

# TEKNISK OG ØKONOMISK VURDERING AV 36 KV SOM SYSTEMSPENNING I DISTRIBUTJONSNETTET

Astrid Petterteig<sup>1</sup>, SINTEF Energiforskning AS

## **Sammendrag:**

*Artikkelen vurderer fordeler, ulemper og kostnader ved bruk av 12, 24 og 36 kV systemspenning i distribusjonsnett. For overføringer med kraftledninger viser analysene at 36 kV systemspenning er den tekniske og økonomiske gunstigste løsning. Dette til tross for høye komponentkostnader pga lave produksjonsserier. For kabler viser analysene at 24 kV i de fleste tilfeller er den gunstigste systemspenningen. Når belastningstettheten blir svært stor kan 36 kV systemspenning være aktuelt. Tapkostnader og innsamlede kostnader for ulike typer utstyr er lagt til grunn for konklusjonene. I tillegg vurderes spenningsfall ved ulike løsninger.*

## **1. INNLEDNING**

I arbeidet som artikkelen bygger på [1], var målsetningen å vurdere fordeler, ulemper og kostnader ved en økning av systemspenningen i distribusjonsnett til 36 kV. En slik spenningsøkning er ikke realistisk i eksisterende nett. Resultatene viser imidlertid at ved nybygging er 36 kV et spenningsnivå som bør vurderes.

Resultatene viser også at dagens 12 kV nett ikke er optimalt verken med hensyn til investeringskostnader, tap eller spenningsfall. Dette gjelder både luft- og kabelnett og denne konklusjonen ser ut til å være nærmest uavhengig av nettets utstrekning og last.

For alle aktuelle systemspenninger vises det (Kap. 3-4) eksempler på:

- priser for kraftledninger
- optimalisert overføringsevne som funksjon av ledertverrsnitt
- relative tap som funksjon av tverrsnitt
- spenningsfall som funksjon av tverrsnitt
- totale investerings- og tapkostnader som funksjon av last og nettets utstrekning
- spenningsfall som funksjon av last og nettets utstrekning

---

<sup>1</sup> Basert på et arbeid av Lars Rolfseng for SINTEF-prosjektet "Distribusjonsnett 2020" ([http://www.energy.sintef.no/Prosjekt/Distribution\\_2020/index.asp](http://www.energy.sintef.no/Prosjekt/Distribution_2020/index.asp)).

Prosjektet er finansiert av Forskningsrådet, med ABB som hovedsponsor og støttet av Hafslund, TEV, Helgelandskraft, NTE, Siemens og Nortroll.

## 2. KONSEKVENSER VED OVERGANG FRA 12/24 TIL 36 KV

### 2.1 Fordeler og ulemper ved bruk av 36 kV

Fordelene ved bruk av 36 kV i forhold til 12 eller 24 kV er:

- Økt overføringsevne/ytelse ved samme overføringstverrsnitt.
- Overføring av samme effekt med lavere ledertverrsnitt.
- Reduserte tap ved samme overført effekt.
- Redusert spenningsfall ved samme overførte effekt.
- Økt systemspenning kan enkelt tas i bruk ved nybygging av større områder, byggefelt og bydeler.

Ulemper ved bruk av 36 kV i forhold til 12 eller 24 kV er:

- Ekstra komponentkostnader pga lave produksjonsvolum.
- Økte isolasjonsavstander.
- Feilfrekvensene for skjøter og endeavslutninger øker i forhold til 12 kV, men forventes ikke å øke i forhold til 24 kV.
- Et nytt spenningsnivå som krever ekstra lagerbehov i en overgangsperiode.
- Økt behov for lokalt lager av reservedeler og komponenter p.g.a. dårligere tilgang på kommersielt 36 kV.
- Kostbart å innføre i områder som allerede er delvis utbygd.

Økte feltpåkjenninger øker feilfrekvensene for skjøter og endeavslutninger for 24 kV sammenlignet med 12 kV. Feilfrekvensene for skjøter og endeavslutninger for 36 kV forventes imidlertid å bli de samme som for 24 kV. Den elektriske feltgradienten for 12 kV skjøter og endeavslutninger er så lave at det normalt ikke oppstår feil ved 12 kV. Ved høyere spenninger som 24 kV er problemene merkbare og dette bidrar til økte feilfrekvenser. For 36 kV skjøter og endeavslutninger er de tekniske løsningene slik at det ikke forventes større feilfrekvenser enn for 24 kV.

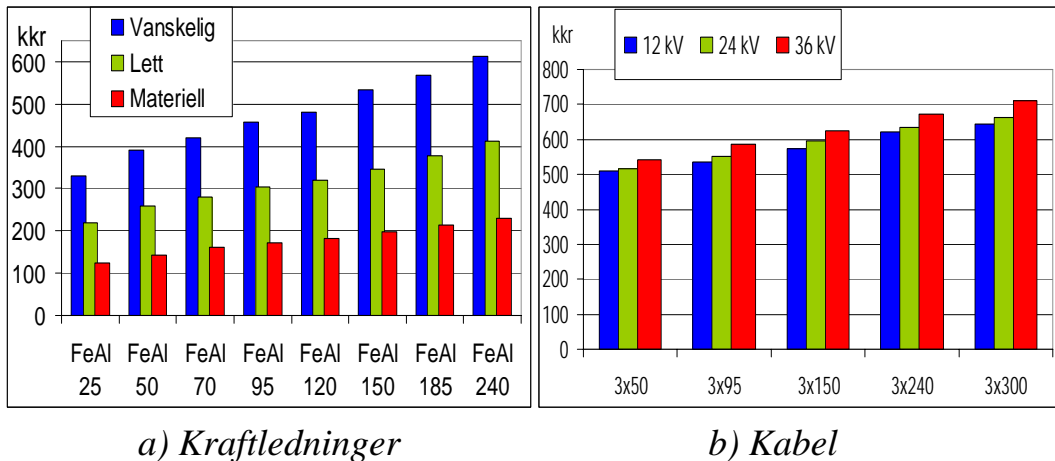
### 2.2 Kostnader ved overgang fra 12/24 til 36 kV

Kostnaden til krafttransformator for en gitt ytelse anslås å bli *tilnærmet uendret*. Kraftledninger kan benytte samme faseavstand og avstand over bakken som for 24 kV systemspenning, kostnader til isolatorer øker, mens økonomisk tverrsnitt reduseres og prisforskjellen ved overgang fra 24 kV til 36 kV er *neglisjerbar* for selve kraftledningen. Flere relative kostnadsforskjeller er gitt i Vedlegg.

### 3. KOSTNADER OG HENSYN VED VALG AV ANLEGG

#### 3.1 Kostnader og optimalt ledertverrsnitt for linjer og kabler

Kostnadsnivået for kraftledninger er tilnærmet uavhengig av systemspenning og vil kun avhenge av linjetype og tverrsnitt. Figur 1 viser faktiske investeringskostnader som funksjon av tverrsnitt.



Figur 1 Priser på 12, 24 og 36 kV som funksjon av tverrsnitt. Referert prisnivå for 2005<sup>2</sup>. Inkludert arbeidskostnader.

Optimalt tverrsnitt for en kraftledning eller kabel kan finnes når både investeringskostnad og tap er kjent som funksjon av tverrsnittet. Optimalt tverrsnitt er det tverrsnittet som gir minimum total kostnad. Når det forutsettes en lineær økning av investeringskostnadene som funksjon av tverrsnitt kan følgende formel benyttes for beregning av optimal strømtetthet:

$$\frac{I_{opt}}{A} = \sqrt{\frac{k_{tv}}{3 \cdot \rho \cdot 10^{-3} k_{pekv} \cdot \lambda_{6,30}}} = 1,14 \text{ A/mm}^2 \quad (\text{for kraftledning})$$

Gradienten  $k_{tv}$  er bestemt av kostnadskurver (1,28 kkr/mm<sup>2</sup>/km i gjennomsnitt for en middels vanskelig kraftledning, jf. Figur 1).  $\rho$  er spesifikk ledningsevne, som er 18,2  $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$  for kopper (kraftledning) og 30  $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$  for aluminium (kabel).  $\lambda_{6,30}$  er kapitaliseringsfaktoren ved 6 % realrente og økonomisk levetid på 30 år. Ekvivalent tapskostnad,  $k_{pekv}$ , er på 1300 kr/kW,år.

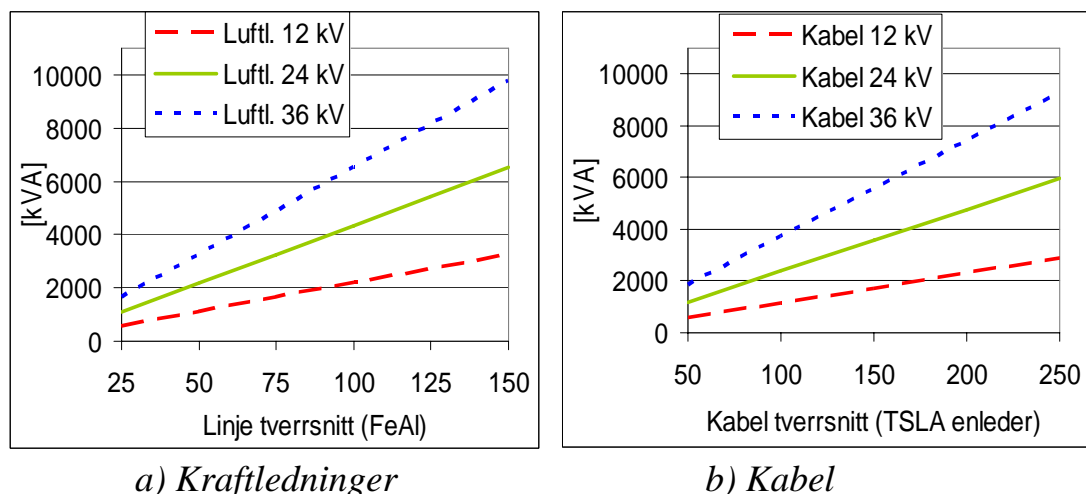
<sup>2</sup> Ved beregning av kostnader til kabel eller kraftledninger benyttes priser som er spesifiserte i SINTEF Energiforsknings kostnadskatalog for 2005 i Planleggingsbok for kraftnett.

For kraftledninger viser beregningene at optimal strømtetthet er  $1,14 \text{ A/mm}^2$ . Beregningene viser at optimal strømtetthet for 12 – 36 kV kabler øker fra  $0,6 \text{ A/mm}^2$  ved 12 kV til  $0,65 \text{ A/mm}^2$  ved 36 kV. Figur 2 viser hvordan den optimaliserte overføringsevnen ( $S = \sqrt{3} UI_{\text{opt}}$ ) varierer med tverrsnitt og spenningsnivå for kraftledninger (FeAl) og kabler (TSLE enleder).

Figur 2 viser at samme overføringsevne kan opprettholdes med en betydelig tverrsnittreduksjon når spenningen økes. En 12 kV kraftledning med tverrsnitt FeAl nr 150 har en optimalisert overføringsevne på rundt 3 MW, tilsvarende en 24 kV kraftledning med tverrsnittet FeAl nr 70 eller en 36 kV kraftledning FeAl nr 50. Tilsvarende har en  $240 \text{ mm}^2$  Al kabel ved 12 kV samme optimaliserte overføringsevne som en 24 kV kabel med omkring det halve tverrsnittet ( $120 \text{ mm}^2$ ) eller omkring en tredjedel av tverrsnittet ( $70 \text{ mm}^2$ ) for en 36 kV kabel.

Prismessig betyr dette at for en kraftledning i middels vanskelig som skal overføre 3 MW, vil kostnadene ved valg av 24 kV ( $70 \text{ mm}^2$  til 353 kkr/km) bli 19 % lavere enn ved valg av 12 kV ( $150 \text{ mm}^2$  til 434 kkr/km).

Med samme tverrsnitt har en 24 kV og en 36 kV kraftledning henholdsvis dobbelt så stor og tre ganger så stor overføringsevne sammenlignet med en 12 kV kraftledning. For kabler øker den optimaliserte overføringskapasiteten litt mer enn forholdstallet mellom systemspenningene. Dette er på grunn av den svakt økende optimale strømtettheten ved økende spenning.



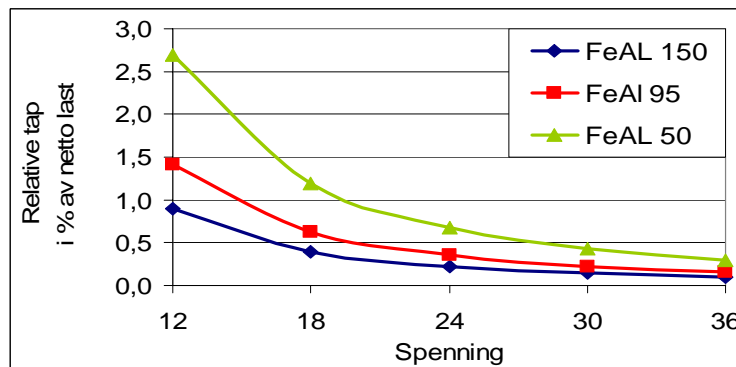
Figur 2. Optimalisert overføringsevne for 12, 24 og 36 kV som funksjon av tverrsnitt. Prisnivå for 2005.

### 3.2 Tap og spenningsfall som funksjon av spenningsnivå

Tapene i en trefase kraftledning eller kabel er:

$$\Delta P = 3RI^2 = 3R \frac{P^2}{3U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{RP^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = konst \frac{1}{U^2 A}$$

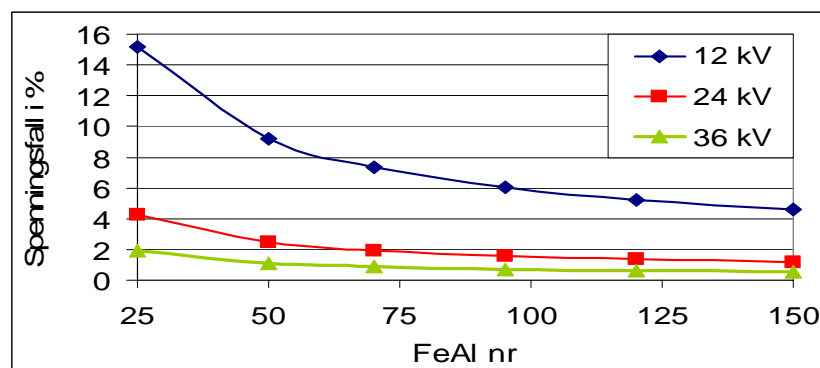
Tapene er med andre ord omvent proporsjonalt med tverrsnittet (A) og omvent proporsjonalt med spenningen i kvadrat. Dette er vist Figur 3 nedenfor for en 10 km kraftledning som overfører 1 MW ved hhv. 12, 24 og 36 kV med FeAl nr. 50, 95 og 150.



Figur 3 Relative tap for en kraftledning som funksjon av tverrsnitt og spenning ved 1 MW overført over 10 km ( $\cos \phi = 0,97$ ).

Figur 4 viser hvordan relativt spenningsfall i prosent varierer avhengig av tverrsnitt og spenningsnivå for en overføring av 3 MW over en 10 km lang kraftledning. I dette tilfellet er optimalt tverrsnitt for 12 kV FeAl nr 120. Tilsvarende tverrsnitt med 24 kV ligger i området mellom FeAl nr 50 og 70 og for 36 kV er det optimale tverrsnittet mellom FeAl nr 25 og 50. Spenningsfallene for disse tverrsnittene er:

- drøye 5 % for FeAl nr 120 ved 12 kV
- omkring 2 % for FeAl 50 – 70 ved 24 kV
- omkring 1,5 % for FeAL 25 – 50 ved 36 kV



Figur 4 Spenningsfall ved overføring av 3 MW ( $\cos \phi = 0,95$ ) i en 10 km kraftledning som funksjon av tverrsnitt og spenningsnivå.

## 4. KOSTNADSSAMMENLIGNINGER

### 4.1 Eksempel

For å kunne sammenligne kostnaden for 12, 24 og 36 kV anlegg tas det utgangspunkt i et forenklet eksempel med en avgang som vist i Figur 5. Eksempelavgangen har like lange seksjoner og lik last per seksjon. Hver avgang har en effektbryter og 2 skillebrytere plassert i hovedtransformatorstasjonen.

For kabelnett er det beregninger gjort med:

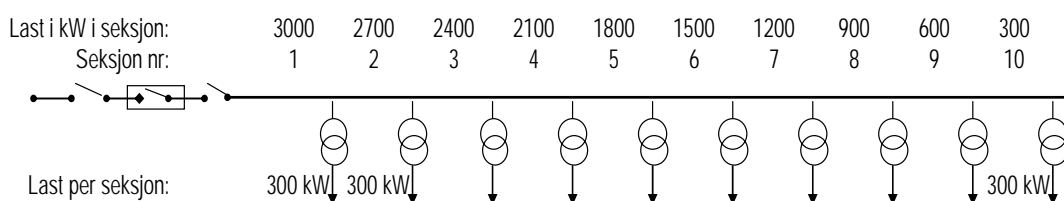
- 10 seksjoner<sup>3</sup>
- 300 - 1500 kW sammenlagret last per nettstasjon ( $\cos\phi = 0,95$ )
- 500 m og 1000 m avstand mellom nettstasjonene
- total last 3 - 15 MW
- total lengde 5 eller 10 km

I kabelnettet er det medregnet totalt 21 kabelskjøter og i tillegg til nettransformator er det medregnet et ringkabelanlegg (RMU) med 3 kabelavganger og 3 kabelavslutninger per nettstasjon.

For luftnett er det beregninger gjort med:

- 20 seksjoner
- 100 - 500 kW sammenlagret last per nettstasjon/trafo
- 500 m og 2000 m avstand mellom nettstasjonene
- total last 2 - 10 MW
- total lengde 10 eller 40 km

I luftnettet er det i tillegg til de to skillebryterne som er vist i Figur 5 medregnet fem skillebrytere for radialavganger.



Figur 5 Avgang med 10 nettstasjoner og totalt 3000 kW last.

<sup>3</sup> Det antas at en typisk kabelring i normal drift er åpen på midten, men at begge halvdelene av ringen må kunne mates fra en side i tilfelle feil. Kabelverrsnitt er derfor beregnet ut fra at avgangen skal kunne forsyne 20 seksjoner.

## 4.2 Totale kostnader som ulike valg av systemspenning

Basert på innsamlede data [1] beregnes totale kostnader ved ulike anlegg for 12, 24 og 36 kV systemspenning. Disse totale kostnadene inkluderer investeringskostnader (materieell, graving og lignende) samt kostnader til effekttap, se eksempel på oppsummering av de ulike kostnadspostene i Tabell 1. Det benyttes 6 % realrente, en økonomisk levetid på 30 år og en ekvivalent tapskostnad på 1300 kr/kW,år. I alle eksemplene er det valgt optimalisert ledertverrsnitt og optimalisert ytelse på fordelingstransformator.

Det er sett på hvordan kostnadene for de ulike spenningsnivåene påvirkes av økt effekt ved at lasten i nettstasjonene er variert mens avstand mellom nettstasjonene holdes konstant. Det er også undersøkt hvordan kostnadene påvirkes av nettets utstrekning ved å øke avstanden mellom nettstasjonene og gjøre tilsvarende beregninger for dette nettet. Resultatene for kabelnett er vist i Figur 6. Resultatene for luftnett er vist i Figur 7.

Figur 6 viser at for kabelnett kommer 12 kV systemet dårligst ut både for 500 m (a) og 1000 m (b) avstand mellom nettstasjonene, spesielt når lasten øker. Dette skyldes økte tapskostnader. Med 500 m mellom nettstasjonene er kostnadene for 24 kV systemet lavest opp til drøye 1300 kW last pr. nettstasjon og viser at 24 kV systemet innenfor et realistisk lastområde er billigst. Økes avstanden mellom nettstasjonene blir 24 og 6 kV alternativene svært like over et stort lastområde opp i ca 1300 kW før 36 kV alternativet blir merkbart rimeligere. På grunn av tapskostnadene er 12 kV alternativet i økende grad ugunstig med økende last.

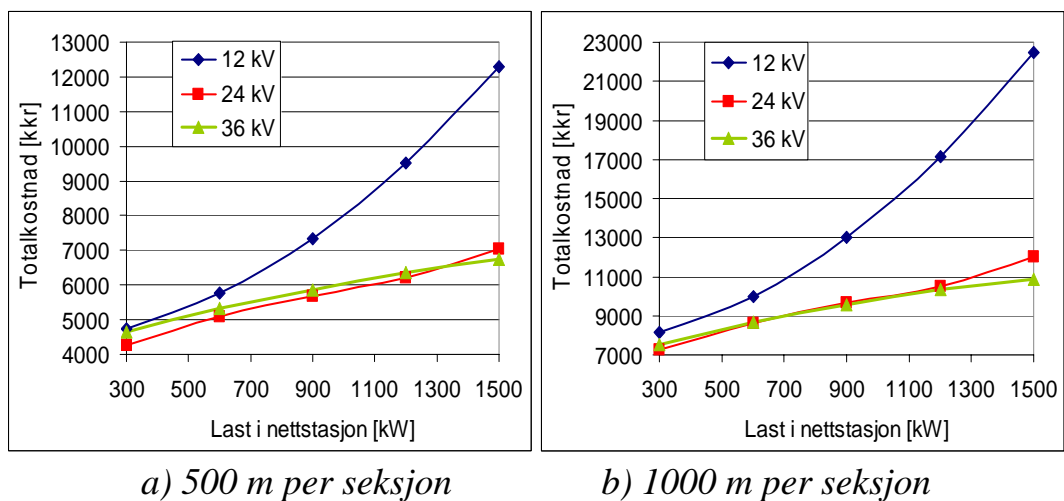
*Tabell 1 Kostnader i kkr ved ulike systemspenninger.*

*Kabelavgang med total lengde 5 km og total last 3 MW.*

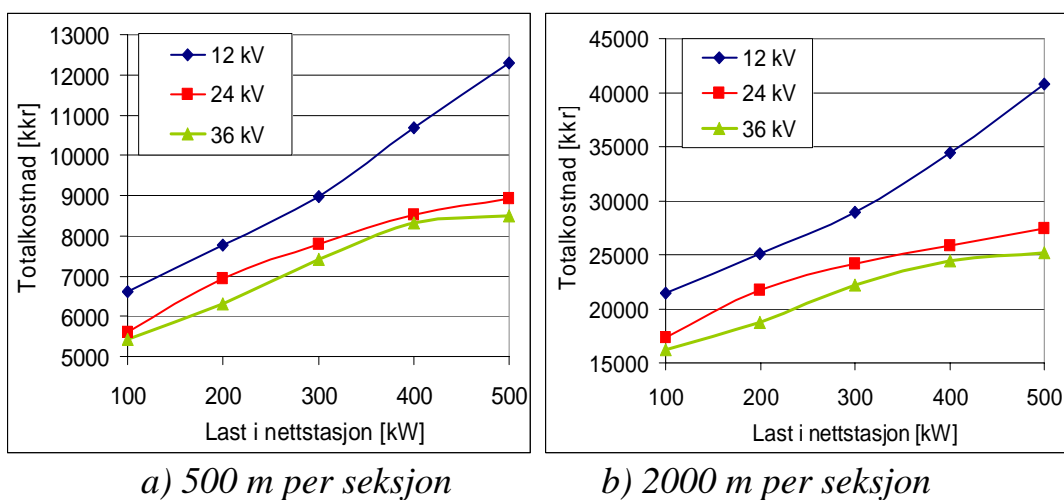
*Luftlinjeavgang med total lengde 10 km og total last 2 MW.*

Kostnader til:	Kabelavgang			Avgang med kraftledning		
	12 kV	24 kV	36 kV	12 kV	24 kV	36 kV
Totale tap, 30 år	568	224	189	230	112	67
Kabel/Kraftledning (km)	2875	2750	2710	4700	3800	3530
Effektbryterarrangement	143	160	247	125	125	132
RMU, Kabelavsl. & skjøter	688	688	1014			
Skillebrytere & sikringer				624	624	716
Fordelingstrafo	450	450	484	940	940	978
<b>Totale kostnader [kkr]</b>	<b>4724</b>	<b>4272</b>	<b>4644</b>	<b>6619</b>	<b>5601</b>	<b>5423</b>
Maks. spenningsfall [%]	0,9	0,4	0,3	1	0,4	0,2

For luftnett med 500 m avstanden mellom nettstasjonene gir 36 kV systemet lavest total kostnad, men når lasten øker vil alle systemene etter hvert benytte høyeste tverrsnitt (FeAl 240). I dette tilfelle vil de totale anleggskostnadene være høyest for 36 kV systemet pga høyeres kostnad for effektbryter, skillebrytere, sikringer og fordelingstransformatorer. Forskjellen i tapskostnadene gir uansett lavest kostnad for 36 kV systemet når avstanden mellom nettstasjonene er 500 m (Figur 7a). Hvis avstanden mellom nettstasjonene øker til 2000 m og lasten i nettstasjonene varieres innenfor samme område blir resultat som vist i Figur 7b. I dette tilfelle blir problemet med spenningsfall fremtredende. Dette er vist i Figur 8.



Figur 6 Utbyggingskostnader for kabelnett som funksjon av belastning i nettstasjoner med ulike systemspenninger og med ulik avstand mellom nettstasjonene.



Figur 7 Utbyggingskostnader for luftnett som funksjon av belastning i nettstasjoner med ulike systemspenninger og med ulik avstand mellom nettstasjonene.

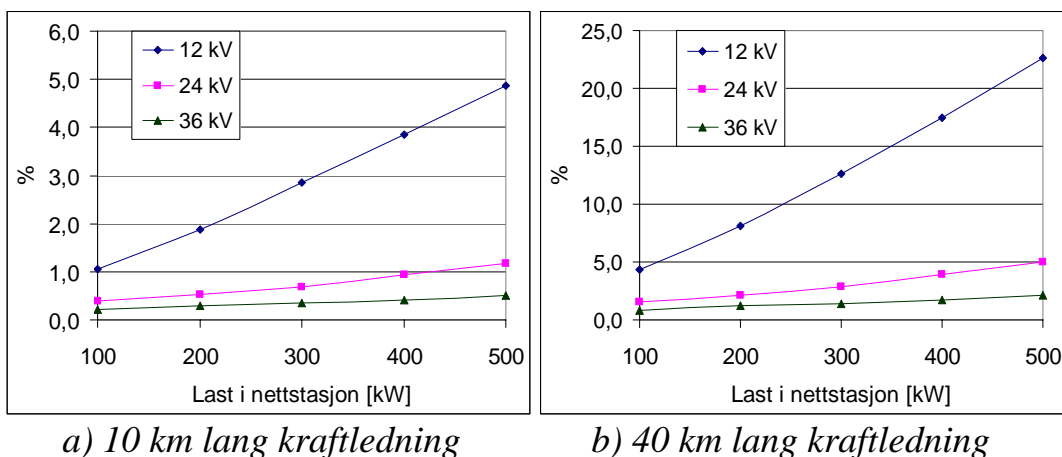


### 4.3 Spenningsfall ved ulike valg av systemspenning

For kabelnett viser en kontroll av spenningsfall at disse er relativt lave og ikke utgjør noe praktisk problem for alle spenningsnivåene med denne lastvariasjonen. For en last i nettstasjonene lik 1500 kW og med avstand mellom nettstasjonene på 1000 m er spenningsfallet:

Spenningsnivå:	11 kV	22 kV	33 kV
Spenningsfall i %:	5,4	1,3	0,6

Figur 8 viser spenningsfall i en 10 km og i en 40 km kraftledning som funksjon av spenning og last i 20 nettstasjoner. For kraftledning er det tydelig at verken 24 kV og 36 kV har spenningsfallsproblemer av betydning. I 12 kV tilfellet er spenningsfallet nesten 5 % ved 500 kW last per nettstasjonene i det 10 km lange nettet. Figur 8b viser at 12 kV systemet spenningsmessig ikke er egnet for laster og avstander slik som dette tilfellet med 2000 m mellom nettstasjonene. Ved 500 kW last i nettstasjonene har 12 kV systemet et spenningsfall på ca 23 %, mens 24 kV systemet et spenningsfall på 5 %, og 36 kV systemet har et spenningsfall som er under det halve av det igjen.



Figur 8 Spenningsfall som funksjon av spenningsnivå i luftnett med 20 like seksjoner á 500 m (a) og 2000 m (b).

### 4.4 Konklusjon/anbefalinger

Hvis man kunne starte på ny i dag og velge systemspenninger ville det vært naturlig å velge 24 og/eller 36 kV systemspenning i distribusjonsnettet. Ut fra de begrensede analysene som er utført i dette prosjektet anbefales det at det ved nybygging vurderes å se nærmere på mulighetene for gå over fra 12/24 kV til 36 kV systemspenning for kraftledninger. Det bør også ved nybygging vurderes å se nærmere på mulighetene for gå over fra 12 kV til 24 kV

(eventuelt 36 kV) systemspenning for kabler. Den gunstig virkningen en eventuell økt omsetning av 36 kV materiell kan få på prisnivået vil være en vesentlig faktor i slike vurderinger.

## REFERANSER:

- [1] Rolfseng, Lars, 2006, Vurdering av 36 kV som systemspenning, SINTEF Energiforskning, Teknisk rapport TR F6281 (fortrolig), Mars 2006, 21 sider.

## VEDLEGG:

Sammenstilling av kostnader for 12-24-36 kV distribusjonsnett basert på informasjon fra leverandører i 2005 [1]:

Anleggstype/del	Prisnivå i %		
	12 kV	24 kV	36 kV
Nedtransformering 72,5-145/12-36 kV	100	100	100
Kraftledninger (likt tverrsnitt)	100	100	101
Isolatorer	100	100	115
Kabler ≤ Al 95 TSLE	100	110	143
> Al 95	100	110	132
Kabelavslutning	100	100	120-125
Kabelskjøt	100	100	140
Fordelingstransformatorer	100	100	105 - 110
Tilleggs kostnad for omkoppelbar trafo 24-36 kV/400V			10 – 15 %
Ringkabelanlegg (RMU)	100	100	155
Effektbryterfelt	100	112	173
Effektbryterfelt (SF <sub>6</sub> -isolert)	100	100	140
Mastemontert effektbryter	100	100	104
Lastbryter luftisolert, innendørs	100	100	?
Skillebryter i mast	100	100	120
Sikringer	100	100	150
Avledere	100	100	200
Gnistgap	100	100	100