6,6 kW/km meer energieverlies geven dan 50 kV parallelkabels. Hiertegenover staat dat de voor de afgaande velden tot de eerste MSR 1,2 kW/km minder energieverlies is in de 20 kV situatie. Zoals ook in hoofdstuk 4.3 beschreven is er geen verschil in energieverlies voor de afgaande velden na de eerste MSR.

Beide situaties hebben dus een gedeelte die positief is voor het energieverlies en een gedeelte dat negatief is voor het energieverlies. Om te kijken bij welke verhouding deze twee elkaar opheffen is vergelijking 30 gebruikt. Dit geeft Fig. 4.

In Fig. 4 is te zien dat de energieverliezen in de kabels in beide situaties gelijk zijn als het 10 kV-net, tot de eerste MSR, 84,2% van het totale aantal kilometer – het aantal kilometer achter de eerste MSR wordt buitenbeschouwing gehouden – is. Oftewel als er 15,8 km aan 50 kV vervangen wordt door 20 kV, dan moet om het netverlies te compenseren 84,2 km aan 10 kV vervangen worden door 20 kV. Waarin de afstand van 10 kV net alleen tot de eerste MSR wordt meegenomen. Als het percentage lager is, zijn er meer energieverliezen terwijl als het percentage hoger ligt er minder energieverliezen. Zoals eerder vermeld is dit percentage onafhankelijk van het gevraagde vermogen.



Figuur 4: Verschil in energie verlies per km tussen 50/10 kV en 20 kV. Hierin is het percentage het aantal km in de 10 kV situatie tot de eerste MSR t.o.v. het aantal kilometer 50 kV kabels plus het aantal km 10 kV kabels tot de eerste MSR.

## 7.2 Energieverlies in transformatoren

In de Anklaar situatie zijn er twee 150/50 kV van 100 MVA transformatoren. Uitgaande van 1,5 MVA per afgaande veld [8], gaat er door elk van deze transformator 12 MVA. Daarnaast zijn er nog drie 50/10 kV transformatoren waar dan door elk 8 MVA wordt getransporteerd. De verliezen onderweg weg in de kabels zijn verwaarloosbaar ten opzichte van het te transporteren vermogen. In het afgaande veld kunnen transformatoren zitten van verschillend vermogen. In een afgaand veld zitten gemiddeld 8 MSRs [10]. Bij 16 afgaande velden zijn dit dus 128 MSRs. Elk MSR geeft dan ongeveer 190 kVA door. Om ook pieken op te kunnen vangen is er gekozen voor een transformator met een vermogen van 400 kVA, welke ook ongeveer in het midden zit van de range van vermogens binnen deze transformatoren. Buiten beschouwing wordt gelaten dat in sommige MSR meerdere

transformatoren zitten. Dit zal voor het verschil van beide situaties niets uitmaken, maar wel voor de situaties zelf.

In de 20 kV situatie zijn er de drie 150/20 kV van 80 MVA transformatoren en de transformatoren in de afgaande velden. De transformatoren in de afgaande velden zullen hetzelfde nominale vermogen hebben. De  $P_0$  waarde en de  $P_k$  waarde voor een 400 kVA transformator zijn respectievelijk: 387W en 3,25 kW.

Gebruik makend van Tabel 1 en bovenstaande waarde kan nu berekend worden het energieverlies in deze transformatoren. Deze zijn te zien in Tabel 4.

Transformator	Energieverlies (kW)
Twee 150/50 kV	61,4
Drie 50/10 kV	46,8
128 10/0,4 kV	140,9
Twee 150/20 kV	53,1
128 20/0,4 kV	140,9

Tabel 4: Energie verliezen in de transformators

Voor de transformatoren geldt dat, omgerekend naar het aantal GWh in een jaar, het energieverlies voor de 20 kV situatie 1,7 GWh is en voor de 50/10 kV situatie 2,2 GWh is. Opgemerkt dient te worden dat is aangenomen dat de belasting van de transformator het gehele jaar 1.5 MVA per afgaande veld is.

### 7.3 Energieverlies totaal systeem met evenredige verdeling over de strengen

Door het de lengte van de kabels te vermenigvuldigen met de waarden in Tabel 3 en te vermenigvuldigen met het aantal uren in een jaar, wordt het energieverlies per jaar bekend voor de twee situaties in Anklaar. Deze waarden zijn te zien in Tabel 5 waar ook de netverliezen door de transformators zijn meegenomen. De kolom met het verschil is het energieverlies in de 20 kV situatie min het energieverlies in een 50/10 kV situatie.

	Energieverlies 50/10 kV situatie (MWh)	Energieverlies 20 kV situatie (MWh)	Energieverlies verschil tussen 20 kV situatie en 50/10 kV situatie (MWh)
Parallelkabels	411	1197	787
Afgaande velden tot eerste MSR	209	105	-105
Afgaande velden na eerste MSR	466	466	0
Transformators	2182	1700	-482
<b>Totaal</b>	<b>3268</b>	<b>3468</b>	<b>200</b>

Tabel 5: Energieverlies (MWh) per onderdeel van het net

Alliander heeft kengetallen om de waarde van energieverlies en de bijbehorende CO<sub>2</sub> uitstoot te kwantificeren. Deze kengetallen zijn te zien in Tabel 6. [13]

<b>Opbrengst van energie besparing</b>	65 €/MWh
<b>Opbrengst van reductie CO<sub>2</sub> uitstoot</b>	20 €/Ton CO <sub>2</sub>
<b>Conversiefactor</b>	0,519 Ton CO <sub>2</sub> / MWh

Tabel 6: Kengetallen Alliander

Aan de hand hiervan kunnen de totale kosten van het netverlies per jaar berekend worden. Deze zijn te zien in Tabel 7.

	Kosten energieverlies 50/10 kV situatie (x 1000 €)	Kosten energieverlies 20 kV situatie (x 1000 €)	Vershil tussen 20 kV situatie en 50/10 kV situatie (x 1000 €)
<b>Kosten aan energie</b>	212,4	225,4	13,0
<b>Kosten uitstoot CO<sub>2</sub></b>	33,9	36,0	2,1
<b>Totaal</b>	<b>246,3</b>	<b>261,4</b>	<b>15,1</b>

Tabel 7: Totaal bedrag aan kosten van elke situatie en het verschil tussen de 20 kV en de 50/10 kV situatie

Bij een evenredige verdeling geeft een 20 kV situatie 15.100 euro per jaar meer kosten aan energieverlies. Dit is ruim zes procent van de kosten aan energie verlies in een 50/10 kV situatie.

#### 7.4 Netverliezen onevenredig

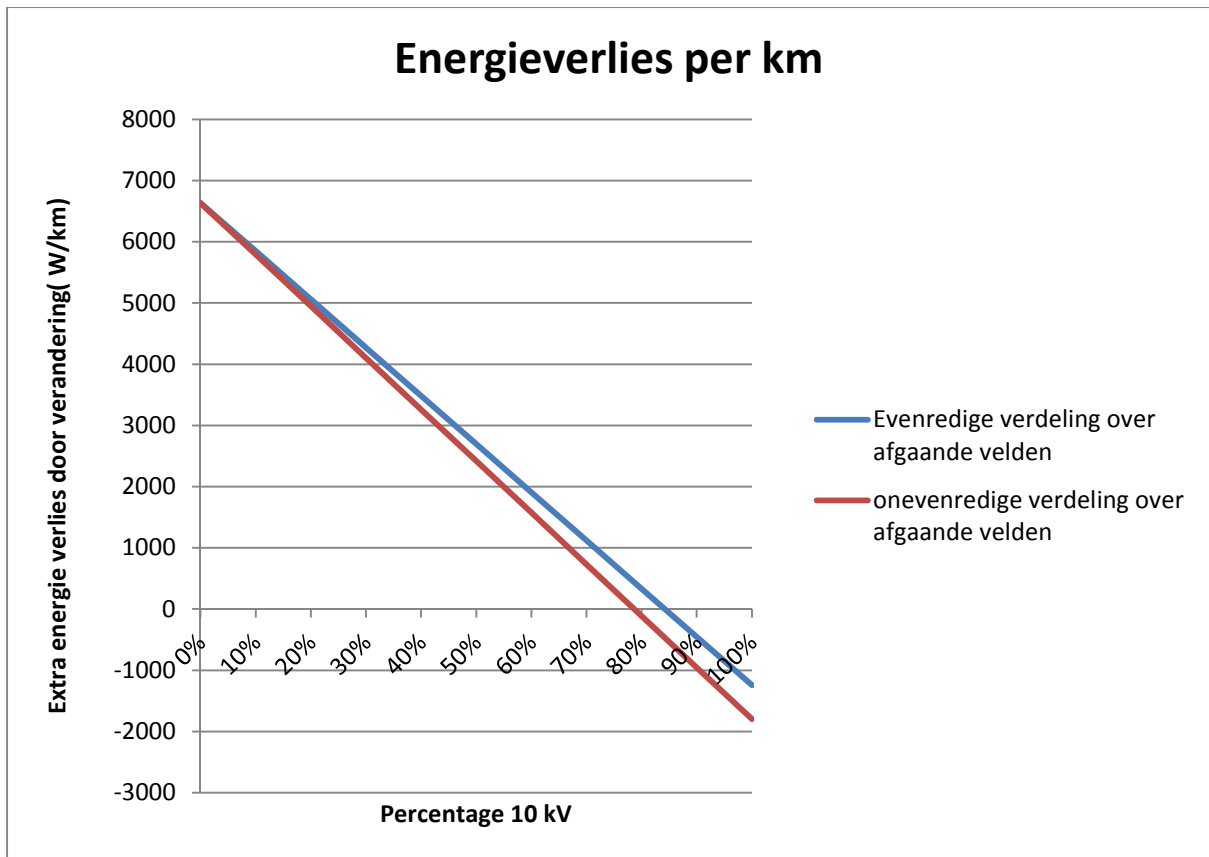
De afgaande velden hebben echter geen evenredige verdeling. Met behulp van de gegevens van de maximale gevraagde belasting wordt er in Vision gekeken hoeveel vermogen er per afgaand veld gevraagd wordt. Dit geeft een verdeling met de uiterste waarden van 0,1 tot 13,3 procent van het totale vermogen.

Door de onevenredige verdeling verandert het energieverlies per km van de gedeeltes in de afgaande velden. De gevonden waarden zijn te zien in Tabel 8.

	Energieverlies 50/10 kV situatie (kW/km)	Energieverlies 20 kV situatie (kW/km)	Vershil tussen 20 kV situatie en 50/10 kV situatie (kW/km)
<b>Parallelkabels</b>	3,5	10,1	6,6
<b>Afgaande velden tot eerste MSR</b>	3,3	1,5	-1,7
<b>Afgaande velden na eerste MSR</b>	1,1	1,0	-0,1

Tabel 8: Energieverlies per gedeelte van het net in kW/km

Bij een onevenredige verdeling is de 20 kV situatie iets gunstiger dan bij de evenredige verdeling, dit komt doordat het energie verlies afhankelijk is van de stroom in het kwadraat. Als de stroom in elke streng gelijk is dan is de som van het verlies lager dan als het onevenredig verdeeld is. Hierdoor wordt de grafiek die de verhouding weergeeft bij welk percentage het netverlies gecompenseerd wordt ook anders, dit is te zien in Figuur 5. Het nulpunt ligt nu bij 78,7 %, dus als 22,3 km 50 kV wordt vervangen dan behoort 78,7 km 10 kV vervangen worden. Hier wordt nog wel steeds uit gegaan van twee ideale situaties. Hierbij moet worden vermeld dat het gedeelte achter de eerste MSR niet is meegenomen. Om dit wel mee te nemen kan het aantal km kabel achter de eerste MSR worden gedeeld door 17, aangezien het verschil in energieverlies 17 keer kleiner is.



Figuur 5: Verschil in energieverlies per km tussen 50/10 kV en 20 kV. Hierin is het percentage het aantal km in de 10 kV situatie tot de eerste MSR t.o.v. het aantal kilometer 50 kV kabels plus het aantal km 10 kV kabels tot de eerste MSR. Dit voorzowel een evenredige verdeling als een onevenredige verdeling van de stroom over de afgaande velden.

## 7.5 Energieverlies totaal systeem met onevenredige verdeling over de strengen

Voor de transformatoren blijft hetzelfde gelden. Samen met de kabellengtes kan nu ook weer het energieverlies in een jaar berekend worden, welke te zien is in Tabel 9.

	Energieverlies 50/10 kV situatie (MWh)	Energieverlies 20 kV situatie (MWh)	Verschil tussen 20 kV situatie en 50/10 kV situatie (MWh)
Parallelkabels	411	1197	787
Afgaande velden tot eerste MSR	273	123	-151
Afgaande velden na eerste MSR	611	547	-64
Transformators	2182	1700	-482
<b>Totaal</b>	<b>3478</b>	<b>3567</b>	<b>89,6</b>

Tabel 9: Energieverlies (MWh) per onderdeel van het net

De waarden van het energieverlies van de afgaande velden na de eerste MSR is relatief hoog, doordat er veel kilometers aan kabels liggen. De totaal waarden van Tabel 9 kunnen ook weer

omgerekend worden naar de kosten die het energieverlies geeft met behulp van de kengetallen, dit geeft Tabel 10.

	Kosten energieverlies 50/10 KV situatie (x 1000 €)	Kosten energieverlies 20 kV situatie (x 1000 €)	Vershil tussen 20 kV situatie en 50/10 kV situatie (x 1000 €)
<b>Kosten aan Energie</b>	226,1	231,9	5,8
<b>Kosten uitstoot CO<sub>2</sub></b>	36,1	37,0	0,9
<b>Totaal</b>	<b>262,2</b>	<b>268,9</b>	<b>6,8</b>

Tabel 10: Totaal bedrag aan kosten van elke situatie en het verschil tussen de 20 kV en de 50/10 kV situatie

Een 20 KV situatie geeft jaarlijks bijna 6800 euro meer aan kosten door energieverliezen, dit is bijna drie procent van de totale energieverlies kosten van de 50/10 kV situatie.

## 8. Discussie

In het model zijn verschillende aannames gedaan die het model onnauwkeuriger maken. Deze zullen één voor één benoemd worden.

Allereerst zijn de diëlektrische verliezen verwaarloosd. Zoals eerder vermeld is dit minder dan 1% van de netverliezen voor elk stuk van het opgedeelde net. Wel is het zo dat aan het eind van een afgaande veld deze wel een rol gaan spelen, doordat ze dan dezelfde orde grootte hebben als de ohmse verliezen. Daarnaast is het zo dat nu het verschil van de twee situaties bij een evenredige stroomverdeling in de afgaande velden na de eerste MSR nul is. Als de diëlektrische verliezen hierin meegenomen zouden worden, zou de 20 kV situatie ook op dit stuk meer energieverliezen kennen. Dit zou in verder studie meegenomen kunnen worden, hoewel een de onevenredige situatie een beter beeld geeft en diëlektrische verliezen daar niet zo'n grote rol spelen. Daarnaast zullen de diëlektrische verliezen voor het totaal plaatje per gedeelte klein zijn.

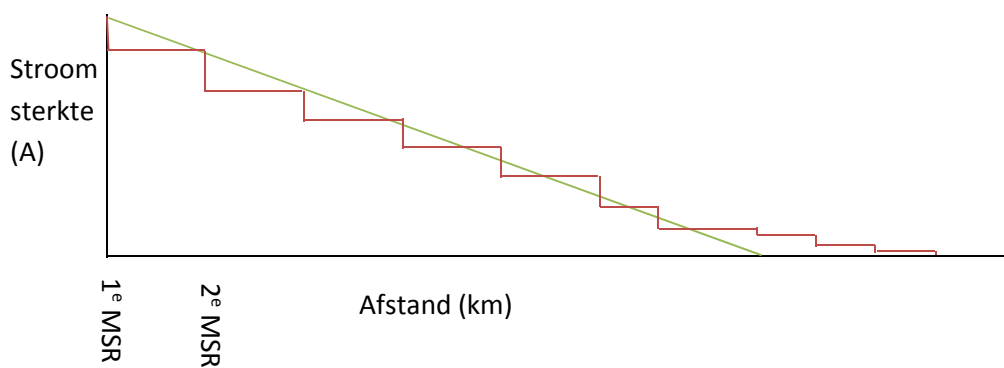
Een andere aanname is dat alle afgaande velden even lang zijn. In het model wordt daarom het gemiddelde energieverlies per streng berekend, waarna het vermenigvuldigd wordt met de daadwerkelijke lengte. In de onevenredige verdeling van de 10 kV situatie is er ongeveer een verschil van 3% tussen gemiddelde energieverlies per streng en de som van het energieverlies van elke streng apart.

De gegeven grafiek neemt niet het aantal kilometer kabel achter de eerste MSR mee. Terwijl deze in de onevenredige stroom verdeling er wel toe doet. In de case van Anklaar kan gezegd worden dat 17 kilometer kabel achter de MSR gelijk is aan 1 kilometer voor de MSR. Op deze manier kan er toch rekening mee gehouden worden.

Overigens wordt het verbindingstukje tussen de afgaande velden, die in de 20 kV situatie een rol gaan spelen verwaarloosd, als het om kleine afstanden gaat, zal het effect klein zijn. Anderzijds is het ook mogelijk om dit stuk voor een de helft mee te nemen in een afgaand veld in een 10 kV situatie en de andere helft bij een andere afgaand veld.

Verder wordt er aangenomen dat de belasting van een afgaand veld lineair afneemt. In werkelijkheid zal dit gaan in stapjes. Voor het relatieve verschil zal dit waarschijnlijk niet zo veel uitmaken, hoeveel kan nader bepaald worden. Daarnaast gaat de berekening uit van één stuk kabel, in werkelijkheid zijn er soms aan het eind nog aftakkingen in een streng.

In de case Anklaar zijn de lengte van de kabels die in 3 jaar geen 10 Ampère hebben doorgelaten niet meegenomen. Dit stuk draag weinig bij aan de netverliezen en kan eventueel compenseren voor het aannemen van een lineaire afname. Dit is visueel gemaakt in Fig. 6, waarin de groene lijn een lineaire afname laat zien en rood een stapsgewijze afname.



**Figuur 6: De lineaire benadering van een stapsgewijze afname in stroomsterkte in een afgangveld.**

In een vervolg studie kan het interessant zijn om te kijken wat voor transformatoren er in een MSR zitten en of hier iets algemeen over gezegd kan worden. Nu is er een aanname gedaan over welke transformator er in zit die niet getoetst is. Daarnaast is ook buitenbeschouwing gelaten dat er in sommige MSR meerder transformatoren zitten. Dit maakt vooral uit voor het energieverlies in een situatie, en niet voor het verschil tussen de situaties. Het zorgt ervoor dat het in perspectief plaatsen van de het verschil in energieverlies van de twee situaties minder betrouwbaar is.

In de 20 kV situatie is aangenomen dat er geen regeltransformatoren nodig zijn om de spanning op het juiste niveau te houden. Dit kan nog onderzocht worden. Als dit nodig blijkt te zijn dan zal dit extra energieverliezen met zich meebrengen.

Tot slot is aangenomen dat de belasting van het net het hele jaar door 1,5 MVA per afgang veld is. De belasting is in werkelijkheid afhankelijk van het uur, dag en maand. Op sommige uren en dagen is de vraag namelijk hoger dan op andere momenten. Dit heeft ook invloed op het energieverlies, doordat het verlies kwadratisch afhankelijk is van het gevraagde vermogen, is het niet helemaal juist om het gemiddelde te nemen.

In het programma 'Vision' is het mogelijk om exacter de netverliezen te berekenen. Hiervoor dient de spanning naar 20 kV gebracht te worden. Dit kan lastig zijn als er generatoren op het net aangesloten zijn, omdat deze dan ook aangepast dienen te worden wat het nodige aan tijd kost. De generatoren moeten of eerst verwijderd worden in 'Vision' en later toegevoegd worden om het spanningsniveau te wijzigen, of in stapjes naar een hoger voltage gebracht worden (eerst de generatoren naar een wat hoger voltage brengen dan de kabels dan de generatoren etc. ). Ook de transformatoren moeten aangepast worden. Daarnaast dient dan een aantal netopeningen gesloten te worden en een aantal kabels die naar de eerste MSR gaan verwijderd te worden om de 20 kV situatie te krijgen. Aan de andere kant dient nu het aantal kilometer kabel uit 'Vision' gehaald te worden, wat ook tijd kost. Hoeveel het verschil tussen dit model en een berekening met Vision werkelijk is moet nog onderzocht worden. Overigens is het mij niet gelukt om data van dataverwerkingsprogramma 'Scada' in 'Vision' te krijgen. Voor het 10 kV net is mijns inziens overigens ook alleen data van het begin van een afgang veld in 'Scada' te vinden en niet voor elke MSR. Wouter Bos zou hiervoor geraadpleegd kunnen worden voor meer helderheid.



## 9. Conclusie

In het verslag is een vergelijking gemaakt tussen een ideale 50/10 kV situatie en een ideale 20 kV situatie. In besluitvorming kan het hierdoor dienen voor een beslissing om naar de ideale 50/10 kV situatie te gaan of naar de ideale 20 kV situatie te gaan. Over het algemeen ligt er op dit moment veel 50/10 kV en wordt er daarom in dit verslag gesproken over vervangen van 50/10 kV. 50/10 kV vervangen naar 20 kV gaat niet in één dag, maar duurt jaren. Daarom is de tussensituatie ook interessant om mee te nemen, hierin zou nog meer onderzoek naar gedaan kunnen worden.

Een belangrijk punt uit het onderzoek is dat het doorslag punt van meer of minder netverliezen per kilometer (als verschil van de twee situaties) onafhankelijk is van het gevraagde vermogen. Zolang het percentage te vervangen hoger is dan het break-even point is er in de 20 kV situatie sprake van minder netverliezen. Het aantal afgaande velden is echter wel belangrijk.

Het model laat zien dat 20 kV leggen in plaats van 50 kV een grote invloed op de netverliezen heeft. Ongeveer 5 keer zoveel 10 kV tot de eerste MSR dient naar 20 kV gebracht te worden om het extra verlies van het vervangen van 50 kV te compenseren. Dit komt voornamelijk omdat er per afgaand veld veel minder vermogen gaat, terwijl in de parallel kabels wel het hele vermogen transporteert. Hierin zijn dan nog niet de transformatoren meegenomen. In de case van Anklaar weegt de winst die behaald wordt met minder transformatoren niet op tegen het verlies van de kabels in de 20 kV situatie. Zeker niet als er misschien in een 20 kV situatie ook nog een regeltransformator nodig is om de spanning op het juiste niveau te houden. Daarnaast levert de 20 kV situatie slechts een beetje minder verlies op na de eerste MSR dan de 10 kV situatie. In de case van Anklaar was dit slechts 0,1kW/km, doordat het om grote afstanden gaat kan dit echter nog weer oplopen.

In de 20 kV case van Anklaar maakt Alliander elk jaar ruim 6800 euro extra kosten aan haar netverliezen, wat bijna drie procent meer is dan de 50/10 kV situatie bij een onevenredige verdeling. Bij een evenredige verdeling is er in de 20 kV situatie elk jaar 15.100 euro aan kosten.

Vanuit het oogpunt van netverliezen is het beter om 50 kV te behouden, het lager aantal transformatoren weegt hier niet tegen op.

## 10. Referenties

- [1] Ihsan Karakoc, Camiel Oremus en Nico Steentjes, B4510 – Beleidsmotivatiedocument, Beleid Middenspanningen 10 kV, 20 kV en 50 KV, 29 mei 2015
- [2] Ihsan Karakoc, Jos Thesselaar, B4500 20 kV toekomstvisie, Continuon, Maart 2008
- [3] Ihsan Karakoc, Jos Thesselaar, B4505 Transitie-strategie naar innovatieve en dynamische elektriciteitsnetten; Februari 2009
- [4] Uit conversaties met Ihsan Karakoc;
- [5] Dominique Hermans, Jelle van Bueren, Bart Festen; Technisch netverlies elektriciteit, Overzicht en aanpak netverliesreductie; November 2013
- [6] Dirk Deygers; Elektrotechniek, Elektrische kabels en leidingen; Wolters Kluwers, 2008
- [7] Phase to phase, excelbestand: 'Types'.
- [8] Nico Steentjes en Ihsan Karakoc, "20150512 Model Vergelijk 10 versus 20kV versie 0 punt 85", Mei 2015
- [9] Uit conversaties met Wouter Bos
- [10] Uit conversaties met Alex Geschiere
- [11] Uit conversaties met René van Etten
- [12] Funda, Buurt Anklaar in Apeldoorn – Cijfers en grafieken [Funda]  
<http://www.funda.nl/ buurtinfo/apeldoorn/anklaar/kenmerken/?ref=48158172>, gecontroleerd op 08-12-12
- [13] Groennet, Kengetallen en uitgangspunten