

SINTEF Energi AS  
Postadresse:  
Postboks 4761 Torgarden  
7465 Trondheim  
Sentralbord: 73597200

energy.research@sintef.no  
www.sintef.no/energi  
Foretaksregister:  
NO 939 350 675 MVA

# Prosjektnotat

## Brukerhåndbok Kabelsimulator

**VERSJON**

1.0

**DATO**

2018-06-28

**FORFATTER(E)**

Kristian Thinn Solheim

**OPPDRAGSGIVER(E)**

REN AS

**OPPDRAGSGIVERS REF.**

Kåre Espeland

**PROSJEKTNR**

50200654

**ANTALL SIDER:**

25

**SAMMENDRAG**

Denne brukerhåndboken gir en innføring i hvordan belastningsverktøyet er bygget opp og hvordan det brukes. Eksempler på bruk av programmet er gitt i de to siste kapitlene.

**UTARBEIDET AV**

Kristian Thinn Solheim

**SIGNATUR****GODKJENT AV**

Espen Eberg

**SIGNATUR****PROSJEKTNOTAT NR**

AN 18.14.33

**GRADERING**

Fortrolig

# Historikk

---

<b>VERSJON</b>	<b>DATO</b>	<b>VERSJONSBEKRIVELSE</b>
1.0	2018-06-28	Laget for Kabelsimulator versjon 1.

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>INTRODUKSJON</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>PROGRAMMET PÅ 1-2-3</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>VERKTØYETS OPPBYGGING</b> .....	<b>6</b>
3.1	Hovedskjerm .....	6
3.2	Grøftesnitt.....	7
3.3	Knapperad.....	8
3.4	Kabelgrupper, grøft og omgivelser .....	9
3.5	Kabler (materialer).....	10
3.6	Forlegning .....	11
3.6.1	Lysåpning .....	12
3.7	Rør.....	13
3.8	Kabler (geometri).....	14
3.9	Grafikk.....	15
3.10	Resultater .....	16
3.11	Beregningsdata .....	17
3.12	Rapportfunksjon .....	18
<b>4</b>	<b>ELEKTRISKE OG TERMISKE PARAMETERE</b> .....	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>FORMLER</b> .....	Error! Bookmark not defined.
<b>6</b>	<b>EKSEMPEL 1: ENKEL GRØFT</b> .....	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>EKSEMPEL 2: AVANSERT GRØFT</b> .....	<b>23</b>

## 1 INTRODUKSJON

*Prosjektet Økning av belastningsevnen til jordkabler er et innovasjonsprosjekt for næringslivet (IPN) med REN som prosjekteier, hvor SINTEF Energi og flere norske industri- og nettselskaper deltar. Prosjektets målsetning er å bidra til økt utnyttelse og pålitelighet i det norske kabelnettet. Belastningsevneprogrammet er et resultat av dette prosjektet.*

Denne brukerhåndboken gir en kort innføring i hvordan belastningsverktøyet fungerer ved å gå igjennom menyene og funksjonene som finnes. Det er laget to eksempelgrøfter i de siste kapitlene. Programmet kjøres på en server hos REN, hvor også alle filene lagres. Simuleringstid og lagringsplass er dermed uavhengig av brukerens maskinvare.

Beregningsmodulen er basert på programvaren *COMSOL Multiphysics*, hvor elementmetoden brukes for å løse fysiske modeller. I kabelsimulatoren brukes elektromagnetiske og termiske ligninger for å beregne kablernes belastningsevne. Konveksjon i rør beregnes ut ifra empiriske formler utviklet i dette prosjektet. Dette gjøres uten behov for dyptgående kunnskap om numerisk analyse og termisk modellering. Kabeltemperatur regnes ut i fra valgt, påtrykt strøm. Alle beregninger gir stasjonære verdier.

Programmet er fleksibelt og har stor valgfrihet med tilpasning av grøftesnippet, kabler og materialegenskaper.

### **Grøftesnitt:**

Kabler kan forlegges i jordsmonn, rør og betongkanal, og i trekant eller flat forlegning. Lysåpningen mellom kabelgruppene, grøftens vinkel, overdekning og fundamentstørrelse er noen av verdiene som kan endres.

### **Kabler:**

Flere kabeltyper er lagt inn i programmets bibliotek, men egne kan også legges inn. Materialer og dimensjon på leder, skjerm, isolasjon og ytterkappe kan modifiseres.

### **Elektrisk og termisk:**

Bakketemperatur kan endres og termisk ledningsevne i lednings- og gjenfyllingssone kan settes individuelt. Skjerm kan velges åpen eller lukket.

### **Resultater:**

Temperatur, effektutvikling i kabel, magnetisk induksjon, impedans og total overføringsevne er noen verdier som regnes ut.

## 2 PROGRAMMET PÅ 1-2-3

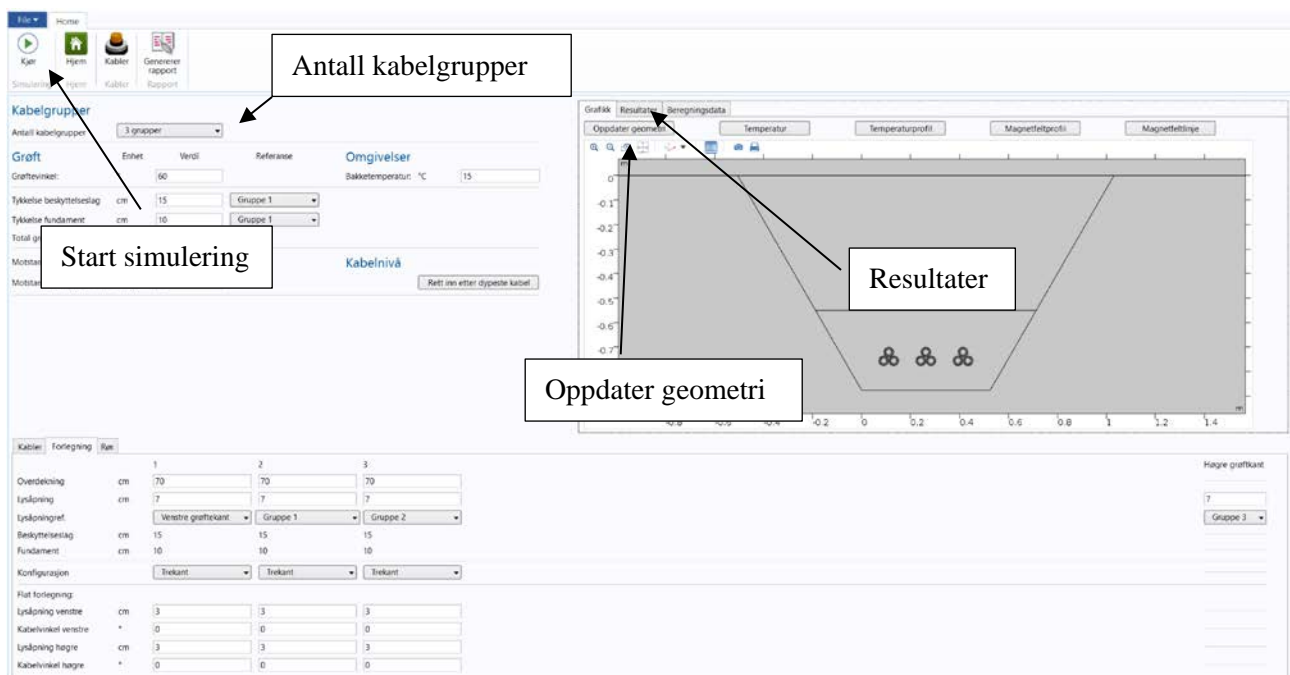
En eksempelgrøft åpnes når programmet startes. Denne eksempelgrøften består av 3 kabelgrupper forlagt i trekantforlegning, som vist i Figur 2-1. Gjør ønskede endringer, som å forandre antall kabler, forlegning, lysåpning, og strømpåtrykk. Når det gjøres endringer må geometrien oppdateres. Trykk på "oppdater geometri" for å gjøre dette. Start deretter beregningene ved å trykke på "Kjør" (▶) i knapperaden.

Etter at beregningene er gjennomført vil temperaturprofilen i grøften vises. Temperaturen beregnes ut ifra valgt strømpåtrykk i kablene. Grafer for magnetisk induksjon kan vises, hvor utredningsnivået på  $0.4 \mu\text{T}$  er indikert. I resultattabellen vises blant annet overføringskapasitet, tap i ledere og skjerm, impedans og ledertemperatur.

En enkel rapportmal genereres ved å trykke på "generer rapport" (📄), Denne inneholder de samme resultatene og figurene som vises i hovedskjermen.

For å legge til eller se de innebyggede kabeltypene, trykk på fanen "Kablene – se eller legg til nye", (🔧).

Best brukeropplevelse fås ved skjermopløsning på minimum  $1920 \times 1080$  piksler, og med få toolbars, bokmerkerader eller lignende i nettleseren. Chrome anbefales som nettleser.



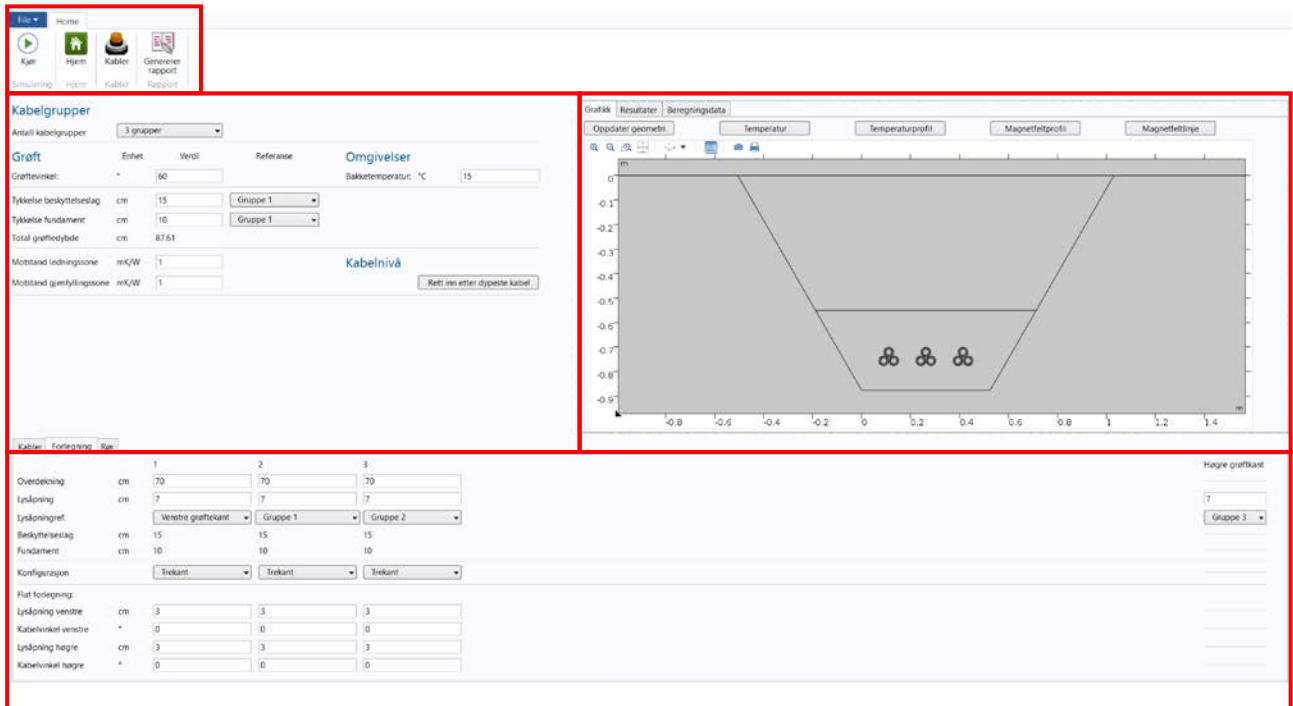
Figur 2-1: Eksempelgrøft som vises ved oppstart. Grøften kan tilpasses eller brukes som den er.

### 3 VERKTØYETS OPPBYGGING

#### 3.1 Hovedskjerm

Verktøyets hovedskjerm er delt inn i fire deler. Disse er forklart i de kommende avsnittene. Programmet styres fra hovedskjermen. Her må kabeltyper, geometrier, elektriske og termiske verdier fylles inn. Resultater, oversikt over grøftesnitt og grafikk vises også her.

<p>Knapperad</p> <p>Kabelgrupper, grøft og omgivelser</p> <p>Kabel- og rørparametere</p> <p>Grafikk, resultater og beregningsdata</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hovedfunksjoner: Kjøre simulering, returnere til hovedskjerm, endre kabelgeometri og generere rapport.</li> <li>- Antall kabler, omgivelsestemperatur og grøftens størrelse og termisk motstand.</li> <li>- Kablenes materialegenskaper, strømpåtrykk, kabelforlegning og rørgometri</li> <li>- Grøftesnitt, grøftetemperatur, magnetisk induksjon, resultater og beregningsdata</li> </ul>
---	--

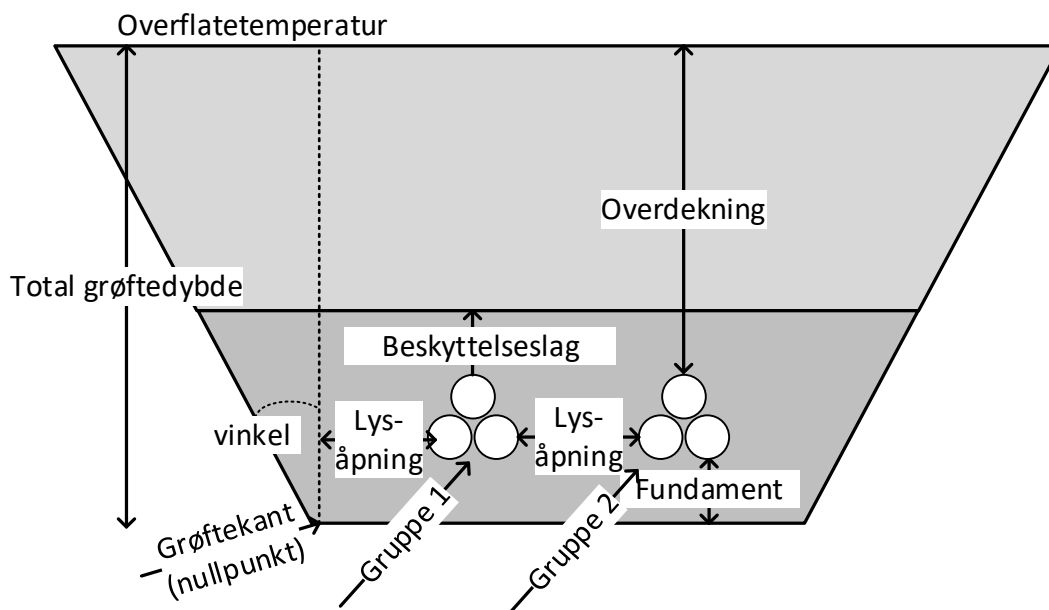
The screenshot shows the software interface with several sections:

- Knapperad (Top):** A menu bar with icons for 'Kjør', 'Hjem', 'Kabler', and 'Generer rapport'.
- Kabelgrupper (Left):** A section for defining cable groups, including 'Antall kabelgrupper' (3 grupper) and 'Omgivelser' (Bakketemperatur: 15 °C).
- Grøft (Left):** A section for defining trench parameters like 'Grøftevinkel' (60), 'Tykkelse beskyttelselag' (15 cm), and 'Tykkelse fundament' (10 cm).
- Kabelnivå (Left):** A section for defining cable levels with 'Mottasid ledningsåpning' and 'Mottasid gjenfyllingsåpning'.
- Grafikk (Right):** A cross-section diagram showing a trench with three cables at the bottom. The y-axis represents depth in meters (0 to -0.9), and the x-axis represents width in meters (-1.0 to 1.4).
- Kabler (Bottom):** A table for defining cable parameters for three groups.

### 3.2 Grøftesnitt

Notasjonen på geometriske avstander er vist i grøftesnippet. Referansepunkt i vertikal retning er på bakkenivå. Referansepunktet i horisontal retning er fra venstre grøftekant, indikert med en stiplet linje.

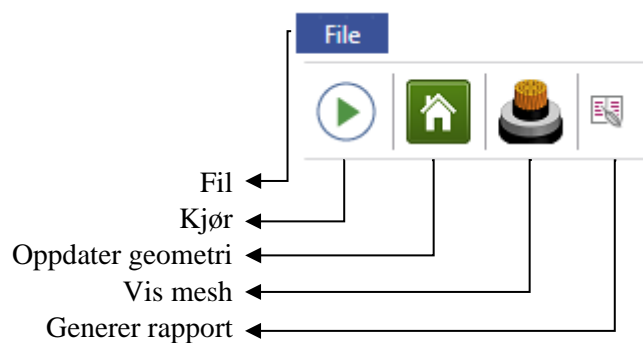
Alle kabelgruppene nummereres fra 1-10, fra venstre til høyre. Det er posisjon fra programmets oppstart som er gjeldende.



### 3.3 Knapperad

Knapperaden består av følgende:

- |         |   |  |
|---------|---|--|
| Fil     | - | Lagre filen eller avslutte programmet                                |
| Kjør    | - | Starter beregningene   |
| Hjem    | - | Tilbake til hovedskjerm.   |
| Kabler  | - | Viser meny for innebygde og egenkonstruerte kabler, se kapittel 4.8. |
| Rapport | - | Genererer rapport i Microsoft Word-format. Se kapittel 4.12.         |

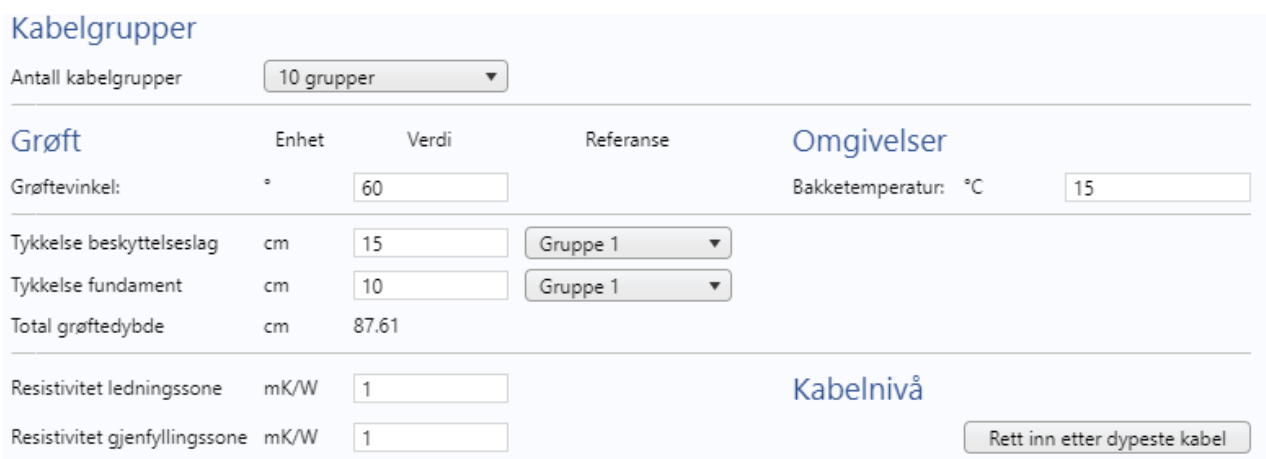




### 3.4 Kabelgrupper, grøft og omgivelser

Verdiene som finnes i denne menyen, se Figur 4-2, er.

- |                                      |   |  |
|--------------------------------------|---|--|
| Antall kabelgrupper                  | - | Velg antall kabelgrupper, fra 1 til 10.  |
| Grøftvinkel                          | - | Vinkel på grøft. Kan velges fra 30° til 90°.   |
| Tykkelse beskyttelseslag             | - | Tykkelse på ledningssonen over toppunkt på valgt kabel (referanse).                        |
| Tykkelse fundament                   | - | Tykkelse på ledningssonen under valgt kabelgruppe (referanse).                             |
| Total grøftedybde                    | - | Gjenfyllingssone og ledningssone totale tykkelse.  |
| Termisk motstand ledningssone        | - | Termisk motstand i ledningssone. Velg en forhåndsdefinert verdi, eller skriv inn egen.     |
| Termisk motstand gjenfyllingssone    | - | Termisk motstand i gjenfyllingssone. Velg en forhåndsdefinert verdi, eller skriv inn egen. |
| Bakketemperatur                      | - | Fast (isoterm) temperatur på bakken. 15°C brukes ofte i standarder og belastningstabeller. |
| Rett inn etter dypeste kabel (knapp) | - | Retter inn alle kabelgruppene etter dypeste kabel.   |



The screenshot shows a software interface with the following sections:

- Kabelgrupper:** A dropdown menu set to "10 grupper".
- Grøft:** A table with columns for parameter name, unit, value, and reference.
 

Grøft	Enhet	Verdi	Referanse
Grøftvinkel:	°	60	
Tykkelse beskyttelseslag	cm	15	Gruppe 1
Tykkelse fundament	cm	10	Gruppe 1
Total grøftedybde	cm	87.61	
- Omgivelser:** A field for "Bakketemperatur: °C" with a value of 15.
- Kabelnivå:** A button labeled "Rett inn etter dypeste kabel".
- Resistivitet:** Two fields for "Resistivitet ledningssone" and "Resistivitet gjenfyllingssone" both with units of mK/W and a value of 1.

Figur 4-1: Skjermdump av menyene kabelgrupper, grøft og omgivelser

### 3.5 Kabler (materialer)

Verdiene som finnes i denne menyen, se Figur 4-3, er.

- |                |  |
|----------------|--|
| Strømpåtrykk   | - RMS-verdi av påtrykt strøm i kabelen   |
| Kabeltype      | - Velg kabeltype.  |
| Driftsspenning | - RMS-verdi. Brukes til å beregne overføringskapasitet og di-elektriske tap. Standard verdi er lik kablernes isolasjonsnivå, så dette må settes lik driftsspenningen i anlegget.   |
| Lukket skjerm  | - Angir om skjermen er åpen eller lukket.  |
| Leder          | - Velg ledermateriale fra liste eller skriv inn egendefinert ledningsevne. Tillatt verdi er mellom $1 \cdot 10^6$ og $1 \cdot 10^8$ S/m.   |
| Isolasjon      | - Velg isolasjonsmateriale fra liste.  |
| Skjermtråder   | - Velg materiale på skjermtrådene fra liste eller skriv inn egendefinert ledningsevne. Tillatt verdi er mellom $1 \cdot 10^6$ og $1 \cdot 10^8$ S/m. Dersom arealet for denne skjermen er lik 0 vil ikke materialvalg påvirke resultatene. |
| Laminat        | - Velg materiale på laminatet fra liste eller skriv inn egendefinert ledningsevne. Tillatt verdi er mellom $1 \cdot 10^6$ og $1 \cdot 10^8$ S/m. Dersom arealet for denne skjermen er lik 0 vil ikke materialvalg påvirke resultatene.     |
| Ytterkappe     | - Velg materiale på ytterkappe fra liste.  |

Kabler	Forlegning	Rør
		1
Strømpåtrykk	A	200
Kabeltype		TSLF12kV3x400A/35
Driftsspenning	kV	12
Lukket skjerm		<input checked="" type="checkbox"/> Ja
Leder	S/m	Aluminium
Isolasjon	W/mK	PE og PEX
Skjermtråder	S/m	Kobber
Laminat	S/m	Aluminium
Ytterkappe	W/mK	PE og PEX

Figur 4-2: Menyfanen "Kabler" (materialer)

### 3.6 Forlegning

Verdiene som finnes i denne menyen, se Figur 4-4, er.

- |                     |   |
|---------------------|---|
| Overdekning         | - Avstand mellom toppunkt på kabel og bakkenivå.  |
| Lysåpning           | - Avstanden (lysåpningen) mellom to kabelgrupper, eller mellom grøftekanten og en kabelgruppe. Se eksempel på neste side. |
| Lysåpningsreferanse | - Bestemmer hvilken kabelgruppe, eller grøftekant, lysåpningen skal være referert mot. Se eksempel på neste side.         |
| Beskyttelseslag     | - Tykkelse på ledningssonen over toppunkt på valgt kabel (referanse).   |
| Fundament           | - Tykkelse på ledningssonen under valgt kabelgruppe (referanse).  |
| Konfigurasjon       | - Trekant- eller flat konfigurasjon.  |
| Lysåpning venstre   | - For flat forlegning: Avstand mellom venstre og senterkabel.   |
| Kabelvinkel venstre | - For flat forlegning: Vinkel mellom venstre og senterkabel.  |
| Lysåpning høyre     | - For flat forlegning: Avstand mellom høyre og senterkabel.   |
| Kabelvinkel høyre   | - For flat forlegning: Vinkel mellom høyre og senterkabel.  |

		1
Overdekning	cm	<input type="text" value="70"/>
Lysåpning	cm	<input type="text" value="7"/>
Lysåpningref.		<input type="text" value="Venstre grøftekant"/>
Beskyttelseslag	cm	15
Fundament	cm	10
Konfigurasjon		<input type="text" value="Trekant"/>
Flat forlegning:		
Lysåpning venstre	cm	<input type="text" value="3"/>
Kabelvinkel venstre	°	<input type="text" value="0"/>
Lysåpning høyre	cm	<input type="text" value="3"/>
Kabelvinkel høyre	°	<input type="text" value="0"/>

Figur 4-3: Menyfanen "Forlegning"

### 3.6.1 Lysåpning

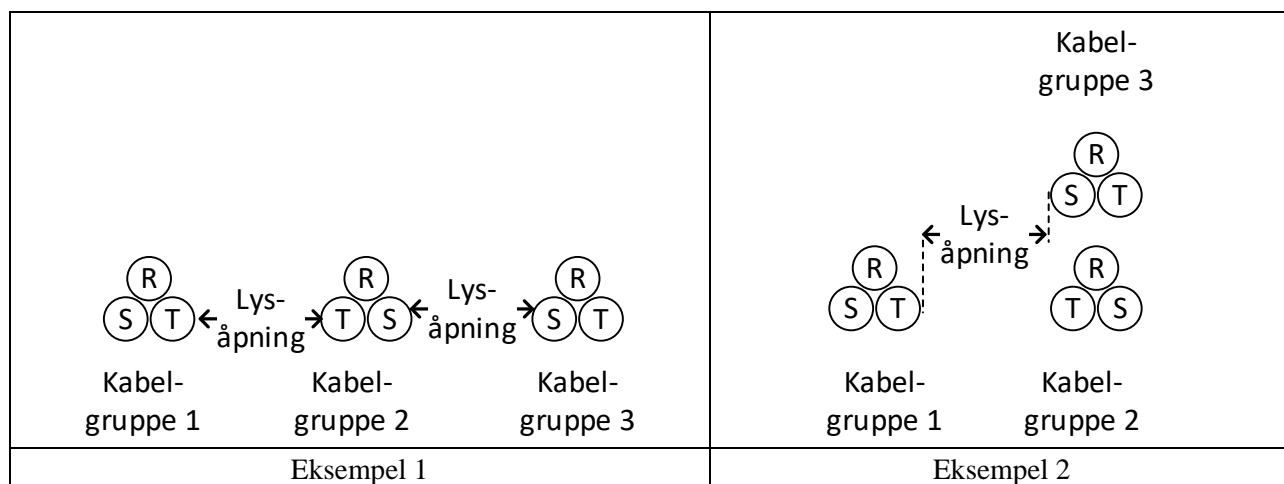
Lysåpningen er avstanden mellom to kabelgrupper, eller mellom grøftekanten og en kabelgruppe.

#### Eksempel 1

Lysåpningen for kabelgruppe 3, se eksempel 1 i Figur 4-5, er avstanden fra ytterpunktet på kabelgruppe 2s S-fase til ytterpunktet på kabelgruppe 3s S-fase.

#### Eksempel 2

Dersom kabelgruppe 3 ønskes plassert over gruppe 2 (se eksempel 2), må overdekningen reduseres og referansen endres til kabelgruppe 2.

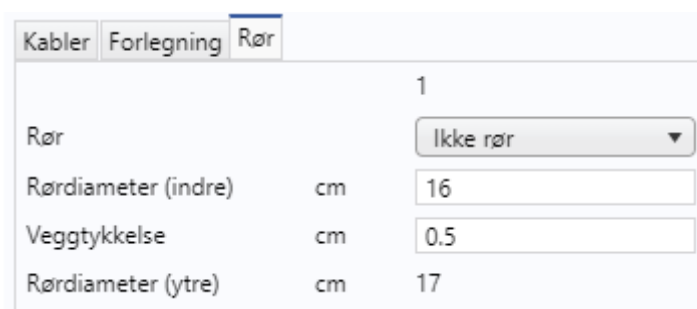


Figur 4-4: Lysåpning og lysåpningsreferanse

### 3.7 Rør

Verdiene som finnes i denne menyen, se Figur 4-4, er:

- Rør - Velg om kabelgruppen skal ligge i rør eller ikke
- Rørdiameter (indre) - Rørets indre diameter
- Veggtykkelse - Rørets veggtykkelse
- Rørdiameter (ytre) - Rørets ytre diameter



		1
Rør		Ikke rør
Rørdiameter (indre)	cm	16
Veggtykkelse	cm	0.5
Rørdiameter (ytre)	cm	17

Figur 4-5: Menyfanen "Rør"

### 3.8 Kabler (geometri)

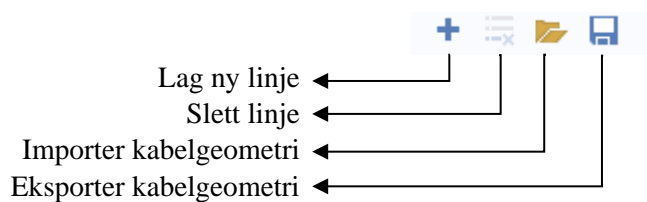
Et utvalg forhåndsdefinerte kabler er lagt inn i verktøyet. Disse er angitt med isolasjonsnivå, lederareal, lederdiameter, diameter over isolasjon, ytre diameter, areal skjermtråd og areal laminat. Alle verdiene brukes i utregningene.

Forhåndsdefinerte kabler		Lederareal [mm <sup>2</sup> ]	Lederdiameter [mm]	Diameter over isolasjon [mm]	Ytre diameter [mm]	Areal indre skjerm [mm <sup>2</sup> ]	Areal ytre skjerm [mm <sup>2</sup> ]
TSLF12kV3x150A/25	12	150	14.1	15.6	23.3	16	0
TSLF12kV3x240A/35	12	240	18.2	25.8	29.8	25	0
TSLF12kV3x400A/35	12	400	23.6	31.4	34.1	35	0
TSLF12kV3x630A/35	12	630	30.4	38.2	40.3	35	0
TSLF12kV3x800A/50	12	800	34.7	43.4	47.5	35	0
TSLF12kV3x1000A/50	12	1000	38.7	47.8	53.3	50	0
TSLF12kV3x1200A/50	12	1200	41.7	50.8	58.5	50	0
TSLF12kV3x1600A/50	12	1600	48.6	57.7	61.7	50	0
TSLF12kV3x2000A/50	12	2000	57.2	66.3	69	50	0
TSLF24kV3x50A/16	24	50	8	19.3	78	50	0
TSLF24kV3x95A/25	24	95	11.4	22.7	27.2	16	0
TSLF24kV3x150A/25	24	150	14.1	25.4	30.8	25	0
TSLF24kV3x240A/35	24	240	18.2	29.5	33.7	25	0
TSLF24kV3x400A/35	24	400	23.6	35.2	38.2	35	0

Egendefinerte kabler							
Kabelnavn	Isolasjonsnivå [kV]	Lederareal [mm <sup>2</sup> ]	Lederdiameter [mm]	Diameter over isolasjon [mm]	Ytre diameter [mm]	Areal indre skjerm[mm <sup>2</sup> ]	Areal ytre skjerm[mm <sup>2</sup> ]
minKabel400mm2	12	400	23.6	31.4	40.3	35	20

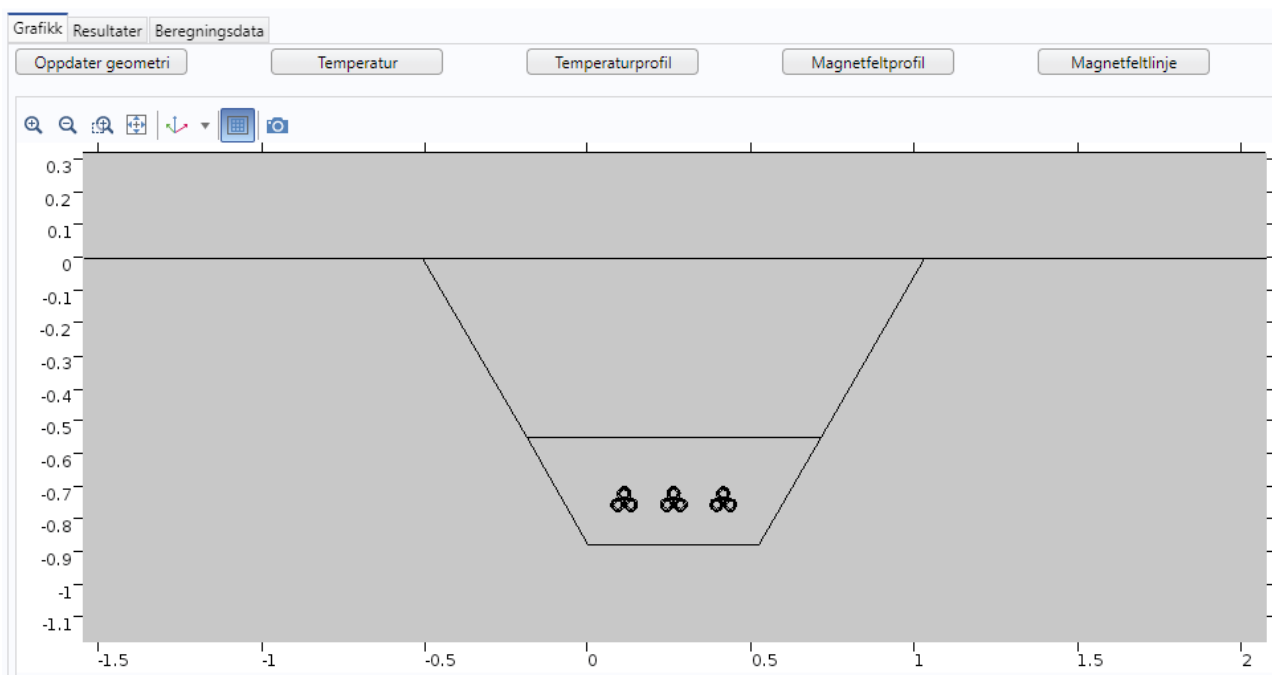
Figur 4-6: Forhåndsdefinerte og egendefinerte kabler.

For å legge til nye kabler, trykk på "+"-tegnet. Bestem kabelnavn og skriv inn isolasjonsnivå og kabelgeometri. Merk at punktum (.) angir desimalskilte, ikke komma (,). Etter at dette er gjort, trykk "Oppdater kabel databasen" for å legge de nye kablene inn i programmet. Symbolene betyr:







### 3.9 Grafikk

I grafikkvinduet vises grøftgeometri, to profiler for temperatur og to for magnetfelt.



Figur 4-7: Grafikk for grøftesnitt

Dra rundt på grafikken ved å holde inne høyre museknapp på grafikken og beveg pekeren. Noen av de innebyggede knappene er:

-   Forstørrer/forminsker
-  Zoom på merket område
-  Viser hele geometrien

### 3.10 Resultater

Verdiene som regnes ut, se Figur 4-9, er:

Overføringskapasitet [MVA]	- Overføringskapasitet.
Strøm [A]	- Påtrykt symmetrisk strøm (RMS)
Driftsspenning [kV]	- Driftsspenning (RMS)
Tap ledere [W/m]	- Totale tap i lederne for de tre kablene i kabelgruppen
Tap skjermer [W/m]	- Totale tap i skjermene for de tre kablene i kabelgruppen.
Tap isolasjon [W/m]	- Totale tap i isolasjonsmaterialet for de tre kablene i kabelgruppen.
Skjermspenning [V/km]	- Spenning (RMS) som bygges opp i skjerm. Viser høyeste verdi for de tre skjermene
Skjermstrøm [A]	- Strøm (RMS) som flyter i skjermene. Viser høyeste verdi for de tre skjermene.
Strøm i skjermtråder [%]	- Andel av skjermstrøm i skjermtrådene
Strøm i laminat [%]	- Andel av skjermstrøm i laminatet
Lederimpedans [ohm/km]	- Gjennomsnittlig lederimpedans for de tre fasene
Maksimal ledertemperatur [°C]	- Høyeste ledertemperatur
Kabeltype	- Kabeltype
Isolasjonsnivå [kV]	- Isolasjonsnivå
Kabelkapasitans [µF]	- Kabelkapasitans
Tapsvinkel	- Isolasjonens tapsvinkel
Relativ permittivitet	- Isolasjonens relative permittivitet

Grafikk Resultater Beregningsdata			
Siste simuleringstid	2 min 8 s		Total effektutvikling: 31 W/m
Tittel	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Overføringskapasitet [MVA]	4.2	4.2	4.2
Strøm [A]	200.0	200.0	200.0
Driftsspenning [kV]	12.0	12.0	12.0
Tap ledere [W/m]	9.7	9.8	9.7
Tap skjermer [W/m]	0.9	1.0	0.9
Tap isolasjon [W/m]	0.02	0.02	0.02
Skjermspenning [V/km]	-	-	-
Skjermstrøm [A]	23.0	23.5	22.9
Strøm i skjermtråder [%]	100.0	100.0	100.0
Strøm i laminat [%]	0.0	0.0	0.0
Lederimpedans [ohm/km]	0.0892 + 0.094i	0.0902 + 0.094i	0.089 + 0.094i
Maksimal ledertemperatur [°C]	30.0	30.0	30.0
Kabeltype	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40
Isolasjonsnivå [kV]	12	12	12
Kabelkapasitans [µF/km]	0.49	0.49	0.49
Tapsvinkel	0.001	0.001	0.001
Relativ permittivitet	2.5	2.5	2.5

Figur 4-8: Eksempel på resultattabell



### 3.11 Beregningsdata

Verdiene som finnes i denne menyen, se Figur 4-10 er:

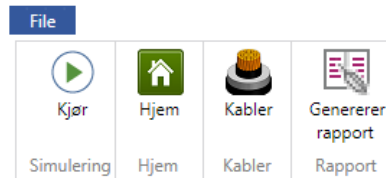
Kabeltype	- Kabeltype
Isolasjonsnivå [kV]	- Isolasjonsnivå
Lederareal [mm <sup>2</sup> ]	- Nominelt lederareal
Lederdiameter [mm]	- Lederdiameter
Diameter over isolasjon [mm]	- Diameter over isolasjon
Ytre diameter [mm]	- Ytre diameter
Areal skjermtråder [mm <sup>2</sup> ]	- Areal på skjermtråder
Areal laminat [mm <sup>2</sup> ]	- Areal på laminat
El. ledningsevne leder [S/m]	- Elektrisk ledningsevne leder
El. ledningsevne skjerm [S/m]	- Elektrisk ledningsevne skjerm
El. ledningsevne laminat [S/m]	- Elektrisk ledningsevne laminat
Term. ledningsevne isolasjon [W/(mK)]	- Termisk ledningsevne isolasjon
Term. ledningsevne ytterkappe [W/(mK)]	- Termisk ledningsevne ytterkappe
Forlegning	- Trekant eller flat
Rør	- Rør eller ikke rør
Skjerm	- Åpne eller lukkede skjermer
Lysåpning mot venstre kabelgruppe	- Lysåpning til kabelgruppen til venstre
Overdekning [cm]	- Avstand mellom bakkenivå og øverste punkt i kabelgruppen

Grafikk Resultater Beregningsdata			
Siste simuleringstid		2 min 8 s	
		Total effektutvikling: 31 W/m	
Tittel	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Kabeltype	TSLF12kV3x4C	TSLF12kV3x4C	TSLF12kV3x4C
Isolasjonsnivå [kV]	12	12	12
Lederareal [mm <sup>2</sup> ]	400.0	400.0	400.0
Lederdiameter [mm]	23.6	23.6	23.6
Diameter over isolasjon [mm]	31.4	31.4	31.4
Ytre diameter [mm]	40.3	40.3	40.3
Areal skjermtråder [mm <sup>2</sup> ]	35.0	35.0	35.0
Areal laminat [mm <sup>2</sup> ]	0.0	0.0	0.0
El. ledningsevne leder [S/m]	3.3E7	3.3E7	3.3E7
El. ledningsevne skjerm [S/m]	5.5E7	5.5E7	5.5E7
El. ledningsevne laminat [S/m]	3.3E7	3.3E7	3.3E7
Term. ledningsevne isolasjon [W/	0.286	0.286	0.286
Term. ledningsevne ytterkappe [V	0.286	0.286	0.286
Forlegning	Trekant	Trekant	Trekant
Rør	Ikke rør	Ikke rør	Ikke rør
Skjerm	Lukket	Lukket	Lukket
Lysåpning mot venstre kabelgrup	-	7.0	7.0
Overdekning [cm]	70.0	70.0	70.0

Figur 4-9: Eksempel på beregningsdata

### 3.12 Rapportfunksjon

En rapport i Word-format med resultater, beregningsdata og figurer lages ved å trykke på knappen "Generer rapport", som vist i Figur 4-10. Utsnittet av figurene blir tilsvarende som vises i hovedskjermen. For å endre utsnittet i rapporten må utsnittet endres i hovedskjermen.



Figur 4-10: Knapperad

## 4 ELEKTRISKE OG TERMISKE PARAMETERE

Termiske og elektriske konstanter brukt er gitt i tabellene under.

Tabell 4-1: Elektrisk ledningsevne/resistivitet ved 20°C. Egendefinert verdi kan settes for hver kabelgruppe i programmet.

Parameter	Ledningsevne	Resistivitet	Referanse
Aluminium	$3.3 \cdot 10^7$ S/m	$3.03 \cdot 10^{-8}$ Ωm	IEC 60228 <sup>1</sup>
Kobber	$5.5 \cdot 10^7$ S/m	$1.81 \cdot 10^{-8}$ Ωm	IEC 60228 <sup>2</sup>
Bly	$0.5 \cdot 10^7$ S/m	$2.00 \cdot 10^{-8}$ Ωm	IEC 60228

Merk 1: Varierer fra  $3.2-3.4 \cdot 10^7$  S/m i normen

Merk 2: Varierer fra  $5.3-5.7 \cdot 10^7$  S/m i normen

Tabell 4-2: Temperaturkoeffisient ved 20°C

Parameter	Verdi	Enhet	Referanse
Kobber	0.004 <sup>1</sup>	1/K	IEC 60287-1-1
Aluminium	0.004 <sup>1</sup>	1/K	IEC 60287-1-1
Bly	0.004	1/K	IEC 60287-1-1

Merk 1: I standarden oppgis koeffisienter på 0.00393 og 0.00403 for hhv. kobber og aluminium. Dette gir et avvik i varmeutvikling på 0.2-0.4% ved 90°C, noe som ansees som akseptabelt.

Tabell 4-3: Termisk motstand for isolasjonsmaterialer og kapper

Parameter	Verdi	Enhet	Referanse
PEX og PE	3.5	mK/W	IEC 60287-2-1, tabell 1
Impregnert papir	6.0	mK/W	IEC 60287-2-1, tabell 1
PVC	6.0	mK/W	IEC 60287-2-1, tabell 1
Naturgummi	5.0	mK/W	IEC 60287-2-1, tabell 1
Jordsmonn (IEC)	1.0	mK/W	IEC 60287-3-1, kap 4.10
Rørvegg (PVC)	6	mK/W	IEC 60287-2-1, tabell 1

Tabell 4-4: Strålingskoeffisient

Parameter	Verdi	Enhet	Referanse
Kabel	0.8	-	-
Rør	0.8	-	-

Tabell 4-5: Relativ permittivitet ( $\epsilon_r$ ) for isolasjonsmaterialer

Parameter	Verdi	Enhet	Referanse
XLPE og PE	2.5	-	IEC 60287-1-1
Impregnerert papir	4	-	IEC 60287-1-1
PVC	8	-	IEC 60287-1-1
Naturgummi (EPR)	3	-	IEC 60287-1-1

Tabell 4-6: Tapsvinkel ( $\tan \delta$ ) for isolasjonsmaterialer

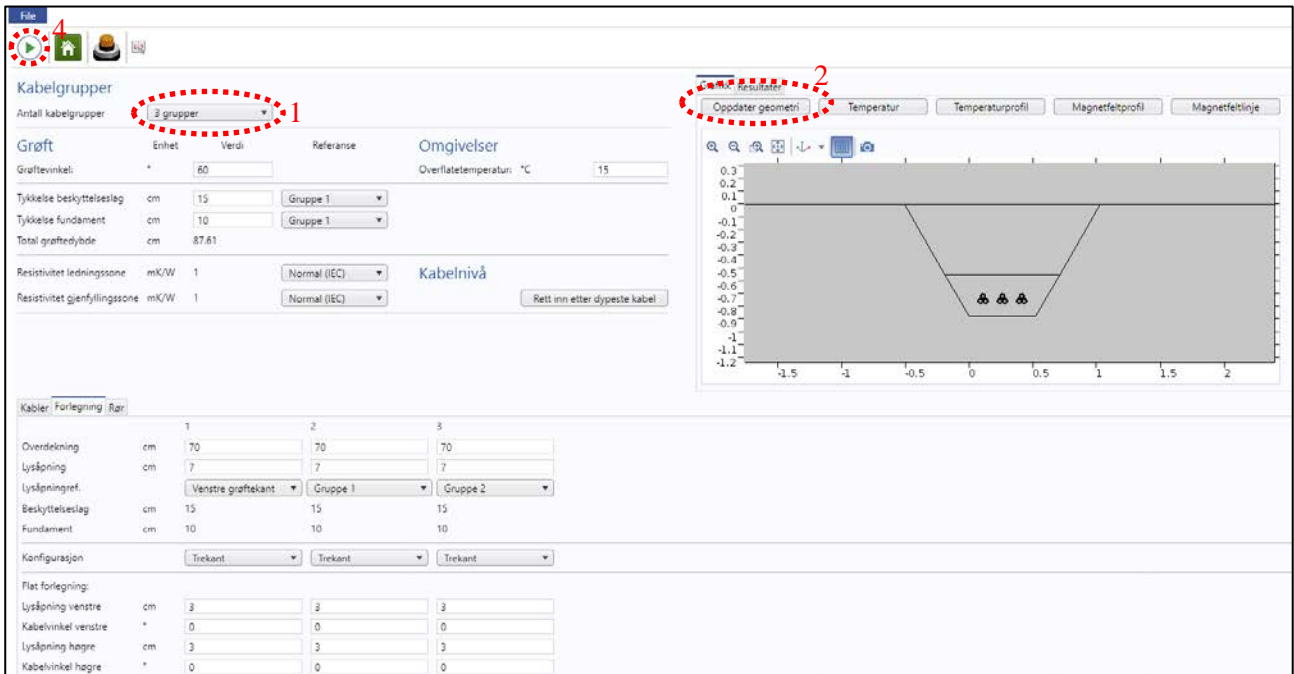
Parameter	Verdi	Enhet	Referanse
XLPE og PE	0.001	-	IEC 60287-1-1
Impregnerert papir	0.01	-	IEC 60287-1-1
PVC	0.1	-	IEC 60287-1-1
Naturgummi (EPR)	0.005	-	IEC 60287-1-1

## 5 EKSEMPEL 1: ENKEL GRØFT

I dette skal belastningsevnen på tre 400 mm<sup>2</sup> 12 kV TSLF-kabler i trekantforlegning beregnes. Disse driftes ved 10 kV. Lysåpning mellom kablene er 7 cm. Overdekning skal være 70 cm, beskyttelseslaget 15 cm og fundamenter 10 cm. Overflatetemperatur er 15°C, og motstand på jordsmonnet er 1 mK/W. Kabeltype og grøftedimensjonene er like som eksempelgrøften ved oppstart og endres ikke.

- 1 Velg 3 **Kabelgrupper**
- 2 Trykk knappen **Oppdater geometri**
- 3 Sett **Strømpåtrykk** til 400 A for alle kabelgruppene
- 4 Trykk knappen **Kjør**

Maksimal oppnådd temperatur vil bli 87°C. Resterende resultater er vist på neste side.



**Kabelgrupper**

Antall kabelgrupper: 3 grupper

Grøft

Grøftvinkel: \* 60

Overflatetemperatur: °C 15

Tykkelse beskyttelseslag cm 15

Tykkelse fundament cm 10

Total grøftedybde cm 87.61

Resistivitet ledningszone mK/W 1

Resistivitet gjenfyllingszone mK/W 1

Kabelnivå

Rettt inn etter dypeste kabel

**Kabler Forlegning Rør**

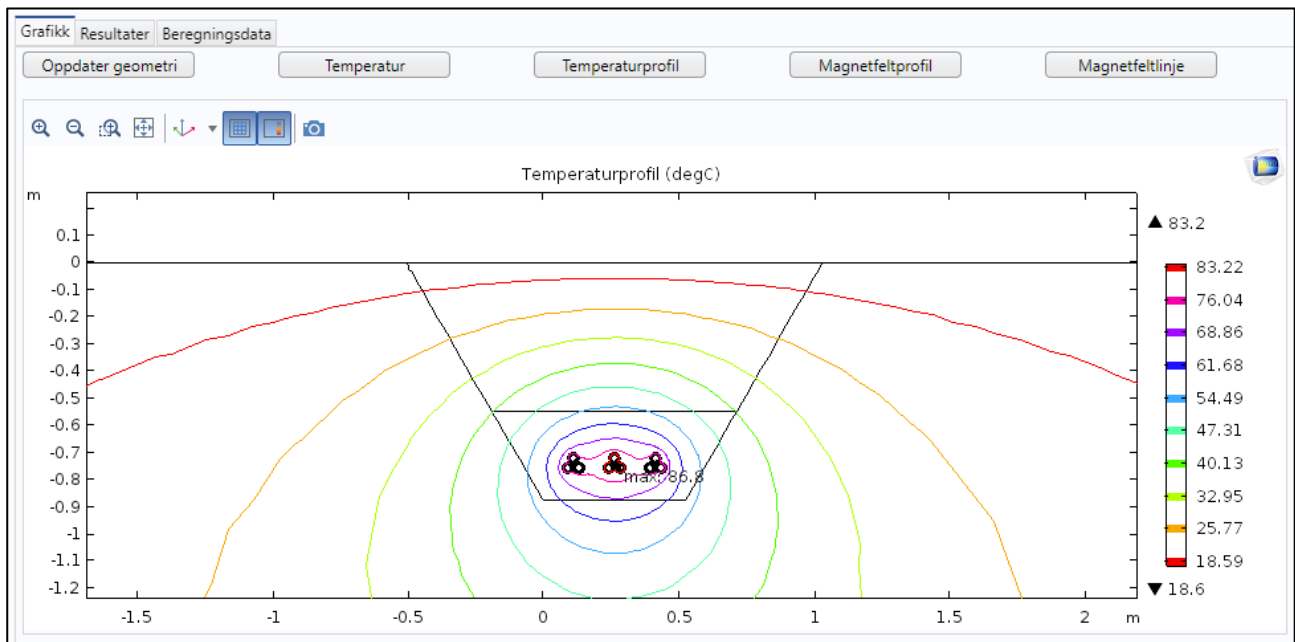
	1	2	3
Overdekning	cm 70	70	70
Lysåpning	cm 7	7	7
Lysåpningref.	Venstre grøftkant	Gruppe 1	Gruppe 2
Beskyttelseslag	cm 15	15	15
Fundament	cm 10	10	10
Konfigurasjon	Trekant	Trekant	Trekant
Flat forlegning:			
Lysåpning venstre	cm 3	3	3
Kabelvinkel venstre	* 0	0	0
Lysåpning høyre	cm 3	3	3
Kabelvinkel høyre	* 0	0	0



**Kabler Forlegning Rør**

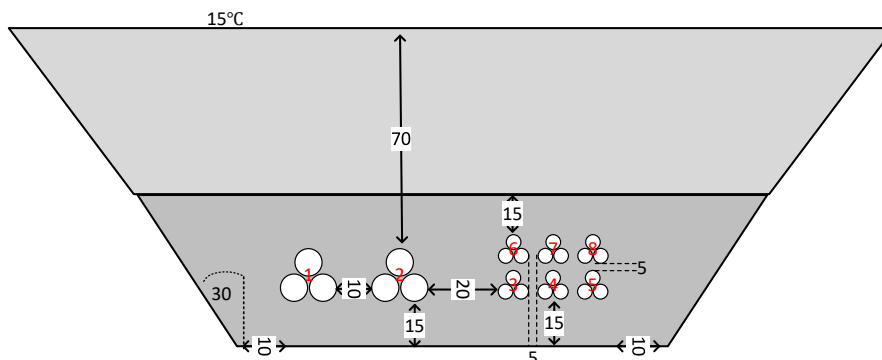
	1	2	3
Strømpåtrykk	A 400	400	400
Kabeltype	TSLF12kV3x400A/35	TSLF12kV3x400A/35	TSLF12kV3x400A/35
Driftsspennning	kV 10	10	10
Lukket skjerm	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Ja
Leder	S/m Aluminium	Aluminium	Aluminium
Isolasjon	W/mK PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX
Indre skjerm	S/m Kobber	Kobber	Kobber
Ytre skjerm	S/m Bly	Bly	Bly
Ytterkappe	W/mK PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX

Grafikk Resultater Beregningsdata		Siste simuleringstid: 2 min 39 s			Total effektutvikling: 146 W/m			Temperatur oppnådd: 87 °C		
Tittel	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6	Gruppe 7	Gruppe 8	Gruppe 9	Gruppe 10
Overføringskapasitet [MVA]	6.9	6.9	6.9							
Strøm [A]	400.0	400.0	400.0							
Driftsspennning [kV]	10.0	10.0	10.0							
Tap ledere [W/m]	46.3	47.2	46.3							
Tap skjerm [W/m]	3.2	3.4	3.2							
Tap isolasjon [W/m]	0.02	0.02	0.02							
Skjermspenning [V/km]	-	-	-							
Skjermstrøm [A]	38.8	39.2	38.8							
Strøm i skjermtråder [%]	100.0	100.0	100.0							
Strøm i laminat [%]	0.0	0.0	0.0							
Lederimpedans [ohm/km]	0.1032 + 0.09i	0.1054 + 0.09i	0.1031 + 0.09i							
Maksimal ledertemperatur [°C]	83.0	87.0	83.0							
Kabeltype	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40							
Isolasjonsnivå [kV]	12	12	12							
Kabelkapasitans [uF/km]	0.49	0.49	0.49							
Tapsvinkel	0.001	0.001	0.001							
Relativ permittivitet	2.5	2.5	2.5							



## 6 EKSEMPEL 2: AVANSERT GRØFT

Dette eksempelet består av åtte kabelgrupper; seks 400mm<sup>2</sup> TSLF 12 kV og to 1200 mm<sup>2</sup> TSLF 145 kV-kabelgrupper. De driftes ved henholdsvis 10 kV og 130 kV. Belastningsevnen til de to 145 kV-kabelgruppene skal finnes når 12 kV-kablene er belastet 230 A. Skjermene er lukket på distribusjonskablene, åpne på høyspentkablene. Det skal være 10 cm lysåpning mellom høyspentkablene, 20 cm til distribusjonskablene og 5 cm mellom distribusjonskablene. Overdekning til høyspentkablene skal være 70 cm. Det skal være 15 cm fundament og beskyttelseslag. 10 cm avstand til 30° grøftkant. Grøftesnippet er gitt i Figur 8-1.



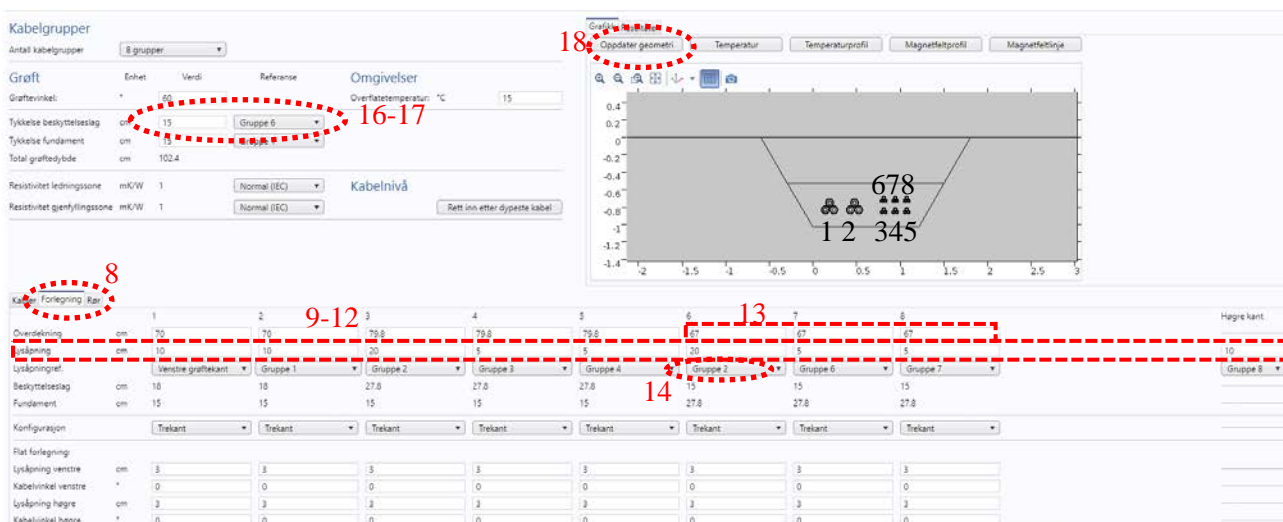
Figur 8-1: Grøftesnitt med 2 høyspent- og 6 distribusjonskabler. Avstander er gitt i cm.

- 1 Velg 8 kabelgrupper
- 2 Trykk på knappen **Oppdater geometri**
- 3 Velg fanen **Kabler**
- 4 Velg **Kabeltype** "TSLF 145kV 3x 1200 A/50" for kabelgrupper 1 og 2
- 5 Sett **Driftsspennning** til 130 kV for kabelgrupper 1 og 2
- 6 Huk vekk **Lukket skjerm** for kabelgrupper 1 og 2
- 7 Trykk på knappen **Rettt inn etter dypeste kabel**

Kabelnr	Strømpåtrykk	Kabeltype	Driftsspennning	Lukket skjerm	Leder	Isolasjon	Indre skjerm	Ytre skjerm	Ytterkappe
1	200	TSLF145kV3x1200A	145	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Aluminium	PE og PEX	Kobber	Bly	PE og PEX
2	200	TSLF145kV3x1200A	145	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Aluminium	PE og PEX	Kobber	Bly	PE og PEX
3	200	TSLF12kV3x400A/35	10	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Aluminium	PE og PEX	Kobber	Bly	PE og PEX
4	200	TSLF12kV3x400A/35	10	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Aluminium	PE og PEX	Kobber	Bly	PE og PEX
5	200	TSLF12kV3x400A/35	10	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Aluminium	PE og PEX	Kobber	Bly	PE og PEX
6	200	TSLF12kV3x400A/35	10	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Aluminium	PE og PEX	Kobber	Bly	PE og PEX
7	200	TSLF12kV3x400A/35	10	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Aluminium	PE og PEX	Kobber	Bly	PE og PEX
8	200	TSLF12kV3x400A/35	10	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Aluminium	PE og PEX	Kobber	Bly	PE og PEX

- 8 Trykk på fanen **Forlegning**
- 9 Sett **Lysåpning** lik 10 cm for Kabelgrupper 1 og 2
- 10 Sett **Lysåpning** lik 20 cm for Kabelgruppe 3 og 6
- 11 Sett **Lysåpning** lik 10 cm for Høgre kant
- 12 Sett **Lysåpning** lik 5 cm for kabelgrupper 4, 5, 7 og 8
- 13 Sett **Overdekning** lik 68.9 cm\* for kabelgrupper 6, 7 og 8
- 14 Sett **Lysåpningsref.** lik Gruppe 2 for kabelgruppe 6
- 16 Sett **Tykkelse beskyttelseslag** lik 15 cm
- 16 Sett **Referanse Tykkelse beskyttelseslag** til Gruppe 6
- 18 Trykk knappen **Oppdater geometri**

\* Ytre diameter til 12 kV-kablene er 4 cm. Diameteren til trekantforlegningen er  $4 \text{ cm} \cdot (2 + \sqrt{3}/2) = 7.5 \text{ cm}$ . Lysåpningen skal være 5 cm. Original overdekning var 79.8 cm. Ny overdekning blir da  $(79.8 - 7.5 - 5) \text{ cm} \approx 67 \text{ cm}$



- 16 Trykk på fanen **Kabler**
- 17 Sett **Strømpåtrykk** lik 230 A for Kabelgrupper 3-8
- 18 Sett **Strømpåtrykk** lik 720 A for Kabelgrupper 1 og 2
- 19 Trykk på knappen **Kjør**

Temperatur blir 90°C for en strøm på 715 A i hver av 145 kV-kablene. Dette tilsvarer en overføringskapasitet på 161 MVA. Resultatene er vist på neste side.





19 Kabelgrupper

Antall kabelgrupper: 8 grupper

Grøft: Enhet Verdi Referanse Omgivelser

Grøftvinkel: 60 Overflatetemperatur: 15

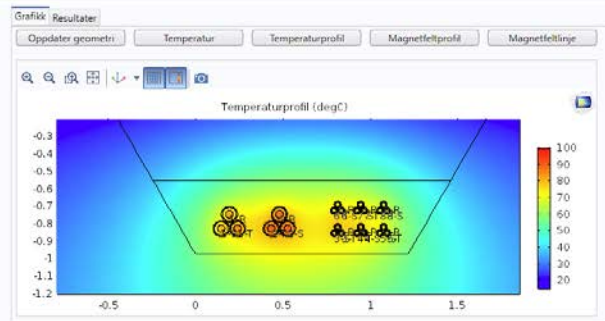
Tykkelse beskyttelseslag: 15 Gruppe 1

Tykkelse fundament: 10 Gruppe 1

Total grøftdybde: 97.4

Resistivitet ledningszone: 1 Normal (IEC) Kabelnivå

Resistivitet gjenfyllingszone: 1 Normal (IEC) Rett inn eller dypest kabel



16

Kabler / Forsegning Rør

	1	2	3	4	5	6	7	8
Strømpåtrykk	720	720	230	230	230	230	230	230
Kabeltype	TSLF145kV3x1200A	TSLF145kV3x1200A	TSLF12kV3x400A/35	TSLF12kV3x400A/35	TSLF12kV3x400A/35	TSLF12kV3x400A/35	TSLF12kV3x400A/35	TSLF12kV3x400A/35
Driftsspennning	130	130	10	10	10	10	10	10
Lukket skjerm	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input checked="" type="checkbox"/> Ja
Leder	S/m Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium
Isolasjon	W/mK PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX
Indre skjerm	S/m Kobber	Kobber	Kobber	Kobber	Kobber	Kobber	Kobber	Kobber
Ytre skjerm	S/m Bly	Bly	Bly	Bly	Bly	Bly	Bly	Bly
Ytterkappe	W/mK PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX	PE og PEX

17

18

Grafikk Resultater Beregningsdata

Siste simuleringstid: 3 min 44 s Total effektutvikling: 213 W/m Temperatur oppnådd: 90 °C

Tittel	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6	Gruppe 7	Gruppe 8	Gruppe
Overføringskapasitet [MVA]	161.0	161.0	4.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	
Strøm [A]	715.0	715.0	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	230.0	
Driftsspennning [kV]	130.0	130.0	10.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	
Tap ledere [W/m]	55.1	56.1	15.3	15.2	14.9	15.1	15.1	14.8	
Tap skjerm [W/m]	2.1	2.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	
Tap isolasjon [W/m]	1.16	1.16	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	
Skjermsspennning [V/km]	52.6	52.7	-	-	-	-	-	-	
Skjermstrøm [A]	-	-	23.0	23.1	22.8	23.0	23.3	22.7	
Strøm i skjermtråder [%]	-	-	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
Strøm i laminat [%]	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Lederimpedans [ohm/km]	0.0373 + 0.11i	0.038 + 0.112i	0.1023 + 0.09i	0.1029 + 0.09i	0.0996 + 0.09i	0.1025 + 0.09i	0.1025 + 0.09i	0.0989 + 0.09i	
Maksimal ledertemperatur [°C]	85.0	90.0	80.0	79.0	73.0	79.0	78.0	72.0	
Kabeltype	TSLF145kV3x1	TSLF145kV3x1	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40	TSLF12kV3x40	
Isolasjonsnivå [kV]	145	145	12	12	12	12	12	12	
Kabelkapasitans [uF/km]	0.22	0.22	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	
Tapsvinkel	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
Relativ permittivitet	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	



Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)