NOTAT

KUNDE / PROSJEKT	PROSJEKTLEDER	DATO
Nordlandsnett Kjelling transformatorstasjon	Arild Whist	11.02.2019
PROSJEKTNUMMER	**OPPRETTET AV**	**REV. DATO**
10209891	Aleksander Hertzberg Steen	

UTARBEIDET AV NAVN	SIGNATUR	KONTROLLERT AV NAVN	SIGNATUR
Aleksander Hertzberg Steen	NOALES	Ole Berdiin Olesen	NOOLEO

DISTRIBUSJON:	**FIRMA**	**NAVN**
TIL:	Nordlandsnett	Trond Storjord

Dimensjonering av jordelektroder og plassering av overspenningsvern

1. Innledning og omfang

Dette notatet er utarbeidet av Sweco Norge på vegne av Nordlandsnett i forbindelse med prosjekteringen av nye Kjelling transformatorstasjon.

Notatet omhandler dimensjonering av nytt jordelektrodeanlegg (anlegg under terreng). Herunder termisk dimensjonering, utforming for å ivareta skritt- og berøringsspenninger, samt prosjektering av impulsjording for overspenningsavledere ved kabelendemaster og stasjonsbygning.

Notatet omhandler videre en vurdering av antall overspenningsavledere og plassering av disse.

Sweco
Drammensveien 260
Box 80 Skøyen
NO-0212 Oslo, Norge
Telefon +47 67 12 80 00

www.sweco.no

Sweco Norge AS
967032271
Hovedkontor: Oslo

Aleksander Hertzberg Steen
Rådgivende ingeniør
Oslo

Mobil +47 91607252
aleksander.steen@sweco.no

2. Jordingsanlegg

2.1. Jordelektroder

Jordelektrodeanlegget til Kjelling transformatorstasjon vil bestå av følgende elektroder:

- Maskenett under stasjonsbygning
- Ringjord rundt stasjonsbygning
- Impulsjord ved stasjonsbygning
- Ringjord ved 4 stk. kabelendemaster
- Impulsjord ved 4 stk. kabelendemaster
- Jordkontinuitetsledere: 50 mm^2 blank kobberline forlagt i grøft med 22- og 132 kV kabler fra kabelendemaster

Elektrodene er forklart i detalj under. For plassering henvises det til tegning nr. 10209891-018.

2.1.1. Impulselektroder

Impulselektroder plasseres ved stasjonsbygning, 132 kV kabelendemast, samt 22 kV kabelendemastene A, B, og C. Det er da én impulselektrode ved hvert sett overspenningsavledere.

Impulselektroder har som formål å effektivt lede overspenninger til jord. Disse må derfor ha gode høyfrekvente egenskaper. Det vil si at det den transiente motstanden til elektrodene må være lavest mulig. I tillegg må avstanden mellom overspenningsavleder og elektrode være så kort som mulig, og uten skarpe bend.

For å oppnå gode høyfrekvente egenskaper er det valgt fire stk. 9 meter lange ø14 mm jordspyd, koblet i parallell [1]. Dette for å fordele strømimpulsen på flest mulig greiner raskest mulig. Jordspydene skal plasseres med 13,5 meter mellomrom. Dette for at ioniseringen av jordsmonnet fra hvert av spydene ikke skal påvirke hverandre. Spydene installeres i borede 50 mm hull som fylles med elektrodemasse i etterkant. Spydene skråstilles 15 grader ut fra utstyr som skal beskyttes, og minimal bøyeradius på jordledere er 20 cm.

Det kobles 50 mm^2 kobberline til hvert av jordspydene med topphylse. Deretter kobles kobberlinene sammen med c-press, før det føres 50 mm^2 kobberline fra skjøt til overspenningsavledere. Se tegning nr. 10209891-018.

2.1.2. Maskenett under stasjonsbygning

Jordelektrode for stasjonsbygningen utføres som et rektangulært maskenett.

Maskenettet legges under bygningens grunnmur. Fotavtrykket til maskenettet er én meter større i hver retning enn stasjonsbygning. Det vil si at maskenettet stikker 0,5 meter ut fra bygningens yttervegg. Maskebredde skal være 5 x 6 meter. Maskenettet skal bestå av 50 mm^2 kobberliner som skjøtes sammen med c-press.

Oppstikk fra maskenett til stasjonsbygning utføres med to stk. 50 mm^2 kobberliner. Dette sikrer redundans mot mekanisk skade. I tillegg skal det etableres oppstikk fra maskenett til 132- og 22 kV kabelkjeller.

2.1.3. Ringjord rundt stasjonsbygning

Ringjord av 50 mm^2 kobberline legges rundt stasjonsbygning én meter ut fra ferdig vegg, maksimalt 0,5 under ferdig terreng. Begge ender trekkes inn i 132 kV-kabelkjeller.

Ringjorden er forlagt som potensialstyring rundt stasjonsbygg for å tilfredsstille tiltak spesifisert i NEK 440:2015 Tillegg E [2]. Tiltaket må gjennomføres grunnet høy potensiell berøringspenning, som diskutert i kapittel 2.4.

2.1.4. Ringjord rundt kabelendemaster

Ringjord rundt kabelendemaster tjener samme formål som ringjord rundt stasjonsbygget.

Ringjord legges rundt alle mastefundamenter. Det vil si, 132 kV kabelendemast og 22 kV kabelendemastene A, B, og C. Ringjorden utføres med 50 mm^2 kobberline lagt rundt mastefundamentet. Denne legges én meter ut fra fundaments ytterkant, maksimalt 0,5 under ferdig terreng. Denne utjevnes til jordleder mellom jordspyd og overspenningsavledere med c-press.

Jordelektroden er ikke medtatt i beregningen av overgangsmotstand til jord grunnet liten utstrekning. Den er dessuten i umiddelbar nærhet til impulsjording og langsgående jordkontinuitetsleder, som vil minske effekten denne har på overgangsmotstanden.

2.1.5. Langsgående jordkontinuitetsledere

Langsgående jordkontinuitetsledere vil gå parallelt med alle kabelstrekk mellom stasjonsbygg og 132 og 22 kV kabelendemaster. Det må også legges jordkontinuitetsleder parallelt med 22 kV kabel fra stasjonsbygg ned til sjø (grensesnitt land-/sjøkabel).

Jordkontinuitetsledere utføres som blank 50 mm^2 kobberline. Total lengde kobberline i kabelgrøft er 522 meter.

2.2. Overgangsmotstand til jord

Overgangsmotstand til jord for de ulike elektrodene er beregnet etter metode som beskrevet i [3]. Samtlige elektroder kobles sammen, og kan derfor ansees som parallellkoblede motstander mot jord.

Det forutsettes en jordresistivitet på 10 000 Ωm. Dette er en konservativ verdi, men pga. grunnforhold med stort innslag av berg er jordresistiviteten forventet å være høy. Beregnede overgangsmotstander er vist av Tabell 1.

Tabell 1: Oppsummering av overgangsmotstander til jord

Type elektrode	Verdi [Ω]
Maskenett under stasjonsbygning	253,4
Ringjord rundt stasjonsbygning	284,1
Én impulselektrode	394,4
Impulselektroder totalt	78,9
Langsgående jordkontinuitetsledere	70,0
Total overgangsmotstand	29,0

2.3. Feilstrømmer

Dimensjonerende feilstrømmer er oppgitt av Nordlandsnett, som vist av Tabell 2.

Tabell 2: Dimensjonerende feilstrømmer

Type feil	Verdi [kA]
Ik_{3pMax} (132 kV)	5,884
Ik_{3pMax} (22 kV)	10,271
Dim. jordfeilstrøm (132 og 22 kV)	0,100

2.4. Berøringspenninger

2.4.1. Reduksjonsfaktor

Reduksjonsfaktoren angir hvor stor del av jordfeilstrømmen som vil gå i jordsmonnet. Det vil si at $r = \frac{I_E}{3I_0} = \frac{I_E}{I_j}$, der I_E er strømmen til jordsmonn. Reduksjonsfaktoren varierer med nettutforming og jordresistivitet, og er valgt til 0,5 som er en erfaringsmessig verdi fra NEK 440:2015.

2.4.2. Jordpotensialstigning

Jordpotensialstigningen er funnet ved å multiplisere overgangsmotstand og jordfeilstrøm. Strømmen til jord er funnet ved å multiplisere en-fase jordfeilstrøm med reduksjonsfaktoren. Formel for jordpotensialstigningen blir da som vist under, og gir U_E = 1450 V.

$$U_E = Z_E \cdot I_E = Z_E \cdot \left(r \cdot I_{k1j}\right)$$

2.4.3. Tillatt berøringspenning

Figur 4 i NEK 440:2015 angir maks tillatt berøringsspenning som funksjon av feilvarighet. For Kjelling transformatorstasjon er dimensjonerende feilvarighet større enn 10 sekunder. Tillatt berøringsspenning U_{Tp} blir da 80 V. Imidlertid forutsetter denne figuren bar hånd og fot uten overgangsmotstand, noe som er en urealistisk feilsituasjon. Det åpnes da for at man kan ta hensyn til relevante tilleggsresistanser i fottøy og lignende. Metoden i tillegg B i NEK 440:2015 gir da, med parameterne i Tabell 3 en antatt tillatt berøringsspenning U_{vTp} på 128,4 V. Parameterne i Tabell 3 er i hovedsak hentet fra NEK 440:2015.

Tabell 3: Parametere for beregning av tillatt berøringsspenning

Variabel	Verdi	Kommentar
$I_b(t_f)$	50 mA	Strømgrense ventrikkelflimmer
HF	1	Hjertestrømsfaktor (venstre hånd – begge føtter)
Z_T	1890 Ω	Kroppsimpedans
BF	0,75	Kroppsfaktor (hånd – begge føtter fot)
R_{H}	0 Ω	Tilleggs resistans hånd
R_{F1}	1000 Ω	Resistans sko
R_{F2}	150 Ω	Resistans overflatelag (ρ = 100 Ωm)

Dette betyr at maksimal jordpotensialstigning, U_E, kan være 256,7 V ($2U_{vTp}$) uten at potensialstyrende tiltak i henhold til NEK 440:2015 Tillegg E må vurderes.

2.4.4. Sikkerhetstiltak

I NEK 440:2015 skilles resulterende jordpotensialstigning i tre kategorier:

- $U_E \leq 2U_{Tp}$ (ingen ytterligere tiltak er nødvendig)
- $U_E \leq 4U_{Tp}$ (tiltak som spesifisert i NEK 440:2015 Tillegg E må iverksettes)
- $U_E > 4U_{Tp}$ (som $U_E \leq 4U_{Tp}$, i tillegg skal faktisk berøringspenning sikres $\leq U_{Tp}$)

Hvilken kategori Kjelling transformatorstasjon havner i vil i stor grad avhengige av omkringliggende jordelektroder (koblet til stasjonsjord) utover elektroder spesifisert i dette notatet. I hovedsak vil dette være jordelektrode i sjø for 22 kV sjøkabel, samt mastejordinger for linje Sundsfjord-Hopen via toppline. Overgangsmotstand for tilleggselektroder må være maksimalt 6,24 Ω for å gi $U_E \leq 2U_{Tp}$, og 15,9 Ω for å sikre $U_E \leq 4U_{Tp}$. Relevante tiltak for disse kategoriene er forklart under.

For Kjelling transformatorstasjon betyr $U_E \leq 4U_{Tp}$ at tiltak M1.2 og M3.1 må utføres. M1.2 er potensialstyring ved hjelp av ringjord rundt stasjonsbygg (og kabelendemaster). Dette er allerede planlagt for stasjonen og beskrevet i 2.1.3. M3.1 innebærer potensialutjevning ved innstøpning av jordelektrode av gittertype i stasjonsbygningens grunnmur. En slik potensialutjevning er ikke omfattet av dette notatet, men må ivaretas i detaljprosjekteringen av stasjonsbygningen. Tiltaket må uansett gjennomføres, og er god praksis for bygg med GIS-anlegg. Om inngjerding av stasjonsområde på et senere tidspunkt oppføres må også dette potesialstyres (tiltak M2).

Dersom $U_E > 4U_{Tp}$ må uansett tiltakene spesifisert for $U_E \leq 4U_{Tp}$ utføres. I tillegg må det også sikres at faktisk berøringspenning er mindre eller lik U_{Tp} for yttervegger rundt installasjonen ved måling. Dette bør også sikres for master (samt gjerder om dette blir relevant).

2.4.5. Anbefaling

Beregningene viser at det ikke er mulig å sikkert konkludere med at stasjonens jordingsanlegg oppfyller kravene til tillatte berøringsspenninger. Faktorer som kan forbedre anleggets effektivitet er tilleggselektroder (elektroder forbundet via toppline og sjøelektrode) samt lavere faktisk jordresistivitet enn forutsatt.

Toppline for forbindelse Sundsfjord-Hopen vil ikke være installert ved idriftsettelse av anlegg. Elektrode i sjø hvor 22 kV sjøkabel ilandsettes kan derimot installeres. Denne forventes å få en overgangsmotstand til jord lavere enn 6,24 Ω. Det vil sørge for en total overgangsmotstand lavere enn 5,13 Ω. Potensialstigning ved jordfeil (U_E) vil da være lavere enn 256,7V ($2U_{vTp}$). Denne anbefales derfor tilkoblet stasjonsbyggets jordingsnett.

Den hittil utførte prosjekteringen er et bra utgangspunkt for å sikre et godt jordingsanlegg men den må suppleres med målinger for å sikre at kravene i NEK 440:2015 er ivaretatt. Sweco anbefaler derfor at det gjennomføres målinger av overgangsmotstand til jord i forbindelse med stasjonsbyggets oppføring. Resultatet fra målingene kan så brukes til å forbedre jordingsanleggets design og minimum sikre at $U_E \leq 4U_{Tp}$.

Det anbefales uansett at anlegg planlegges for $U_E \leq 4U_{Tp}$. Dette da denne kategoriens tiltak er enkle, og er god praksis for bygg med GIS-anlegg.

2.5. Skrittspenninger

Dersom kravet til maksimal berøringsspenning er overholdt vil også kravet til skrittspenning være overholdt. Dette vurderes derfor ikke ytterligere.

2.6. Termiske forhold ved dobbel jordfeil

Beregning av nødvendig tverrsnitt for jordledere er utført i henhold til tillegg D i NEK 440:2015. Som basis for beregningene er verdi for dobbel jordfeil lagt til grunn. Dette er i praksis en 2-polet kortslutning (85 % av 3-polet kortslutning). Kortslutningsverdien for 22 kV-nettet er lagt til grunn da denne er størst. Dimensjonerende strøm blir da 8,895 kA. Tilnærmingen er konservativ da ikke hele feilstrømmen vil gå i jordledere men vil fordele seg mellom kabelskjermer, jordkontinuitetsledere, og jordsmonn.

Minimumstversnittet er beregnet til 45,7 mm^2 (formel D.1). Nærmeste standardtversnitt for kobberliner er 50 mm^2 og dette tverrsnittet må brukes. Forutsetninger for beregningen er start- og sluttemperatur på henholdsvis 20- og 300 °C. Utkoblingstiden er antatt 1 sekund.

2.7. Mekanisk styrke og korrosjon

Mekanisk styrke og korrosjon er hensyntatt ved å velge jordledere større eller lik minimumsverdier angitt i NEK 440:2015 Tillegg C.

3. Beskyttelse mot overspenninger

For å beskytte det elektriske utstyret mot overspenninger er det planlagt overspenningsavledere ved følgende lokasjoner:

- Linje-kabel overgang i 22 kV kabelendemaster A, B og C, samt i 132 kV kabelendemast
- Begge sider av 22/132 kV-transformator

Avlederne skal være metalloksydavledere. Begrunnelse for valg av plassering er gitt under.

3.1. Beskyttelse av kabler mellom kabelendemaster og stasjonsbygg

For å beskyttelse stasjonens innkommende kabler er det nødvendig med overspenningsavledere i linje-kabel overgang i alle kabelendemaster.

3.2. Beskyttelse av 132-/22 kV transformator

Selv med overspenningsavledere plassert ved kabelendemaster kan skadelige overspenninger fortsatt forekomme i stasjonsbygget. Hvorvidt avledere i kabelendemaster er tilstrekkelig vil avhenge av flere faktorer. Viktigste av disse er steilhet på innkommende overspenning (kV/µs) og kabellengde mellom avleder og transformator.

Forenklet sett kan en transformator representeres som en underlig stor bølgeimpedans. En innkommende overspenningsbølge vil derfor reflekteres i det den møter transformatoren. Innkommende spenningsbølge og reflektert bølge vil da summeres i øyeblikket bølgen treffer. Noe som resulterer i en betraktelig økning av overspenningens toppverdi (teoretisk sett vil den dobles). Denne bølgen vil så vandre tilbake til avleder i kabelendemast hvor den reduseres til avlederens restspenning.

Om avleder tenner før reflektert bølge vender tilbake til kabelendemasten vil maksimal spenning over transformator bli to ganger avlederens restspenning. Om avleder tenner senere vil maksimal spenning over transformator kunne estimeres til:

$$U_T = U_{pl} + 2k\tau$$

Hvor:

U_{pl} = restspenning til overspenningsavleder
k = steilhet på innkommende overspenning
τ = spenningsbølgens løpetid (kabellengde ÷ bølgehastighet)

Dette er en forenklet tilnærming. I realiteten er nettsystemet mer komplekst men tilnærmingen er en god indikasjon på hva en kan forvente av spenningsøkning over transformator (og omkringliggende anlegg).

Grunnet kabelstrekkets lengde kan en ved Kjelling oppleve spenninger som overgår utstyrets høyeste holdespenninger, gitt høy nok overspennings-steilhet (~400 kV/µs). Det er derfor anbefalt å plassere overspenningsavledere ved transformator (nærmest mulig, på begge sider). Disse avlederene vil også beskytte bryteranlegget i stasjonen (i tillegg til kabelender tilkoblet disse).

Behov for nullpunktsavleder ved transformator må vurderes i samråd med transformatorleverandør. Behovet vil avhenge av transformatorens utforming.

3.3. Nødvendighet

Nordlige deler av Norge er mindre utsatt for lynnedslag enn resten av Norge grunnet lavere temperaturer. Kjelling transformatorstasjon vil derimot forsyne mange kunder og blir viktig også som knutepunkt i Nordlandsnett 132 kV-nett. I tillegg er transformator og 132 kV GIS-anlegg svært kostbart. Utstyret har dessuten lang reparasjonstid.

Referanser

[1] *RENblad 8011.*
[2] *NEK 440:2015 Stasjonsanlegg over 1 kV.*
[3] Stanett, *Teknisk standard - Veileder for jording - del 1 - planlegging.*

(1) Jordkontinuitetsleder føres inn i bygg sammen med tilhørende 132 kV kabel.

(2) 50 mm² kobberline fra ringjord føres (begge ender) inn i 132 kV kabelkjeller.

(3) 2 stk. 50 mm² kobberliner skjøtes til maskenett med c-press og føres inn i bygg i 132 kV kabelkjeller.

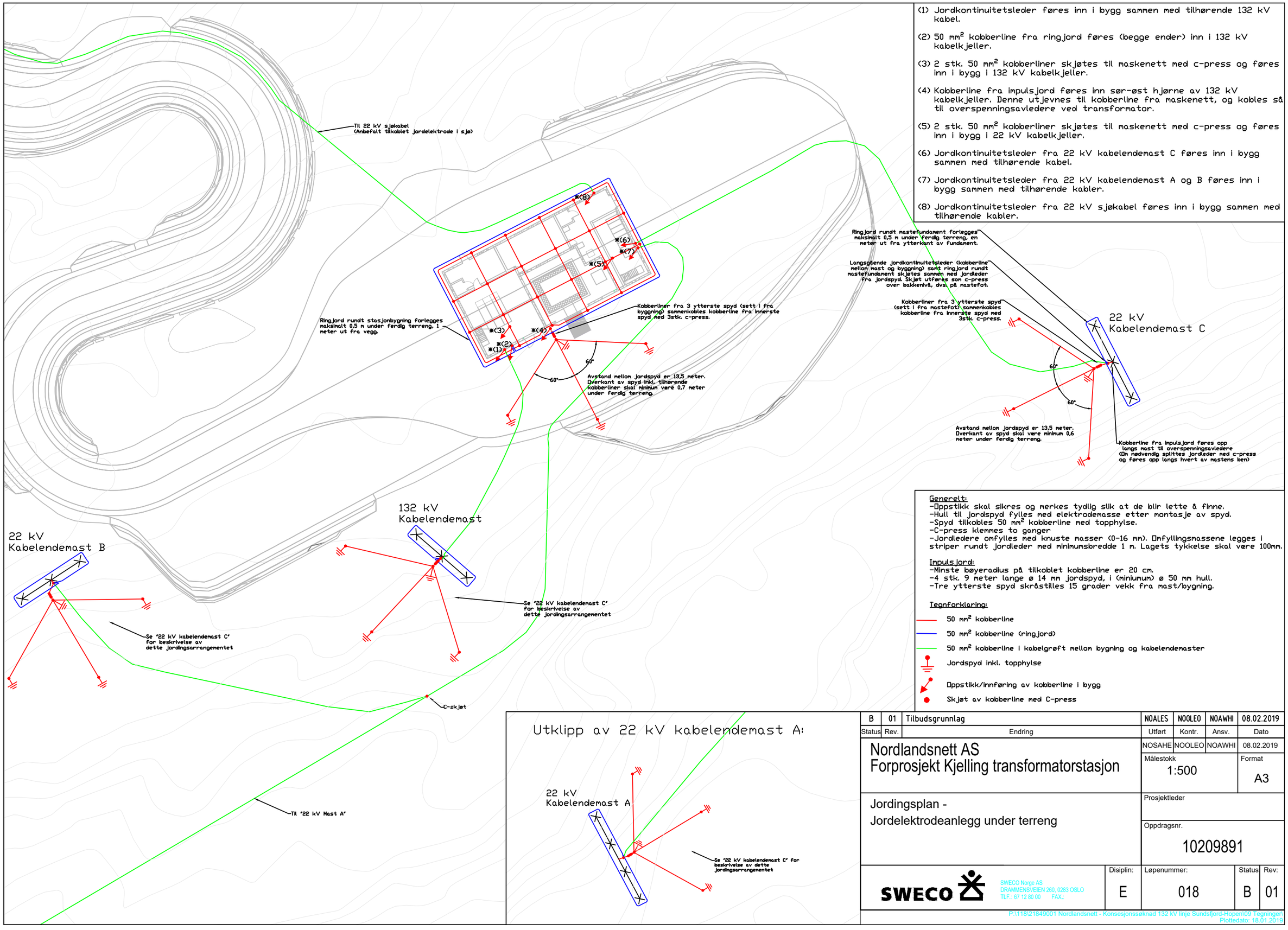
(4) Kobberline fra impulsjord føres inn sør-øst hjørne av 132 kV kabelkjeller. Denne utjevnes til kobberline fra maskenett, og kobles så til overspenningsavledere ved transformator.

(5) 2 stk. 50 mm² kobberliner skjøtes til maskenett med c-press og føres inn i bygg i 22 kV kabelkjeller.

(6) Jordkontinuitetsleder fra 22 kV kabelendemast C føres inn i bygg sammen med tilhørende kabel.

(7) Jordkontinuitetsleder fra 22 kV kabelendemast A og B føres inn i bygg sammen med tilhørende kabler.

(8) Jordkontinuitetsleder fra 22 kV sjøkabel føres inn i bygg sammen med tilhørende kabler.



Generelt:
- Oppstikk skal sikres og merkes tydlig slik at de blir lette å finne.
- Hull til jordspyd fylles med elektrodemasse etter montasje av spyd.
- Spyd tilkobles 50 mm² kobberline med topphylse.
- C-press klemmes to ganger
- Jordledere omfylles med knuste masser (0-16 mm). Omfyllingsmassene legges i striper rundt jordleder med minimumsbredde 1 m. Lagets tykkelse skal være 100mm.

Impuls jord:
- Minste bøyeradius på tilkoblet kobberline er 20 cm.
- 4 stk. 9 meter lange ø 14 mm jordspyd, i (miniumum) ø 50 mm hull.
- Tre ytterste spyd skråstilles 15 grader vekk fra mast/bygning.

Tegnforklaring:

- 50 mm² kobberline
- 50 mm² kobberline (ringjord)
- 50 mm² kobberline i kabelgrøft mellom bygning og kabelendemaster
- Jordspyd inkl. topphylse
- Oppstikk/innføring av kobberline i bygg
- Skjøt av kobberline med C-press

Status	Rev.	Endring	Utført	Kontr.	Ansv.	Dato
B	01	Tilbudsgrunnlag	NOALES	NOOLEO	NOAWHI	08.02.2019
			NOSAHE	NOOLEO	NOAWHI	08.02.2019

Nordlandsnett AS
Forprosjekt Kjelling transformatorstasjon

Jordingsplan -
Jordelektrodeanlegg under terreng

Målestokk: 1:500
Format: A3
Prosjektleder:
Oppdragsnr.: 10209891

SWECO

SWECO Norge AS
DRAMMENSVEIEN 260, 0283 OSLO
TLF.: 67 12 80 00 FAX.:

Disiplin:	Løpenummer:	Status	Rev:
E	018	B	01

P:\118\21849001 Nordlandsnett - Konsesjonssøknad 132 kV linje Sundsfjord-Hopen\09 Tegninger\
Plottedato: 18.01.2019