

www.sintef.no



**Energiforsyningens
Forskningsinstitutt A/S**

Adresse: 7034 Trondheim
Telefon: 73 59 72 00
Telefax: 73 59 72 50
Telex: 55 513 efi n

Foretaksnr.: 939350675

TEKNISK RAPPORT

SAK/OPPGAVE (tittel)

Underlag for beregninger og målinger på jordelektroder i forskjellige elkraftanlegg
Beskrivelse av underlag nødvendig for å tilfredsstille sikkerhetsmessige og tekniske krav samt påpeking av muligheter og begrensninger ved fastlegging av stasjoners og jordliners jordmotstand



SAKSBEARBEIDER(E)

Arne P. Brede, Hans K. Høidalen, Anngjerd Pleyrn, Ove Rørvik
Herlof Seljeseth (prosjektleder)

Arne P. Brede

OPPDRAAGSGIVER(E)

Statnett, EnFO, div. everk i hht EFFEN-prosjekt NP2.10

TR NR.	DATO	OPPDRAAGSGIVER(E)S REF.		
EFI TR A4254	1995-01-27	Jan A. Olsen		
GRADERING		PROSJEKTNR.	OPPLAG	ANTALL SIDER
Åpen		300338.04	157	108
ELEKTRONISK ARKIVKODE		FAGGRUPPE		
n:\dok\et\apb\9500444.tek		Kraftsystemteknikk v/Lars Rolfseng 		
ISBN	RAPPORTTYPE	AVDELING		
82-594-0757-4	3, 6, 7	Elkraftteknologi v/John Kulsetås 		

RESULTAT (sammendrag)

Analytiske formler og kurver for driftsfrekvent jordmotstand til praktiske jordelektroder er angitt med bakgrunn i litteratur og normer. Jordliners betydning for å begrense virkningen av feilstrømmer på kraftledninger og -kabler er beskrevet (vedleggsrapport 1). Det er gitt en kortfattet innføring i grunnlaget for EDB-baserte beregningsmodeller og grunnleggende karakteristikk for impulsmodstand (vedleggsrapport 2). Metoder for måling av jordresistivitet, jordmotstand og løsning av praktiske måleproblem er beskrevet (vedleggsrapport 3).

STIKKORD

EGENVALGTE	Jording	Jordmåling
	Jordelektroder	Jordmotstand

INNHOLDSFORTEGNELSE

HOVEDRAPPORT

UNDERLAG FOR BEREKNINGER OG MÅLINGER PÅ JORDELEKTRODE I FORSKJELLIGE ELKRAFTANLEGG	4
---	---

VEDLEGGSRAPPORT 1

JORDELEKTRODER I ELKRAFTANLEGG	7
--------------------------------	---

V1.1	INNLEDNING	8
V1.2	KULEFORMEDE ELEKTRODER	9
V1.3	VERTIKALE JORDSPYD	12
V1.4	HORISONTALE JORDLEDERE	15
V1.5	PLATEELEKTRODER	19
V1.5	KOMBINASJONER AV ENKLE ELEKTRODER	20
V1.7	MASKENETT	22
V1.8	JORDLINER PÅ KRAFTLEDNINGER OG -KABLER	23
V1.8.1	Innledning	23
V1.8.2	Reduksjonsfaktor	24
V1.8.3	Kabelskjermer	29
V1.8.4	Nullsystemimpedans	30
V1.8.5	Jordimpedans ved 50 Hz	31
V1.8.6	Jordliner med begrenset utstrekning	33
V1.8.7	Beregning av strømfordeling og potensial rundt et feilsted	34
V1.8.8	Jordlinearrangement med diskontinuiteter	35
V1.8.9	Bølgeimpedans for jordliner og mastejordinger	37
V1.9	REFERANSER	37

VEDLEGGSRAPPORT 2

BEREGNINGSMODELLER FOR JORDELEKTRODER I ELKRAFTANLEGG	38
---	----

V2.1	INNLEDNING	39
V2.2	FUNDAMENTAL DC- OG 50 Hz-MODELL FOR JORDELEKTRODER	40
V2.3	BEREGNINGSMODELLER FOR DC- OG 50 Hz MOTSTANDER	42
V2.3.1	Matrisemetoden	42
V2.3.2	Kombinert integrasjon/matrisemetode	44
V2.3.3	Parametrisk bestemmelse av jordmotstand, skritt- og berøringsspenning	45
V2.4	GRUNNLEGGENDE KARAKTERISTIKKER FOR IMPULSMOTSTAND	48
V2.4.1	Innledning	49
V2.4.2	Bølgeforplantningskarakteristikk for jordledere	49

V2.4.3	Bølgeimpedanskarakteristikk for jordledere	53
V2.4.4	Innvirkning på bølgekarakteristikker fra ionisering av jordsmonnet	57
V2.5	BEREGNINGSMODELLER FOR IMPULSMOTSTAND	59
V2.5.1	Beregningsmodeller basert på bølgeforplantning	62
V2.5.2	Beregningsmodeller basert på konsentrerte elementer	67
V2.6	REFERANSER	71
VEDLEGGSRAPPORT 3		
METODER FOR MÅLING AV JORDMOTSTAND I ELKRAFTANLEGG		72
V3.1	INNLEDNING	73
V3.2	MÅLING AV JORDRESISTIVITET	75
V3.2.1	Inspeksjon	76
V3.2.2	Dybdevariasjonsmetoden	76
V3.2.3	Topunktsmetoden	76
V3.2.4	Firepunktsmetoden	77
V3.2.5	Resistivitet dypt i jordsmonnet	79
V3.2.6	Jordmodeller	80
V3.3	MÅLING AV JORDMOTSTAND	81
V3.3.1	Driftsfrekvens/lavfrekvens, små elektrodeanlegg	81
V3.3.2	Driftsfrekvens, store elektrodeanlegg	85
V3.3.3	Impulsmotstand	87
V3.4	MÅLING AV SKRITT- OG BERØRINGSSPENNINGER	89
V3.5	METODER FOR Å LØSE PRAKTISKE MÅLEPROBLEM	89
V3.5.1	Plassering av referanseelektroder for jordmotstandsmåling	89
V3.5.2	Teoretisk og praktisk avstand mellom måleobjekt og referanseelektroder	93
V3.5.3	Måling av jordmotstand for større elektrodesystem	95
V3.5.4	Dårlige kontakter i elektrodeanlegget	98
V3.5.5	Valg av jordmålere	99
V3.5.6	Måling av jordresistivitet	99
V3.5.7	Måling av impulsmotstand	99
V3.6	REFERANSER	100
APPENDIX 1		
DEFINISJONER OG BEGREPER MED RELASJON TIL JORDING		101

UNDERLAG FOR BEREGNINGER OG MÅLINGER PÅ JORDELEKTRODER I FORSKJELLIGE ELKRAFTANLEGG

Beskrivelse av underlag nødvendig for å tilfredsstille sikkerhetsmessige og tekniske krav samt påpeking av muligheter og begrensninger ved fastlegging av stasjoners og jordliners jordmotstand.

Analytiske formler og kurver for driftsfrekvent jordmotstand til praktiske jordelektroder er angitt med bakgrunn i litteratur og normer. Jordliners betydning for å begrense virkningen av feilstrømmer på kraftledninger og -kabler er beskrevet (vedleggsrapport 1). Det er gitt en kortfattet innføring i grunnlaget for EDB-baserte beregningsmodeller og grunnleggende karakteristikk for impulsmotstand (vedleggsrapport 2). Metoder for måling av jordresistivitet, jordmotstand og løsning av praktiske måleproblem er beskrevet (vedleggsrapport 3).

Beregning av jordmotstand for større elektrodeanlegg blir sjelden gjennomført før anlegget er ferdigbygd. Dersom det stilles strenge krav til lav overgangsmotstand mot sann jord og det er mistanke om at motstanden kan bli høy, kan det i mange tilfeller være hensiktsmessig å utføre måling av jordresistivitet og beregning av jordmotstand.

Noe av hovedgrunnlaget for utledning av analytiske formler for jordmotstand og kurver som brukes for avlesing av jordmotstand, skritt- og berøringsspenninger (parametrisk bestemmelse), er som oftest strømfordeling i homogent jordsmonn. Det forutsettes at andre elektroder eller ledende gjenstander i jorden er plassert så langt unna at de ikke påvirker forhold som har betydning for de elektrodeanlegg som analyseres.

De metoder som er utviklet for måling av jordresistivitet eller jordmotstand forutsetter at nedgravde metalliske gjenstander ligger så langt fra elektrodeanleggene og hjelpeeletroder at de ikke påvirker måleresultatene. I tillegg gjelder vanligvis forutsetningen om homogent jordsmonn også her.

Jordspyd, horisontale jordledere som stråler ut fra et felles punkt eller maskenett er de mest vanlige elektroder som brukes i elkraftanlegg. Ofte er det vanlig å bruke både flere jordspyd og horisontale jordledere for å redusere 50 Hz (driftsfrekvent) jordmotstand. Dersom jordingsforholdene endrer seg vesentlig innenfor et anleggsområde er det ofte fordelaktig å kombinere både jordspyd og horisontale jordledere. Dette gjelder spesielt dersom jordresistiviteten avtar med økende dybde.

Maskenett basert på nedgravde kopperledere brukes normalt for å få best mulig potensial-utjevning under kraft- eller transformatorstasjoner. Dersom slike anlegg blir lagt oppå godt drenerende underlag er det ofte nødvendig med et grovere maskenett under hovednettet. Muligheter for å oppnå dypjording vha. jordspyd må alltid benyttes for å få tilstrekkelig lav jordmotstand.

Jordliner på kraftledninger omfatter både gjennomgående jordliner og innføringsvern. De er definisjonsmessig ikke jordelektroder men jordingsanlegg tilknyttet elektroder ved mastene. Til forskjell fra vanlige jordelektroder får jordliner ved driftsfrekvens vanligvis et betydelig induktivt bidrag i tillegg til resistansverdien. Derfor innføres begrepet jordimpedans for jordliner.

Jordliner ut fra et elkraftanlegg sees på som en utstrakt elektrode med lav impedans fordi de knytter sammen et stort antall mastejordinger. Impedansen er ofte lavere enn den lokale jordmotstanden i stasjonen. Sett fra mastene ute på kraftledningen kan jordlinens impedans være enda lavere fordi den betraktes i begge retninger og gir dermed parallellkobling av impedanser.

Jordliner har flere gunstige virkninger for vern av linjer og stasjoner. De reduserer strøm til jord ved jordfeil i stasjoner og på kraftledninger uansett feilsted ved gjennomgående jordliner. Dette reduserer induerte spenninger i nærliggende ledninger, jordpotensial, skritt- og berøringsspenninger ved tilknyttede elektrodeanlegg. Dersom de er utført som toppliner og jordmotstanden i mastene ikke er for høy, vil de skjerme faselederne mot lynnedslag.

Beregningsgrunnlaget som er etablert for DC eller 50 Hz kan ikke uten videre brukes i forbindelse med lynstrømmer eller andre hurtige strømforløp. Ved driftsfrekvens er det hovedsakelig den geometriske utstrekning av elektrodeanlegget og jordsmonnets spesifikke motstand som bestemmer motstanden mot fjern jord. Normalt reduseres jordmotstanden med økende utstrekning på elektrodeanlegget.

Dersom en nedgravd jordelektrode påtrykkes impulsstrøm med amplitude på noen kA, er det vanligvis ikke lineære forhold mellom strøm ut fra elektroden og spenningsfall i jordsmonnet. På grunn av høy lokal feltstyrke og ionisering av luft og jordsmonn oppstår det ofte utladninger som gjør at jordsmonnets kjemiske sammensetning gjennomgår forandringer under selve utladningsforløpet. Dette har normalt stor betydning for jordens elektriske egenskaper og i noen grad også for jordelektroden.

Ved lynnedslag vil det normalt flyte store feilstrømmer i deler av elektrodeanlegget før strømmen går til jord. Det kan oppstå betydelige spenningsdifferanser mellom ulike deler av samme elektrodeanlegg. I tillegg vil høyfrekvente strøm- og spenningsbølger dempes og forvrenges etter hvert som de forplanter seg langsetter nedgravde jordledere på lignende måte som for ledere i luft. Forhold som er bestemmende for impulsmotstanden til jordledere og som

gjør det nødvendig å skille den fra driftsfrekvent jordmotstand er behandlet mer detaljert i vedleggsrapport 2.

Måling av jordmotstand kan avvike en del fra beregningsverdier. Dette skyldes vanligvis usikkerhet i verdien på jordresistiviteten. Den er et viktig grunnlag for beregningene. Resistiviteten kan variere i betydelig grad med jordsmonnets temperatur og fuktighet. I tillegg er det en del vanlige problemer og vanskeligheter forbundet ved å gjennomføre målinger av jordmotstand eller -resistivitet. Disse vanskelighetene vil normalt være noe forskjellig avhengig av størrelsen på elektrodeanleggene som skal måles.

De vanligste målemetodene, krav til jordmålere og registreringsutstyr samt en del praktiske tiltak for å redusere noen av de mest utpregede måletekniske problemene er nærmere beskrevet i vedleggsrapport 3.

VEDLEGGSRAPPORT 1

JORDELEKTRODER I ELKRAFTANLEGG

JORDELEKTRODER I ELKRAFTANLEGG

Beskrivelse av ulike jordelektroder med den hensikt å påpeke viktige krav til prosjektering av elektrodeanlegg.

På bakgrunn av litteratur og praktisk erfaring er forenklete beregningsformler for DC og 50 Hz jordmotstand for forskjellige elektrodetyper angitt. For å redusere jordmotstanden er det ofte fordelaktig å kombinere ulike jordelektroder i samme anlegg. Innvirkning av jordline på jordmotstanden i stasjonsanlegg er behandlet.

V1.1 INNLEDNING

Jording er aktuelt i mange sammenhenger. Som eksempel kan nevnes elkraft-, radio- og antenneanlegg. En hensiktsmessig jording innebærer ofte at overgangsmotstanden mot sann (fjern) jord må være så lav som mulig. Dersom det er vanskelige jordingsforhold ønskes ofte tilstrekkelig lav motstand for det aktuelle jordingsformål.

Selv om beregning av jordmotstand sjelden gjennomføres før et anlegg blir bygd, kan det i mange tilfeller være hensiktsmessig å utføre måling av jordresistivitet og beregning av motstander. Dette gjelder spesielt hvor det stilles strenge krav til lav overgangsmotstand mot sann jord og hvor det er mistanke om at jordmotstanden kan bli høy.

Måling av jordresistiviteten kan gi en pekepinn på om et jordspyd eller rør drevet ned til en bestemt dybde er å foretrekke framfor en horisontal jordleder på relativ grunt nivå eller omvendt. Underlag for valg mellom flere nedgravde jordspyd, en eller flere horisontale jordledere eller flere horisontale ledere ut fra et felles punkt fås også fra slike målinger. Målinger kan gi underlag for å avgjøre om det er nødvendig med ekstra jording med f.eks. jordspyd dersom det velges flatejording med maskenett eller tynne plater. Enkle svar på slike problemstillinger kan ikke alltid gis med bakgrunn i målinger. Dette skyldes at resistiviteten og andre egenskaper til jordsmonnet kan være svært forskjellig innenfor et begrenset geografisk område.

Motstanden for ulike elektrodearrangement kan beregnes relativt enkelt dersom jordsmonnet antas å være homogent. Innvirkning på jordmotstanden fra jordresistivitets forandring med dybden kan også beregnes for en del praktiske konfigurasjoner. I denne vedleggsrapporten er formel og diagrammer for enkle og praktiske elektrodearrangement som ofte blir brukt i elkraftanlegg basert på 100 Ω m jordresistivitet. Selv om en så lav resistivitet sjelden oppnås under norske forhold, er denne verdien valgt fordi den ofte blir benyttet i litteraturen ved analyse av elektrodeanlegg.

Ved driftsfrekvens er jordmotstanden proporsjonal med jordresistiviteten. Formelverket er utviklet med utgangspunkt i DC-betraktninger men gjelder med god tilnærming også ved driftsfrekvens. Det henvises til faglitteraturen for mer detaljert beskrivelse av teorigrunnlaget for formlene, f.eks. [1], [2], [3], [4].

For enkle eller parallelle horisontale jordledere med lengder opp til ca 50-100 meter kan de oppgitte formlene ofte brukes for beregning av impulsmotstand ved lynstrømmer. Dette gjelder imidlertid ikke for svært steile bølgeformer med fronttider kortere enn ca 1-2 μ s.

Impulsmotstand og jordingsforhold ved høyfrekvente strøm- og spenningsforløp er omhandlet i vedleggsrapport 2. For elektrodeanlegg med høy jordmotstand, stor strøm og høye spenninger kan imidlertid den effektive jordmotstand reduseres pga. ionisering av jordsmonnet.

V1.2 KULEFORMEDE ELEKTRODER

Selv om det er lite praktisk å konstruere halvkuleformede elektrodearrangement i elkraftanlegg, er det imidlertid flere deler i et anlegg som kan sammenlignes med halvkuler. Større nedgravde metallkonstruksjoner, armerte fundamenter for master eller salting rundt elektroder hvor det er ønskelig å redusere jordresistiviteten, er eksempler på slike anleggsdeler.

For en halvkule nedgravd ved jordoverflaten i homogent jordsmonn kan jordmotstanden mot fjern (sann) jord beregnes ut fra (1.1), [1].

$$R_j = \frac{\rho}{2\pi r} \quad [\Omega] \quad (1.1)$$

hvor

ρ jordresistivitet [Ω m]
 r halvkulens radius [m]

Jordmotstanden til en halvkule med radius r_o nedgravd ved jordoverflaten og omgitt av jordsmonn med resistivitet ρ_o ut til avstanden r , kan beregnes ut fra ligning (1.2), [1].

$$R_j = \frac{\rho}{2\pi r} + \frac{\rho_o}{2\pi} \left(\frac{1}{r_o} - \frac{1}{r} \right) \quad [\Omega] \quad (1.2)$$

Denne ligningen kan brukes til beregning av jordmotstand for elektroder hvor jordsmonnet saltes for å oppnå bedre jordingsforhold.

Dersom fundamentjordingen eller et saltet område har volumet V , kan motstanden tilnærmet beregnes ut fra ligning (1.1). For å bestemme den ekvivalente radius, r_{ekv} , som må erstatte r i (1.1), kan formelen i (1.3) benyttes.

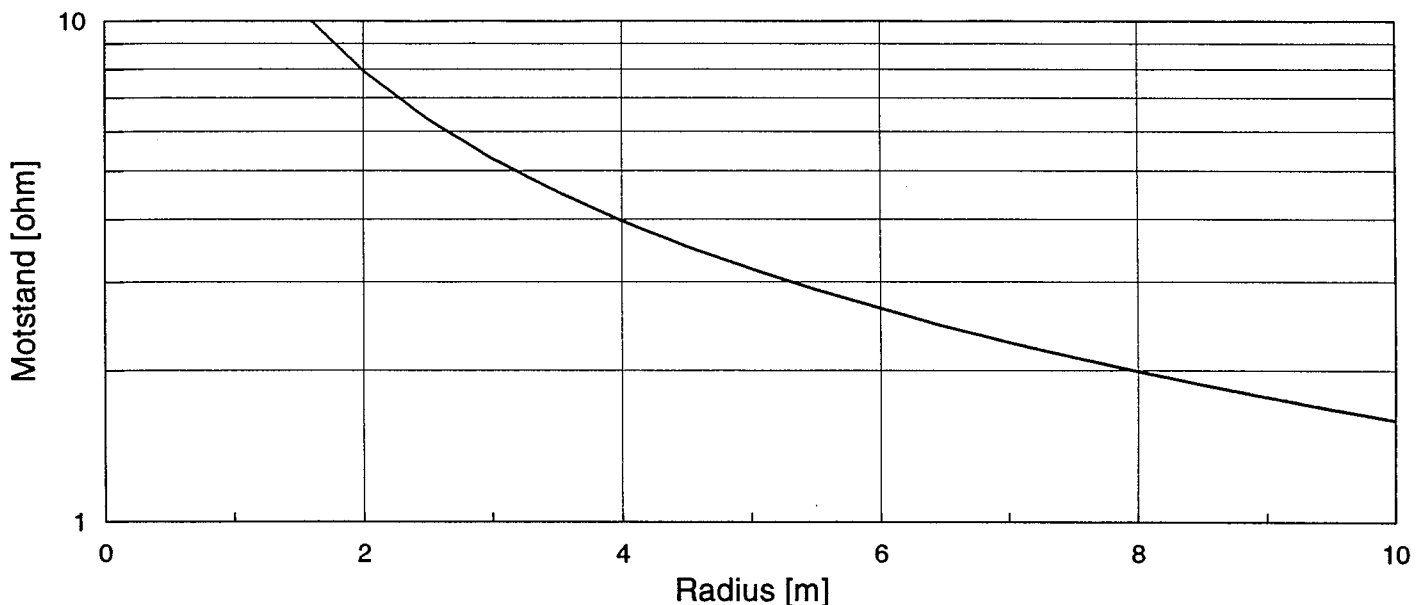
$$r_{ekv} = 0.78 \sqrt[3]{V} \quad [m] \quad (1.3)$$

hvor

r_{ekv} ekvivalent halvkuleradius [m]

V fundamentets eller saltområdets volum [m^3]

Figur V1.1 viser beregningsresultater for jordmotstanden til en halvkule som er nedgravd ved jordoverflaten i et homogent jordsmonn med $\rho=100 \Omega m$.



Figur V1. Beregning av jordmotstand for en halvkule nedgravd ved overflaten i homogent jordsmonn med resistivitet $\rho=100 \Omega m$ som funksjon av halvkulens radius.

Dersom det av ulike grunner er nødvendig med et mest mulig homogent felt i nærheten av jordelektroden, kan en nedgravd kuleelektrode benyttes. Jordmotstanden for en nedgravd kule i homogent jordsmonn med avstand D mellom kulesenter og jordoverflaten kan beregnes ut fra ligning (1.4), [2].

$$R_j = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{2D+r} \right] \quad (1.4)$$

hvor

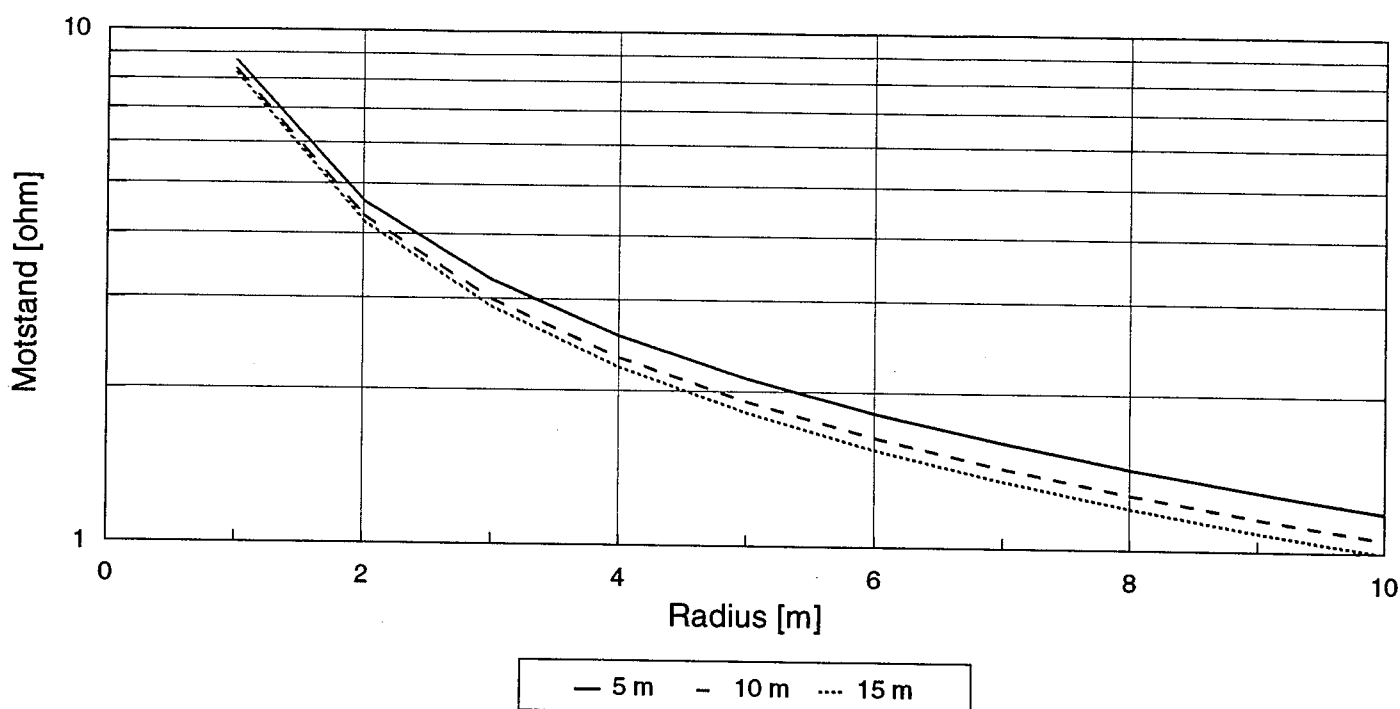
ρ jordresistivitet [Ωm]

r kulens radius [m]

D avstand mellom jordoverflaten til kulens sentrum [m]

Det er forutsatt at forbindelsen fra kule til jordoverflaten utføres med en isolert leder. I motsatt fall vil jordmotstanden kunne reduseres betydelig i forhold til formelen.

I figur V1.2 er det vist beregnede verdier basert på ligning (1.4) for jordmotstanden til en nedgravd kule.



Figur V1.2. Beregning av jordmotstand for en nedgravd kule som funksjon av kuleradius med nedgravingsdybde som parameter. Resistivitet $\rho=100 \Omega\text{m}$.

Det framgår av figurene V1.1 og V1.2 at nedgravde halvkule- eller kuleelektroder egner seg dårlig som praktiske elektroder i elkraftanlegg. Dette skyldes at det trengs store dimensjoner og stort materialforbruk sammenlignet med andre elektrodetyper for å komme tilstrekkelig langt ned i jordmotstand.

V1.3 VERTIKALE JORDSPYD

En ofte benyttet jordingsmetode er å drive en eller flere metallstenger dypt ned i jordsmonnet der hvor det er mulig. Typiske jordsmonn hvor dypjording med fordel kan brukes er f.eks. løsmasser, morene og leire. Slik dypjording er svært hensiktsmessig for å oppnå tilstrekkelig lav jordmotstand dersom jordresistiviteten reduseres med økende dybde. I morenejord eller annen tørr løsmasse kan det være nødvendig å drive elektrodene ned til 10-15 m dybde eller mer for å få tilstrekkelig lav overgangsmotstand til fjern jord.

Dersom det settes ned flere jordspyd blir de normalt sammenkoplet med uisolerte ledere forlagt enten i egne grøfter eller nedgravd i jorden. Isolerte ledere kan også brukes for å unngå eller redusere korrosjon pga. galvanisk potensialforskjell mot spydene eller pga. lekkstrømmer fra andre kilder. Skjøter og sammenkoplinger kan med fordel korrosjonsbeskyttes.

Vertikale jordspyd kan med fordel brukes ved jording av lynvernanlegg eller apparatjording for viktige installasjoner på fjelltopper dersom det bores hull som fylles med egnet fyllmasse. Bentonitt eller petrolkoks er eksempler på slik fyllmasse.

Normalt brukes lange stenger eller rør av kobberkledd stål eller rent kobber for mindre jordspyd. Skjøting av flere rør eller stenger bør foretas med konisk sammenkopling i stedet for gjengeforbindelser. Ved skruforbindelser kan det være fare for unødig overgangsmotstand pga. korrosjon. Stålspyd som drar med seg en sammenhengende jordleder kan med fordel også brukes. Det har imidlertid tidligere blitt rapportert om korrosjonsproblemer med en slik kombinasjon.

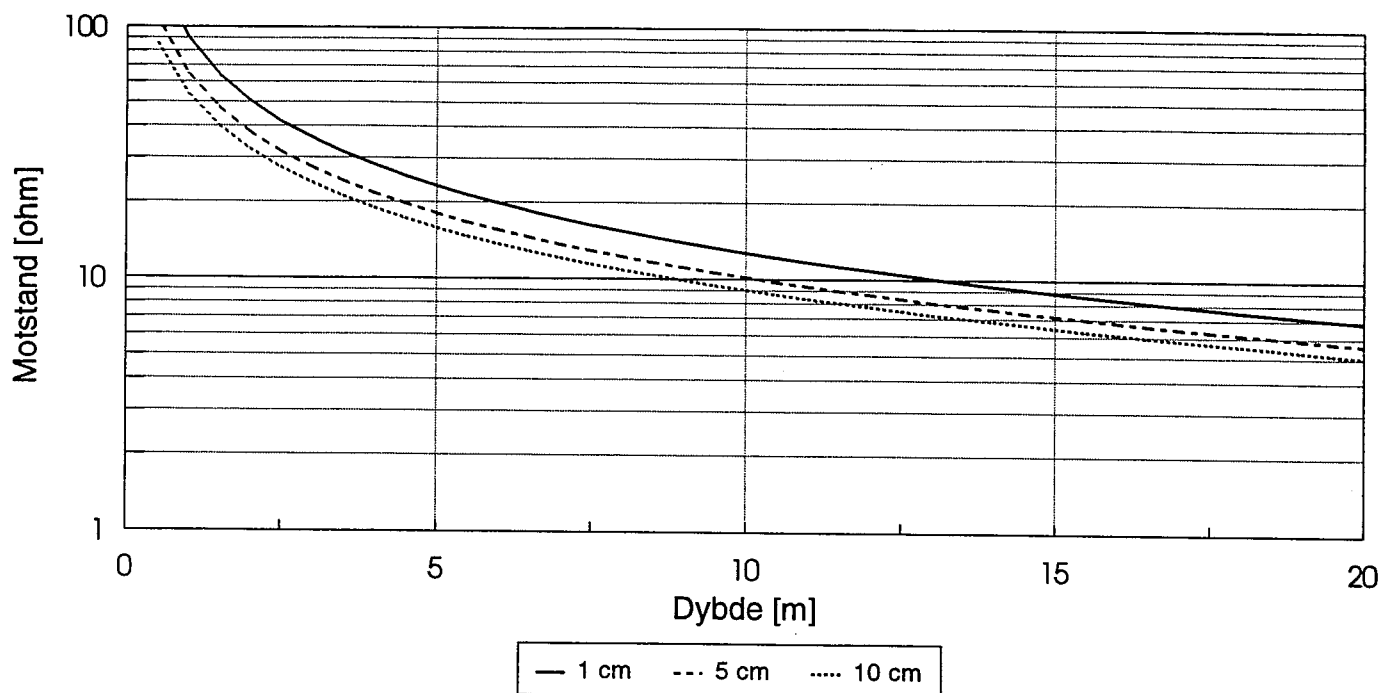
For beregning av jordmotstand til et vertikalt spyd drevet ned i homogen jord kan formelen i ligning (1.5) benyttes, [1].

$$R_j = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{8l}{d} - 1 \right] \quad [\Omega] \quad (1.5)$$

hvor

ρ	jordresistivitet [Ωm]
d	jordspydets diameter [m]
l	jordspydets lengde [m]

I figur V1.3 er det vist beregningsresultater basert på (1.5) for jordmotstand til vertikale jordspyd nedgravd i homogent jordsmonn med spyddiameter som parameter. Innenfor et praktisk tykkelsesområde har spydets diameter relativ liten betydning for motstanden. Det er hovedsakelig de mekaniske forhold og hvor langt ned spydene skal drives som blir bestemmende for valg av dimensjoner.



Figur V1.3. Beregning av jordmotstand for et enkelt vertikalt jordspyd i homogent jordsmonn med $\rho=100 \Omega\text{m}$ som funksjon av spydlengde. Spydets diameter er parameter.

Dersom flere jordspyd plasseres i ring og koples sammen, reduseres jordmotstanden med økende antall spyd. Motstanden blir imidlertid noe større i forhold til en parallellkobling av de enkelte motstandsverdiene pga. gjensidig kopling mellom spydene. For et arrangement bestående av flere like lange spyd plassert i ring og med innbyrdes avstand lik eller større enn spydlengden, kan ligning (1.6) brukes for å regne ut den resulterende motstand mot sann jord, [1].

$$R_{jn} = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{8l}{d} - 1 + \frac{l}{D} \frac{2n}{\pi} \ln \frac{2n}{\pi} \right] \quad [\Omega] \quad (1.6)$$

$$R_{jn} = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{8l}{d} - 1 + \frac{2l}{s} \ln \frac{2n}{\pi} \right] \quad [\Omega]$$

hvor

- ρ jordresistivitet [Ωm]
- n antall jordspyd
- s avstand mellom jordspydene [m]
- l jordspydets lengde [m]
- d jordspydets diameter [m]
- D diameter av den ring hvor spydene plasseres langsetter omkretsen [m]
 $\pi D \approx ns$ når n er stor

Reduksjon av jordmotstanden for jordspyd kan også oppnås med sammenkopling av flere spyd plassert etter hverandre på en rett linje. Med innbyrdes avstand mellom spydene større eller lik spydlengden kan ligning (1.7) brukes for beregning av resulterende jordmotstand, [1].

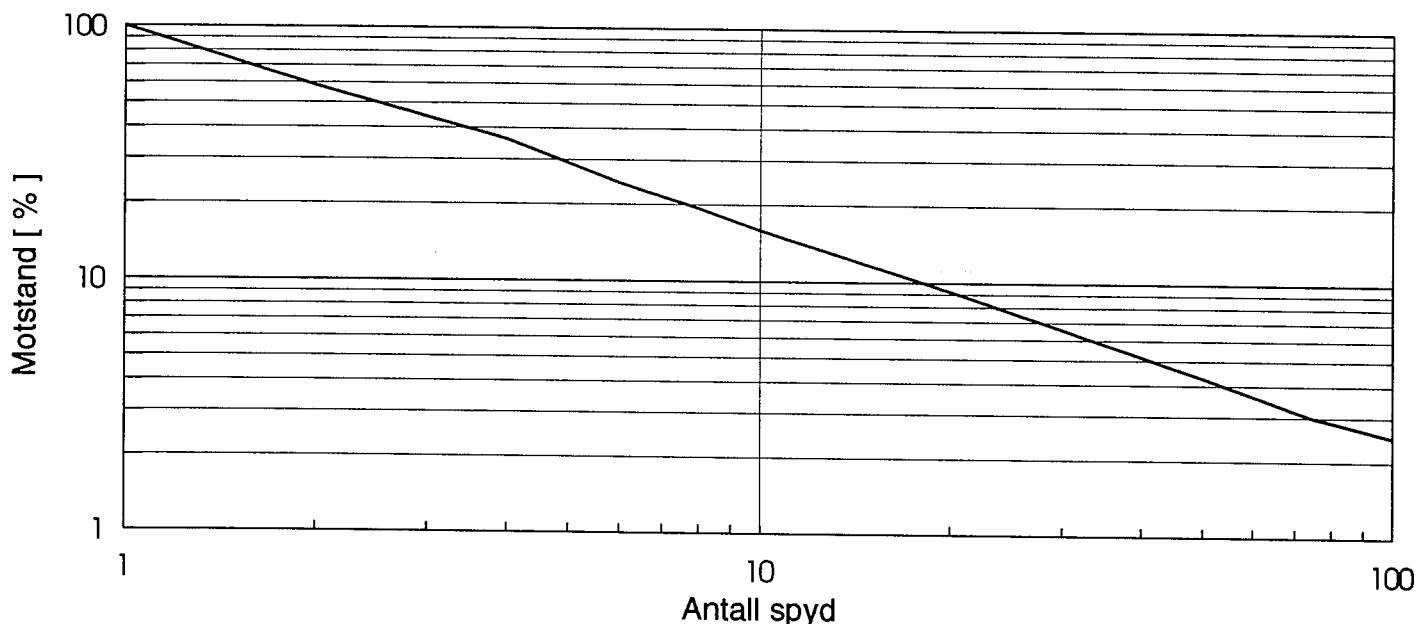
$$R_{jn} = \frac{1}{n} \left[R_{1j} + \frac{\rho}{\pi s} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right] \quad [\Omega] \quad (1.7)$$

hvor

ρ	jordresistivitet $[\Omega m]$
n	antall jordspyd
s	avstand mellom jordspydene $[m]$
R_{1j}	motstand for et enkelt jordspyd $[\Omega]$

Selv om strømfordelingen i bakken blir noe forskjellig avhengig av om jordspydene er plassert i ring eller på en rett linje, vil den resulterende jordmotstand i homogent jordsmonn bli relativt like for begge alternativene.

Figur V1.4 viser beregnede verdier for jordmotstanden til flere parallellkoblede spyd i forhold til et enkelt spyd som funksjon av antall spyd plassert langs ringens omkrets eller langs en rett linje med de forutsetninger som er beskrevet foran. I et praktisk anlegg vil imidlertid motstanden kunne avvike betydelig fra verdiene i figuren pga. variasjoner i grunnforholdene. Beregningene er basert på at forholdet mellom spydets lengde og diameter er 120. Verdiene er representative for et lengde/diameter forhold fra 60 til 240.



Figur V1.4 Beregnede verdier av resulterende jordmotstand for flere vertikale spyd plassert i ring eller langs en rett linje i forhold til motstanden for et enkelt spyd i homogent jordsmonn med $\rho=100 \Omega m$. Lengde/diameter-forholdet er lik 120.

V1.4. HORISONTALE JORDLEDERE

I mange tilfeller er det hensiktsmessig og nødvendig å utføre jording vha. horisontale jordledere. I homogent jordsmonn vil jordmotstanden for en horisontal jordleder reduseres ved økende nedgravingsdybde. De øvre jordlagene er normalt utsatt for uttørking om sommeren og frost om vinteren. For å angi omtrentlige motstandsverdier kan det derfor være aktuelt med beregninger for jordledere som ligger i/på jordoverflaten.

Jordmotstanden for en horisontal leder halvvegs nedgravd i jordoverflaten kan beregnes ut fra ligning (1.8) og gjelder for $l \gg d/2$, [1].

$$R_j = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \frac{4l}{d} - 1 \right] \quad [\Omega] \quad (1.8)$$

hvor

ρ	jordresistivitet $[\Omega m]$
d	jordlederens diameter $[m]$
l	jordlederens lengde $[m]$
h	nedgravingsdybde som angitt i (1.9) $[m]$

Dersom den samme horisontale lederen graves helt ned i homogent jordsmonn og $l \gg d/2$, kan jordmotstanden beregnes vha. ligning (1.9), [1].

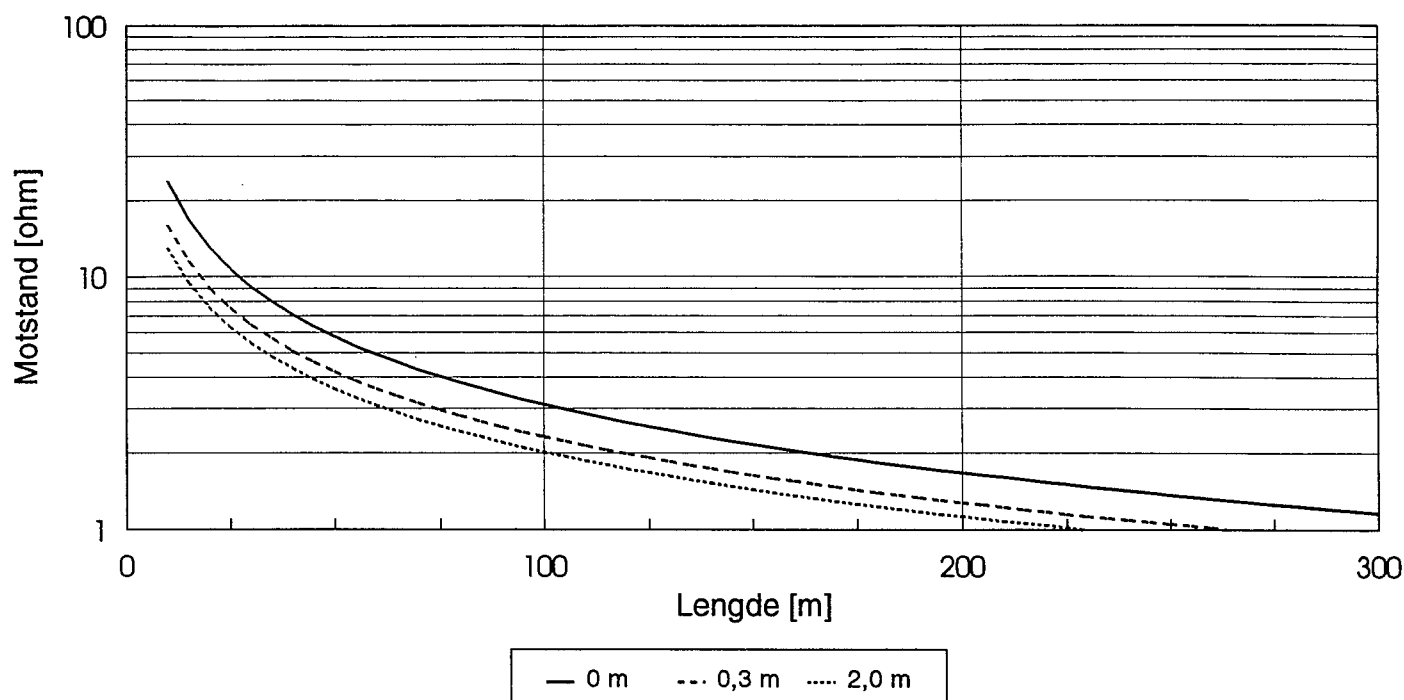
$$R_j = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \frac{2l}{\sqrt{dh}} - 1 \right] \quad [\Omega] \quad (1.9)$$

For horisontale jordledere gjelder også som for vertikale jordspyd at tykkelsen på lederen har relativ liten betydning for jordmotstanden. Dimensjonene bestemmes normalt ut fra krav til mekanisk styrke, korrosjonsforhold og forventet strømbelastning. Figur V1.5 viser beregnede jordmotstander for en horisontal Cu-jordtråd med 50 mm^2 tverrsnitt som funksjon av lengden med nedgravingsdybden som parameter.

Dersom det brukes et tynt horisontalt metallbånd i stedet for en rund jordleder, reduseres motstandsverdiene noe. For et bånd med bredde b $[m]$ kan en ekvivalent lederdiameter beregnes vha. (1.10)

$$d_{ekv} \approx 0,44 b \quad [m] \quad (1.10)$$

og formlene i ligning (1.8) og (1.9) kan fortsatt benyttes ved å erstatte d med d_{ekv} .



Figur V1.5. Beregnede jordmotstander for en horisontal 50 mm² Cu-jordleder nedgravd i homogent jordsmonn med $\rho=100 \Omega\text{m}$ som funksjon av lederlengde med dybden som parameter.

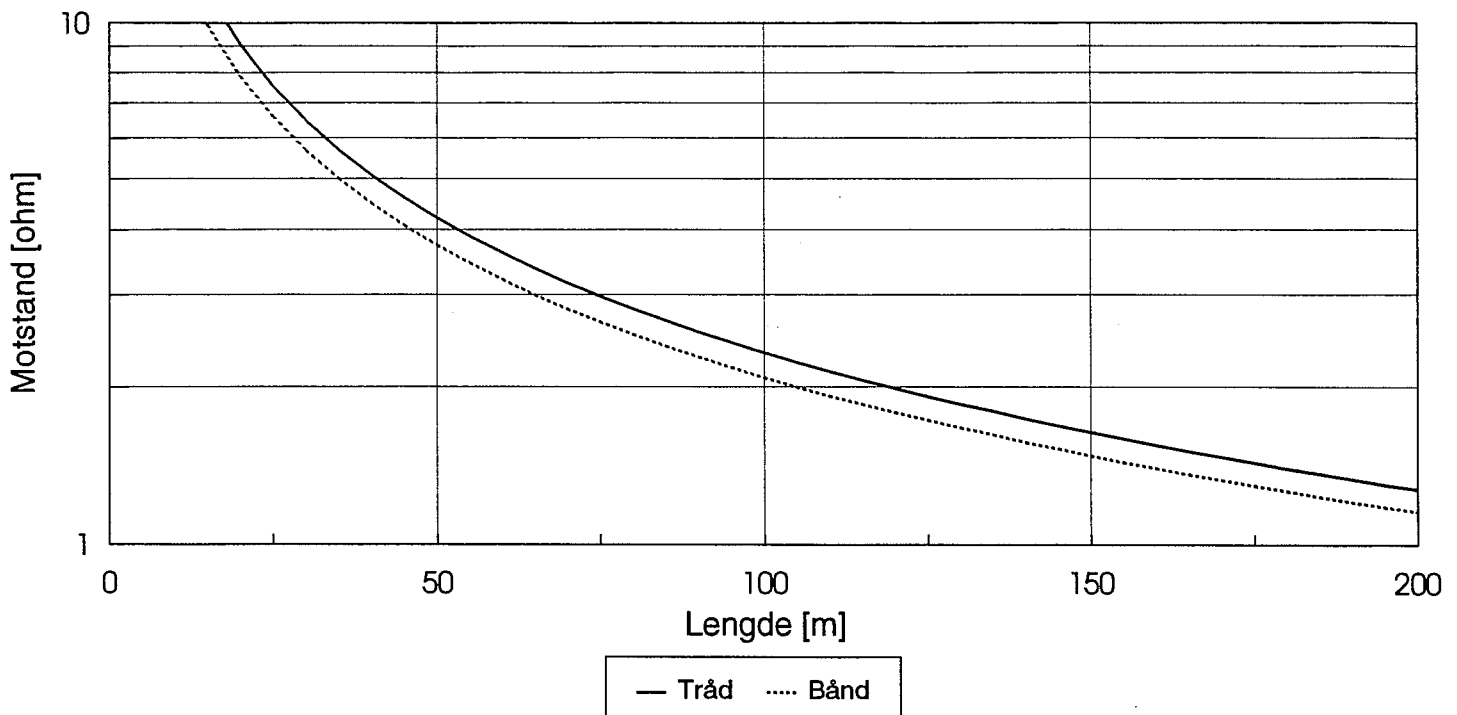
Som alternativ til den forenklete måten å beregne jordmotstand på for båndformede elektroder som vist foran, kan ligning (1.11) brukes. Den tar hensyn både til båndets bredde og nedgravingsdybden, [2]. Formelen gjelder under forutsetning av at $h \geq 1,5b$.

$$R_j = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{4l}{b} + \ln \frac{l}{2h} \right] \quad [\Omega] \quad (1.11)$$

hvor

- ρ jordresistivitet [Ωm]
- l båndets lengde [m]
- b båndets bredde [m]
- h nedgravingsdybde [m]

Figur V1.6 viser en sammenligning mellom beregnede jordmotstander for en 50 mm² horisontal Cu-leder og et tynt 20 cm Cu-bånd med tilsvarende tverrsnitt hvor begge er nedgravd på 30 cm dybde i homogent jordsmonn. For båndet er det bare en marginal reduksjon i jordmotstanden sammenlignet med den sirkulære jordlederen.



Figur V1.6 Sammenligning mellom beregnede jordmotstander for horisontal tråd og båndelektrode i homogent jordsmonn med $\rho=100 \Omega\text{m}$ som funksjon av lengden. Nedgravingsdybden er 0,3 m.

Parallellkopling av flere horisontale ledere vil redusere jordmotstanden i forhold til en enkelt leder. Det er hensiktsmessig å la lederne stråle ut fra et felles punkt. Fordelen med et slikt elektrodearrangement er at den initielle jordmotstanden for en lyn- eller høyfrekvent strøm er lavere enn impedansen sett inn mot en enkel eller få parallelle ledere.

Den resulterende jordmotstanden for n ledere som er halvvegs nedgravd i homogent jordsmonn og som stråler ut fra et felles punkt kan beregnes ut fra ligning (1.12), [1]. Det er forutsatt at vinkelen mellom strålene er innbyrdes like.

$$R_{jn} = \frac{\rho}{n\pi l} \left[\ln \frac{4l}{d} - 1 + N(n) \right] \quad [\Omega] \quad (1.12)$$

hvor

- ρ jordresistivitet [Ωm]
- l lengden av hver stråle/jordleder [m]
- d jordlederens diameter [m]
- $N(n)$ konstanter gitt i Tabell V1.1
- h nedgravingsdybde som angitt i (1.13) [m]

Dersom lederne graves ned må jordlederens diameter d i (1.12) erstattes med en ekvivalent diameter, d_{ekv} , gitt av ligning (1.13).

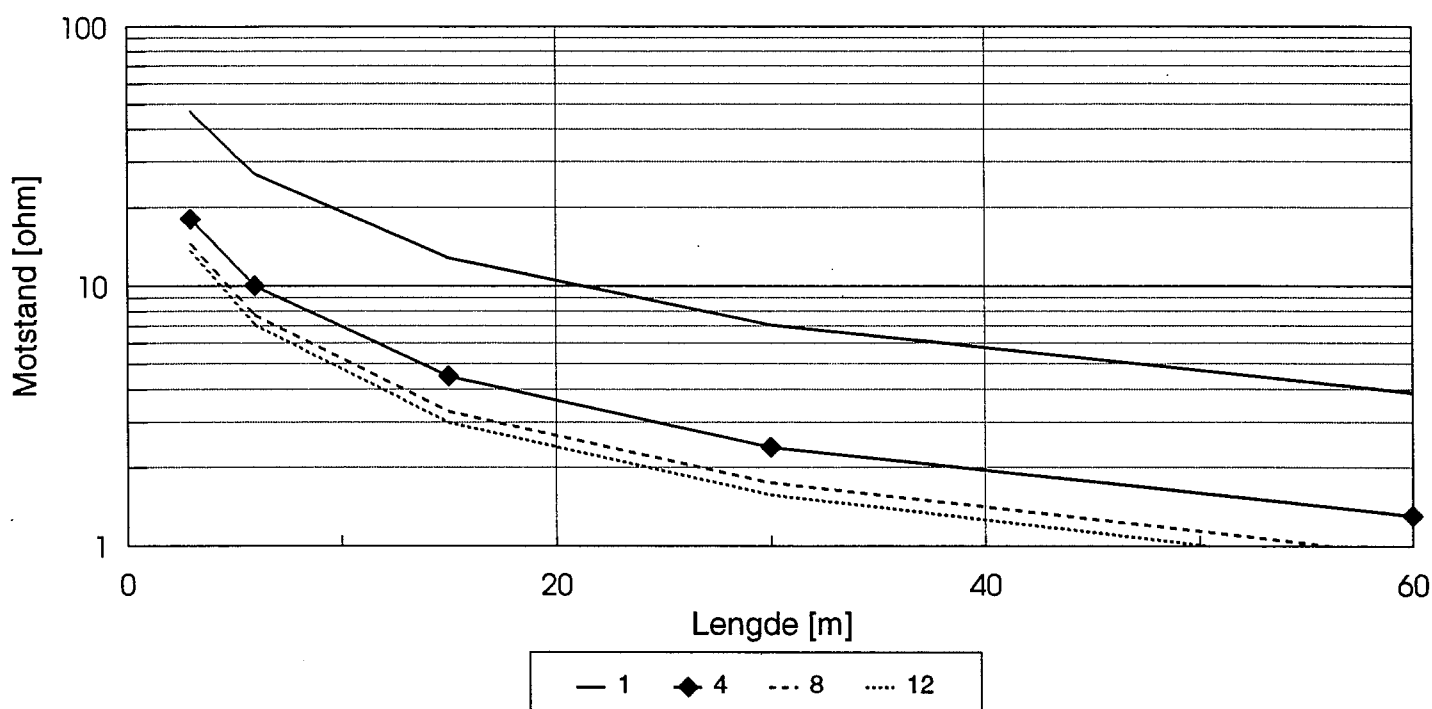
$$d_{ekv} = \sqrt{d h} \quad [m] \quad (1.13)$$

Tabell V1.1. Verdier for $N(n)$ til bruk i ligning (1.12).

n	2	3	4	6	8	12	100
$N(n)$	0,7 ¹⁾	1,5	2,5	4,4	6,5	11,0	116,0

¹⁾ Dersom de to lederne ligger vinkelrett på hverandre vil $N(2)$ bli lik 0,88.

Det er normalt ikke nødvendig å bruke mer enn 4-5 stråler. En ytterligere økning i antall stråler gir bare en mindre reduksjon i jordmotstanden. Figur V1.7 viser beregninger for jordmotstanden til 12,5 mm tykke ledere (ca 120 mm²) som stråler ut fra et felles punkt og nedgravd på 0,3 m dybde.



Figur V1.7 Beregning av jordmotstand for horisontale og innbyrdes like lange jordledere som stråler ut fra et felles punkt som funksjon av enkeltstrålens lengde. Antall stråler er parameter. Homogent jordsmonn med resistivitet $\rho=100 \Omega m$ og 0,3 m nedgravingsdybde.

Dersom en horisontal jordleder legges i ring på jordoverflaten (halvvegs nedgravd) til homogen jord, kan jordmotstanden for ringelektroden beregnes ut fra ligning (1.14), [1].

Dersom ringen graves helt ned til dybden h kan lederens diameter i (1.14) erstattes med en ekvivalent diameter gitt av (1.13).

$$R_j = \frac{\rho}{2\pi^2 R} \ln \frac{16R}{d} = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{8L}{\pi d} \quad [\Omega] \quad (1.14)$$

hvor

ρ	jordresistivitet $[\Omega m]$
R	radius av ringen $[m]$
L	lengden (omkretsen) av ringen $[m]$
d	jordlederens diameter $[m]$

Dersom jordlederen legges som en rektangulær fundamentjording med areal A $[m^2]$, kan jordmotstanden tilnærmet beregnes ut fra ligning (1.14) med en ekvivalent radius R_{ekv} bestemt av (1.15).

$$R_{ekv} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad [m] \quad (1.15)$$

V1.5 PLATEELEKTRODER

Tidligere ble jordplater mye brukt som elektroder. De har imidlertid et relativt høyt materialforbruk sammenlignet med andre elektroder. Ved krav om lavest mulig motstand vil maskenett normalt bli valgt i dag. Dersom maskene ikke er for store, blir jordmotstanden tilnærmet som for en plateelektrode.

Som midlertidig ekvipotensialisering under arbeid kan det være aktuelt å legge en hel plate på jordoverflaten. Jordmotstanden for en sirkulær plateelektrode på overflaten (egentlig halvvegs nedgravd) til et homogent jordsmonn kan beregnes ut fra (1.16), [1].

$$R_j = \frac{\rho}{2d} \quad [\Omega] \quad (1.16)$$

hvor

ρ	jordresistiviteten $[\Omega m]$
d	jordplatens diameter $[m]$
h	nedgravingsdybde som angitt i (1.17) og (1.18) $[m]$

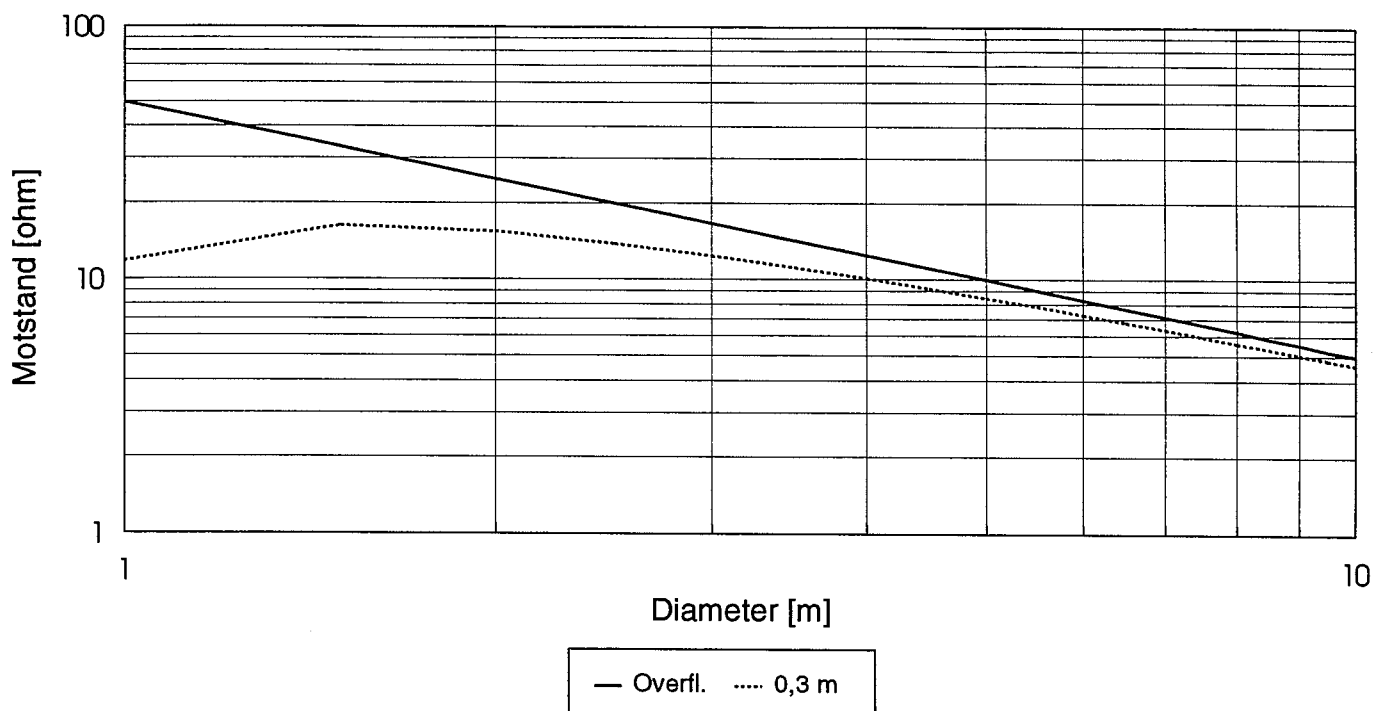
Dersom platen graves ned på en dybde som er *større* enn plateradius og plasseres horisontalt, kan jordmotstanden beregnes vha. ligning (1.17), [1].

$$R_j = \rho \left[\frac{1}{4d} + \frac{1}{8\pi h} \right] \quad [\Omega] \quad (1.17)$$

Dersom nedgravingsdybden er vesentlig *mindre* enn plateradius, kan jordmotstanden beregnes vha. ligning (1.18), [1].

$$R_j = \frac{\rho}{2d} \left[1 - \frac{8h}{\pi d} \right] \quad [\Omega] \quad (1.18)$$

Figur V1.8 viser jordmotstand for horisontale sirkulære plateelektroder plassert på jordoverflaten og nedgravd på 0,3 m dybde basert på (1.16) og (1.18). Forutsetningene for (1.18) er ikke helt oppfylt ved de laveste diameterverdiene.



Figur V1.8 Beregnede jordmotstander for sirkulære jordplater som funksjon av platediameter med nedgravingsdybden som parameter. Homogent jordsmonn med $\rho=100 \Omega\text{m}$.

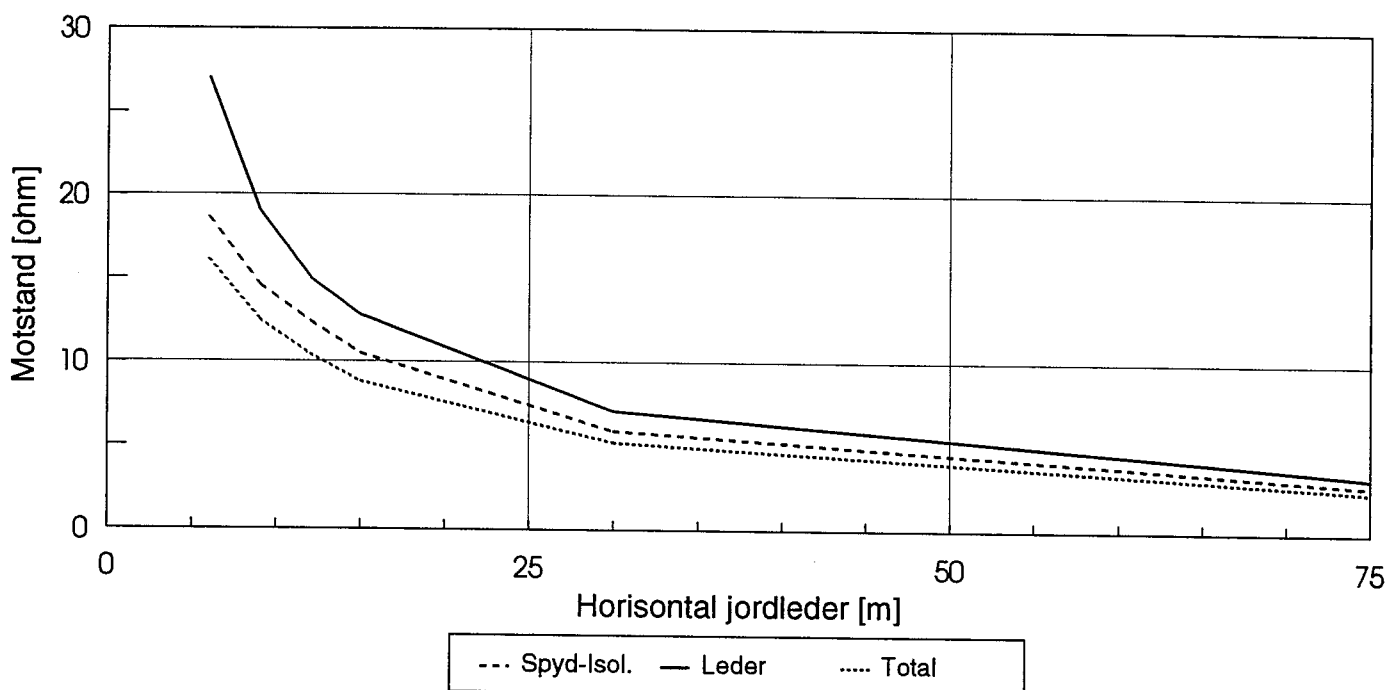
V1.6 KOMBINASJONER AV ENKLE ELEKTRODER

Det er ofte hensiktsmessig å kombinere flere elektrodetyper i et elektrodeanlegg for å få den resulterende jordmotstanden så lav som mulig. En kombinasjon av ringelektrode (fundamentjording) og jordspyd drevet lang ned i bakken er gjerne å foretrekke.

En annen kombinasjon som ofte blir brukt er horisontale jordledere (stråler) sammen med jordspyd. Dette er aktuelt der det er vanskelig å drive jordspyd langt ned i bakken nær mast og hvor det samtidig er enkelt å grave ned horisontale jordledere. Slik jording kan med fordel benyttes for å få ned jordmotstanden ved f.eks. lynstrømmer.

Figur V1.9 viser resulterende jordmotstand (Total) for 1,5 m lange jordspyd plassert på rett linje og forbundet med en horisontal *uisolert* jordleder på 0,3 m dybde, [1]. Avstanden mellom hvert spyd er lik spydlengden. For sammenligning er motstanden for sammenkopling av spydene alene med *isolert* leder (uten kopling til den horisontale jordleder) og motstanden til den horisontale jordleder alene også vist.

Sammenhengen mellom lengden på lederen og antall jordspyd framgår av Tabell V1.2.



Figur V1.9. Beregning av jordmotstand for en horisontal jordleder (Total) nedgravd på 0,3 m dybde i homogent jordsmonn med $\rho=100 \Omega\text{m}$ og koplet sammen med 1,5 m lange vertikale jordspyd med innbyrdes avstand lik spydlengden. Se teksten foran figuren for beskrivelse av parametrene.

Tabell V1.2. Sammenheng mellom antall jordspyd og lengden på den horisontale jordleder i Figur V1.9.

Lengde [m]	6	9	12	15	30	75
Antall spyd	5	7	9	11	21	51

Fra figur V1.9 framgår det at reduksjon i motstandsverdiene er størst opp til ca 25 meters trådlengde. En kombinasjon av jordspyd sammenkoplet med horisontale jordledere gir en kostnadsmessig og praktisk god løsning.

V1.7 MASKENETT

For å begrense skritt- og berøringsspenninger i stasjonsanlegg er det nødvendig å grave ned et horisontalt maskenett oppdelt i rutemønster. Maskenett kombineres ofte med dypjording med flere vertikale jordspyd. Kombinasjon med dypjording er viktig for å få ned den totale jordmotstanden dersom maskenettet må plasseres i relativt tørt jordsmonn.

Det areal som maskenettet omslutter har størst betydning for jordmotstanden selv om antall ruter og størrelsen på dem også er med på å bestemme motstanden mot fjern jord. Som en første tilnærming til å regne ut jordmotstanden for et maskenett kan formelen for en horisontal sirkulær metallplate som vist i (1.16) brukes.

En øvre grense for motstanden kan beregnes ut fra ligning (1.19), [3]. Ligningen tar utgangspunkt i en sirkulær plateelektrode som ligger på jordoverflaten.

$$R_j = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad [\Omega] \quad (1.19)$$

hvor

- ρ jordresistiviteten [Ωm]
- A arealet som omslutes av maskenettet [m^2]
- L total lengde av nedgravd jordleder [m]

Det siste leddet i (1.19) tar hensyn til at jordmotstanden for et maskenett er høyere enn motstanden for en metallisk plate. Denne forskjellen reduseres etter hvert som den totale lengden av nedgravd jordleder øker.

Dette er forenklede formler som gir omtrentlige verdier for jordmotstanden. Betydelig mer regning og mer nøyaktige formler er nødvendig dersom det er behov for sikrere verdier på jordmotstanden. I vedleggsrapport 2 er det vist en rekke diagrammer for jordmotstand, skritt- og berøringsspenninger for maskenett.

Dersom maskenett kombineres med jordspyd, kan ligning (1.20) brukes for beregning av omtrentlige verdier for jordmotstanden. Formelen tar hensyn både til nedgravningsdybde og antall jordspyd, [3].

$$R_j = \rho \left[\frac{1 + \frac{r}{r+2,5h}}{8rK_R} + \frac{1}{L} \right] \quad [\Omega] \quad (1.20)$$

hvor

- r ekvivalent radius til en sirkel med areal tilsvarende maskenettet [m]
- h nedgravningsdybde [m]
- L total lengde av jordlederne i maskenettet [m]
- K_R konstant som avhenger av antall, posisjon og lengde på spydene

K_R kan beregnes ut fra (1.21).

$$K_R = 1 + \frac{n_R l_R^2}{10r^2} \quad (1.21)$$

hvor

- l_R lengden av hvert jordspyd [m]
- n_R summen av antall spyd plassert langs omkretsen av nettet og halvparten av de spyd som forøvrig blir fordelt over nettarealet.

V1.8 JORDLINER PÅ KRAFTLEDNINGER OG -KABLER

V1.8.1 Innledning

Jordliner på kraftledninger omfatter både gjennomgående jordliner og innføringsvern. De er definisjonsmessig ikke jordelektroder men må betraktes som jordledere. Til forskjell fra vanlige jordelektroder vil jordliner ved nettfrekvens normalt få et betydelig induktivt bidrag i tillegg til resistansverdien. Derfor innføres nå begrepet impedans for jordliner.

Det er naturlig å se på jordliner ut fra en stasjon som en utstrakt elektrode med lav impedans fordi de knytter sammen et stort antall mastejordinger. Impedansen er ofte lavere enn den lokale jordmotstanden i stasjonen. Sett fra mastene ute i kraftledningen kan jordlinens impedans være enda lavere fordi den betraktes i begge retninger og gir dermed parallellkobling av impedanser.

Jordliner har flere gunstige virkninger for vern av linjer og stasjoner:

- * De reduserer strøm til jord ved jordfeil i stasjoner og på kraftledninger uansett feilsted ved gjennomgående jordliner (jmf. reduksjonsfaktor). Dette reduserer jordpotensial, skritt- og berøringsspenninger samt induerte spenninger i nærliggende ledninger.
- * De senker jordmotstanden ved 50 Hz for alle mulige feilsted og gir lav og stabil nullsystemimpedans. Jordlinene gir dermed gode arbeidsforhold for vernereleer.
- * Dersom de er utført som toppliner og jordmotstanden i mastene ikke er for høy, vil de skjerme faselederne mot lynnedslag.

Jordliner som er opphengt under faselederne eller utført som markliner vil ikke beskytte mot lynnedslag. De fungerer like godt som toppliner hva angår de andre tiltenkte funksjonene.

V1.8.2 Reduksjonsfaktor

Ved jordfeil vil nullsystemstrøm i faselederne være $3I_0$ (total feilstrøm). Dersom det ikke er jordliner, vil hele feilstrømmen ha retur i jord. Med jordline(r) vil returstrømmen fordele seg mellom jordsmonn og jordline(r). Forholdet mellom den strøm som har retur i jord og den totale nullsystemstrøm ($3I_0$) kalles reduksjonsfaktoren, r . Den er definert ut fra ren induert strøm i jordlinene ved null jordpotensial. For luftlinjer kan den beregnes vha. (1.22).

$$r = \frac{3I_0 - I_{jL}}{3I_0} = 1 - \frac{Z_k}{Z_{jj}} \quad (1.22)$$

hvor

Z_k er koblingsimpedansen mellom faselinene og jordlinen(e) hvor begge sløyfer har retur i jord

Z_{jj} egenimpedansen til jordlinen(e) med retur i jord

I_{jL} strøm i jordlinen(e)

Z_k og Z_{jj} kan beregnes vha. hhv. (1.23) og (1.24) når det tas utgangspunkt i 50 Hz.

$$Z_k = 0,05 + j 0,0628 \cdot \ln \frac{\delta}{a_{jf}} \quad [\Omega/km] \quad (1.23)$$

$$Z_{jj} = R + 0,05 + j 0,0628 \left[0,25 + \ln \frac{\delta}{r_e} \right] \quad [\Omega / km] \quad (1.24)$$

Dersom det er to jordledere med innbyrdes avstand a_{jj} , er egenimpedansen gitt av (1.25):

$$Z_{jj2} = \frac{R}{2} + 0,05 + j 0,0628 \left[0,125 + \ln \frac{\delta}{\sqrt{r_e a_{jj}}} \right] \quad [\Omega / km] \quad (1.25)$$

hvor

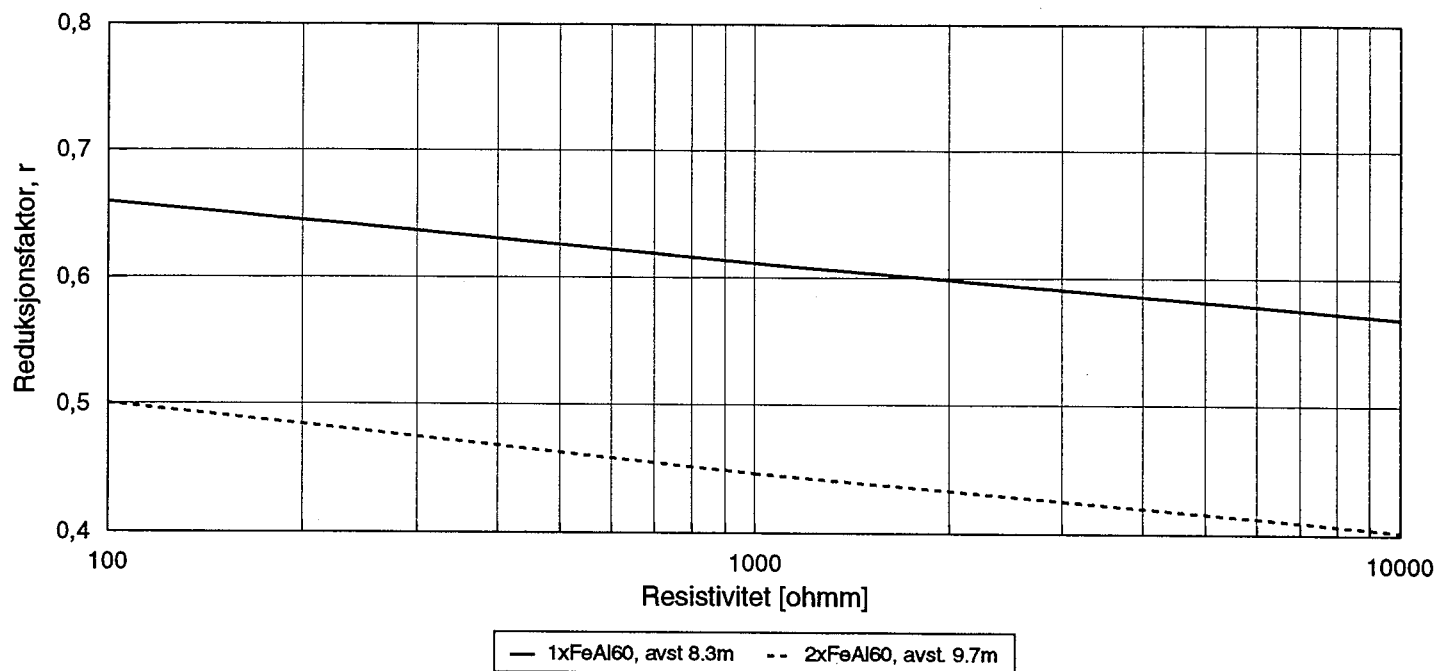
- R jordlinenes ohmske motstand [Ω/km]
- r_e ekvivalent lederradius for en jordline (geometrisk middelavstand mhp. seg selv) [m]
- δ avstand til ekvivalent returveg i jord [m]
- a_{jj} avstand mellom de to jordlederne [m]
- a_{jf} avstand mellom faselederne og jordlederne [m]

Midlere reduksjonsfaktor for feil på de forskjellige fasene kan finnes ved å bruke middelavstanden gitt ved (1.26).

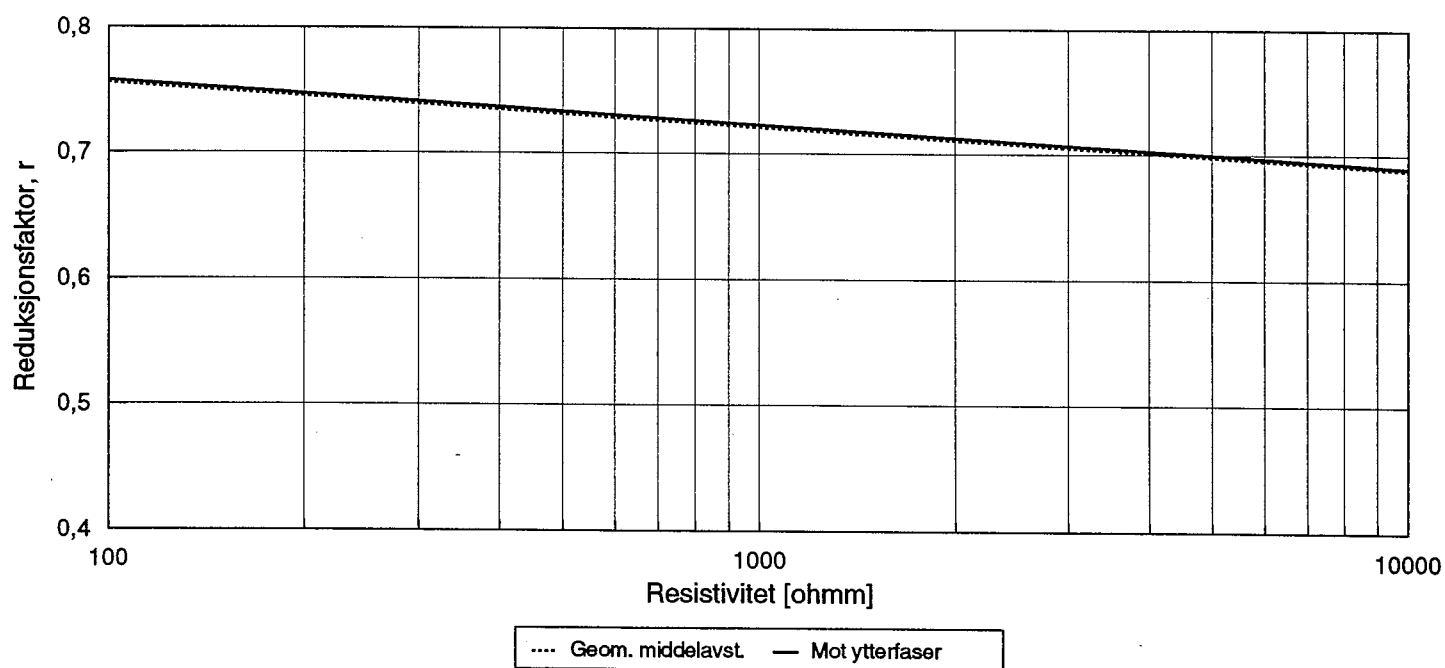
$$a_{jf} = \sqrt[3]{a_{1j} \cdot a_{2j} \cdot a_{3j}} \quad (1.26)$$

Både skritt- og berøringsspenning, indusert spenning i nærførte ledninger og jordpotensial avhenger av den strøm som flyter til jord ($I_j = r \cdot 3I_0$) og det gjelder derfor å få redusert denne. For å oppnå noen vesentlig reduksjonsfaktor, f.eks. 0,70-0,75, må samlet tverrnitt på jordliner tilsvare minst 25 mm² Cu. Reduksjonsfaktorer under 0,4 er ikke praktisk oppnåelig fordi det er begrenset hvor sterk den induktive koblingen mellom faser og toppliner kan bli. Ved høy jordresistivitet kan en komme ned mot denne verdien for et 300 eller 420 kV arrangement ved å brukes to toppliner FeAl 60 spesial.

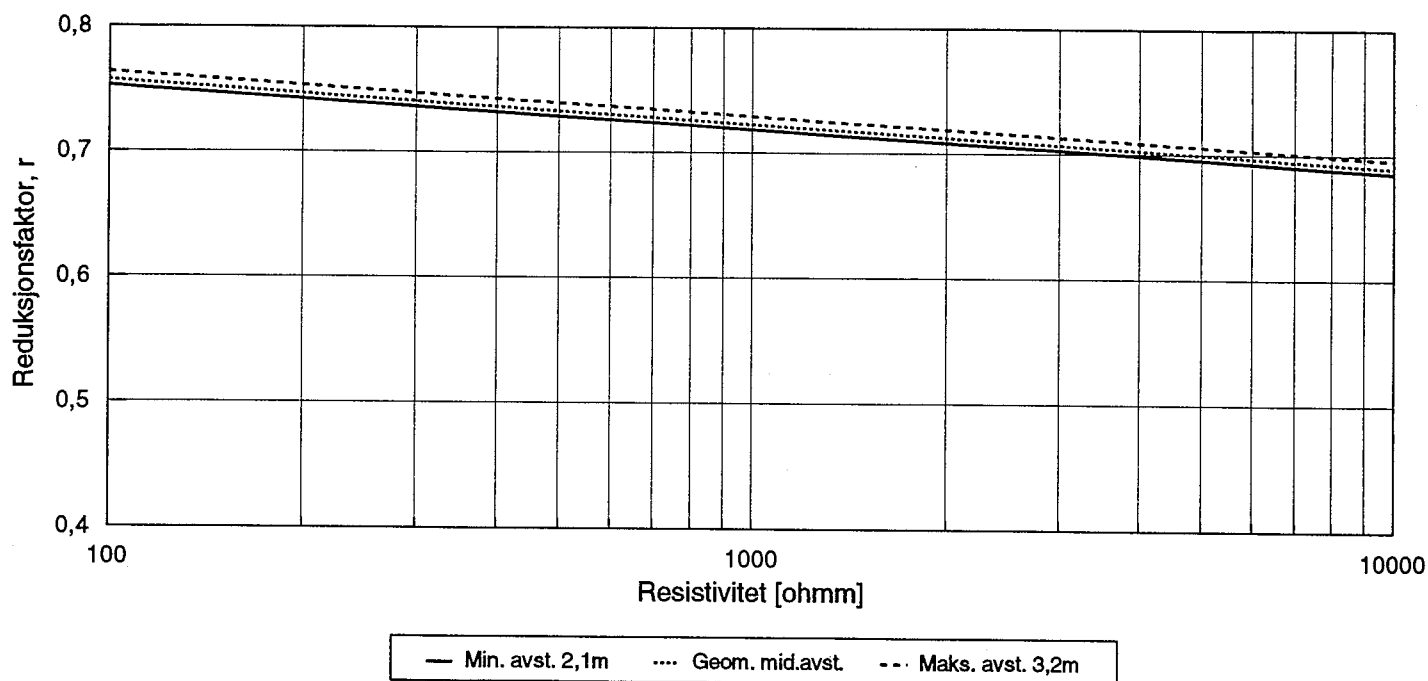
I figurene V1.10.V1.13 er det vist beregnede verdier på reduksjonsfaktor for ulike arrangement av jordliner/toppliner som funksjon av resistiviteten i jord, [5]. Se figur V1.14 for mastebilder og avstander mellom fase- og jordliner.



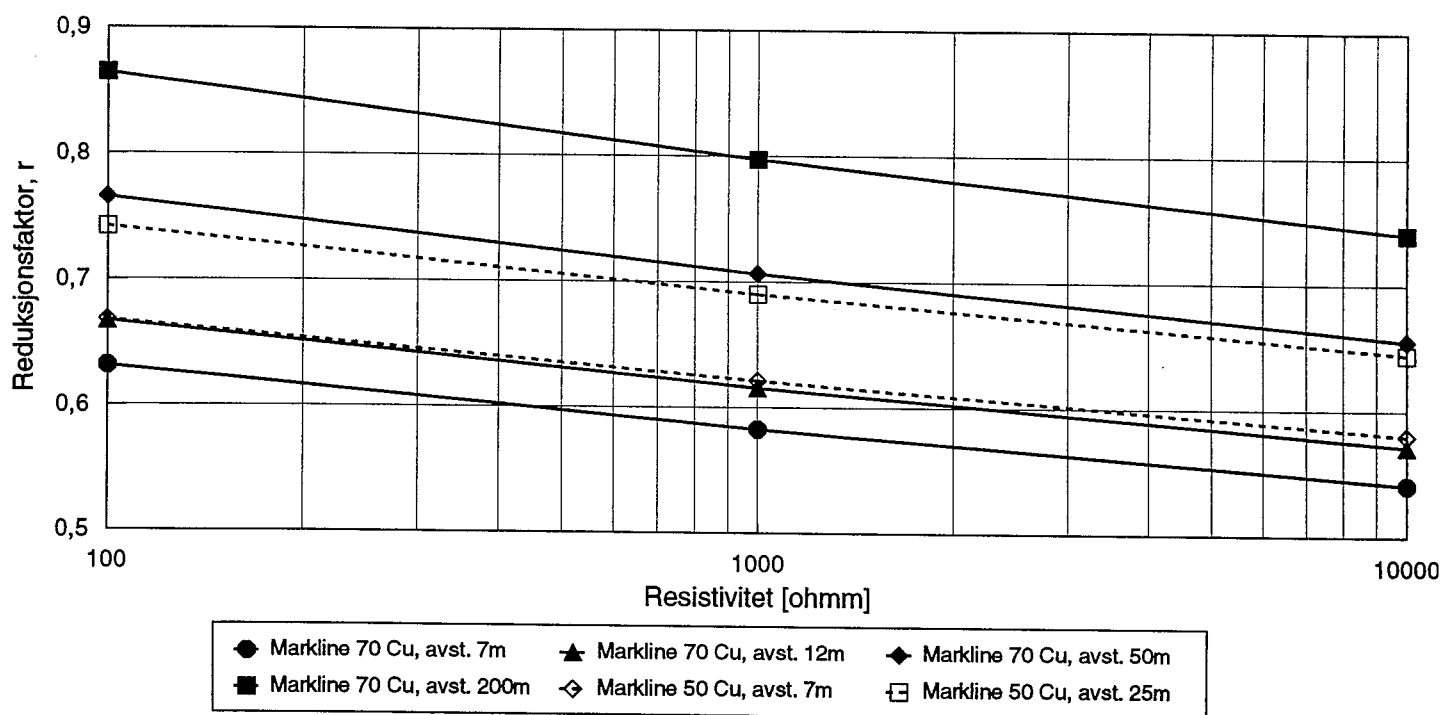
Figur V1.10 Beregnet reduksjonsfaktor for toppline(r) til 420 kV arrangement.



Figur V1.11 Beregnet reduksjonsfaktor for typisk 24 kV arrangement med E-mast og 1xFeAl 25 jordline rett under midtfasen.

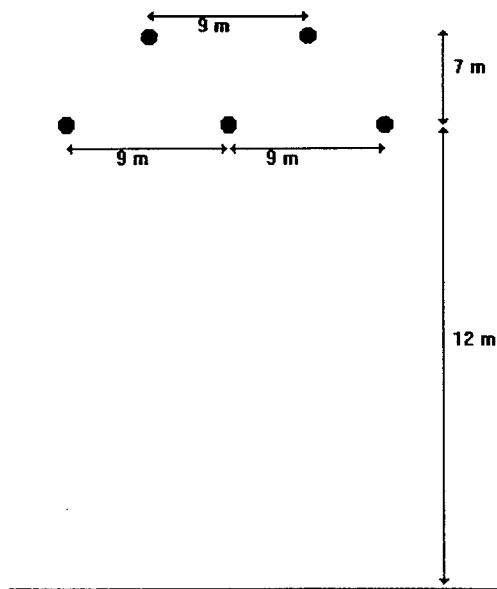


Figur V1.12 Beregnet reduksjonsfaktor for typisk 24 kV arrangement med H-mast og 1xFeAl 25 jordline under fasene.

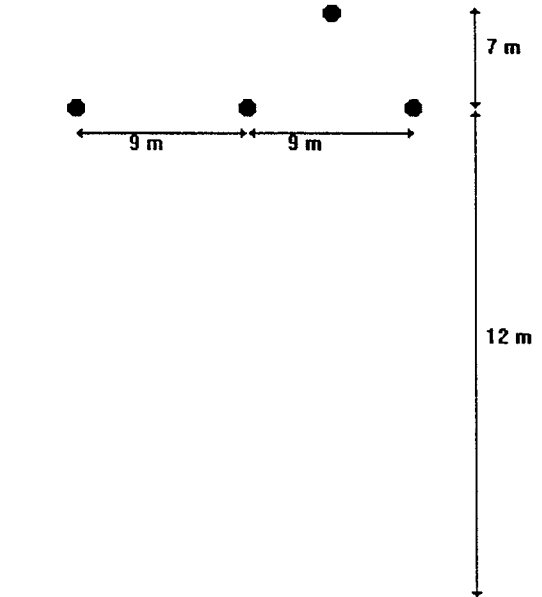


Figur V1.13 Beregnet reduksjonsfaktor for markline med avstand til faseliner som parameter.

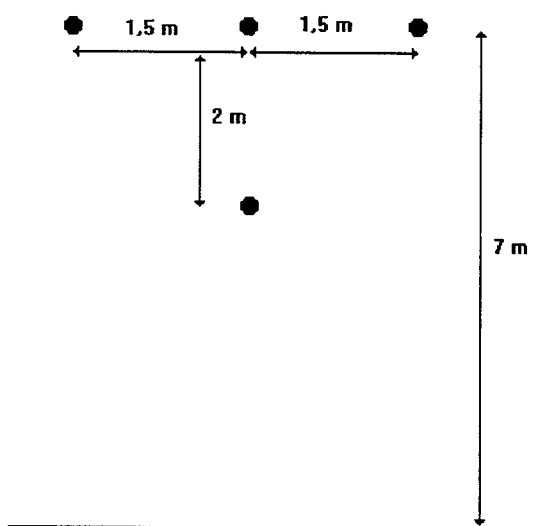
Av figurene framgår det at reduksjonsfaktoren avtar med økende jordresistivitet og økende jordlinetverrsnitt. Markliner nedgravd like under lederen gir omtrent samme reduksjonsfaktor som jordline i luft med samme tverrsnitt. Når avstanden markline-faseledere blir stor avtar virkningen av marklinene. En kan imidlertid oppnå en viss reduksjon i jordstrømmen selv med 200 m avstand dersom resistiviteten i jord er høy.



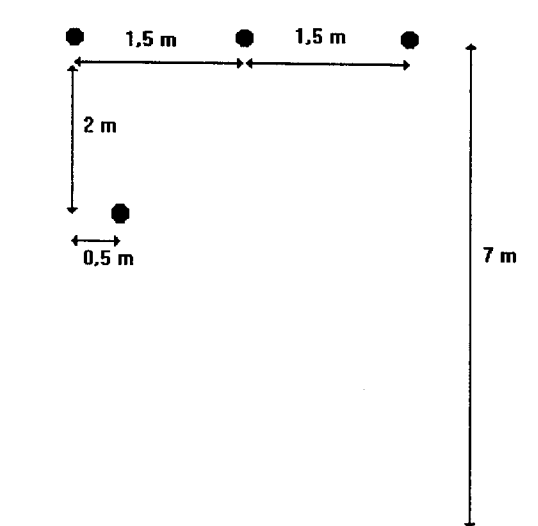
Oppheng for 2 toppliner, 420 kV arrangement



Oppheng for 1 toppline, 420 kV arrangement



Oppheng for 24 kV arrangement med E-mast

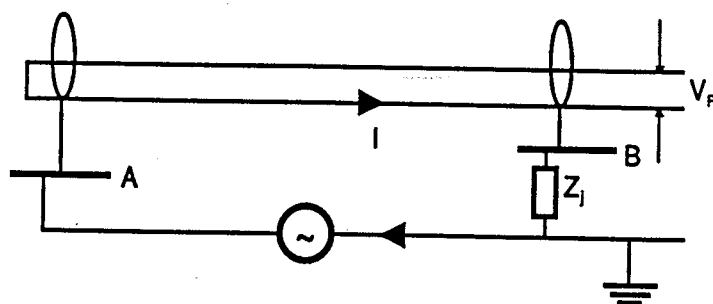


Oppheng for 24 kV arrangement med H-mast

Figur V1.14 Mastebilder som er utgangspunkt for beregning av reduksjonsfaktorer og impedanser i figurene i kapittel V1.8.2.

V1.8.3 Kabelskjermer

Skjermens kvalitet karakteriseres vanligvis med reduksjonsfaktorer eller transferimpedans. Reduksjonsfaktoren er definert som forholdet mellom indusert langsspenning med og uten skjerm (eller med skjerm som ikke er jordet i begge ender). Den kan også defineres som forholdet mellom strøm i jorda og strøm i kabelskjermen når denne påtrykkes strøm og skjermen er jordet i begge ender, se figur V1.15.



Figur V1.15 Reduksjonsfaktor eller transferimpedans (Z_T) for kabelskjermer.

Det forutsettes at motstanden til jord i begge ender er null. Under disse forutsetninger er reduksjonsfaktoren ved relativt lave frekvenser gitt av (1.27).

$$r = \frac{R}{R + Z} \quad (1.27)$$

hvor

- R kabelskjermens resistans (tilnærmet lik transferimpedans)
- Z øvrige del av skjermens impedans med jord som returvei

Z er også koplingsimpedansen mellom skjerm og kabelkjerne. Reduksjonsfaktoren blir svært god ved lav R og høy Z, f.eks. ved stålbandarmert kabel. Ved høye frekvenser må R erstattes med transferimpedansen Z_T som tar hensyn til strømfortrengning i skjermen (bedre reduksjonsfaktor/lavere transferimpedans) og utettheter i skjermen som gir lekkfelt og høyere transferimpedans/dårligere reduksjonsfaktor. Verdier på 0,001-0,01 for reduksjonsfaktoren er oppnåelig ved høye frekvenser. Til sammenlikning kan nevnes at en jordline som ligger ved siden av en kabel får så liten kopling mot kabelen (stort lekkfelt) at reduksjonsfaktoren normalt ikke blir lavere enn ca 0,1. For en toppline på kraftledninger er grenseverdien ca 0,5.

Transferimpedansen kan finnes ved en enkel og veldefinert måling med utgangspunkt i figur V1.15 som restspenning mellom leder og skjerm, V_R , og den strøm som påtrykkes

skjermen. Målingen er uavhengig av ytre strømveg, dvs kabelens impedans, Z , når V_R måles direkte i forhold til skjermen. Hvis det måles i forhold til jordskinner A og B vil forbindelsene derfra til kabelskjermen inngå i transferimpedansen. Ved høye frekvenser skal det lite til for å ødelegge kabelens skjermvirkning. En 10 cm lang jordforbindelse vil ved 10 MHz representere en impedans på ca 6 Ω , mens transferimpedansen kan være av størrelsesorden m Ω pr. meter kabel.

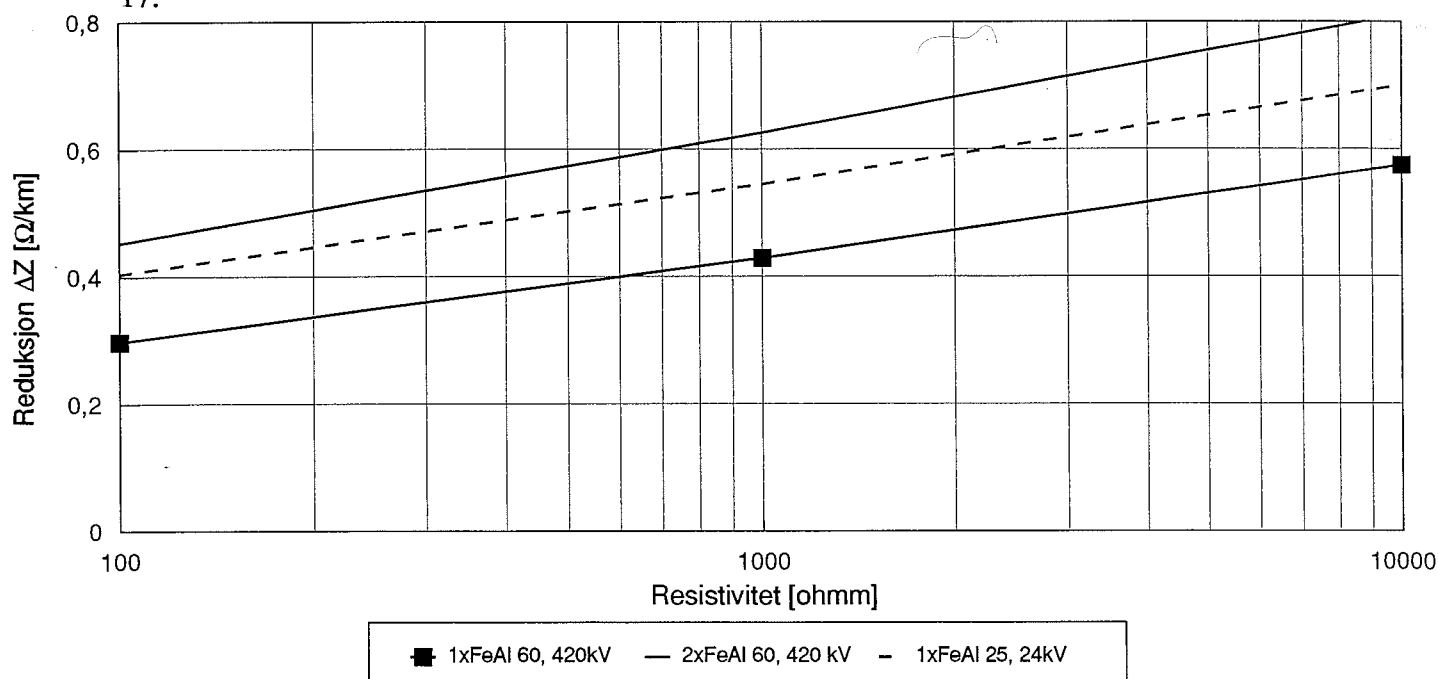
Som det fremgår av figuren vil kabelskjermen redusere virkningen av en mulig potensialforskjell mellom A og B på samme måte som en indusert langsspenning. I figuren er det antydnet en overgangsmotstand/impedans mot jord i B. Denne betyr ingen ting for transferimpedansen (V_R målt mot skjerm). Men målt i forhold til nøytral/fjern jord kan det bli høy spenning/dårlig reduksjonsfaktor. Dette skyldes at også overgangsmotstanden inngår i Z_T .

V1.8.4 Nullsystemimpedans

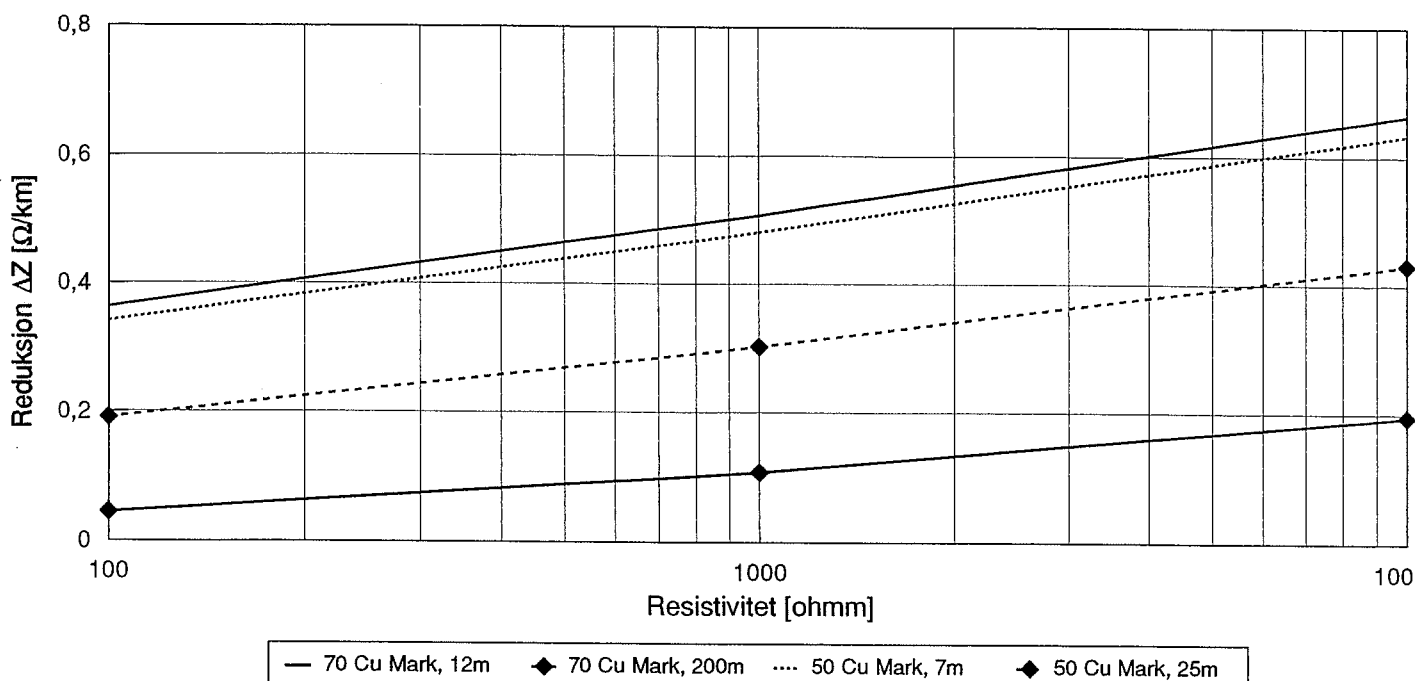
Jordliner vil redusere nullsystemimpedansen for en kraftledning/jordkabel. Dette medfører en økning i jordfeilstrømmen på ledningen slik at netto reduksjon i jordstrøm blir noe mindre enn reduksjonsfaktoren alene skulle tilsi. Reduksjonen i nullimpedans er gitt som

$$\Delta Z_0 = 3 \frac{Z_k^2}{Z_{jj}} \quad (1.28)$$

For aktuelle jordline- og fasearrangement er beregninger av ΔZ_0 vist i figurene V1.16 og 17.



Figur V1.16 Beregnet reduksjon av nullsystemimpedans for kraftlinjer som funksjon av jordresistiviteten med forskjellige jordliner som parameter.



Figur V1.17 Beregnet reduksjon av nullsystemimpedans for kraftledninger og kabler som funksjon av jordresistiviteten med forskjellige marklinjer som parameter.

ΔZ_0 vil være størst når ledningsevnen i jordsmonnet er dårlig fordi en større andel av strømmen da har retur i jordlinene.

V1.8.5 Jordimpedans ved 50 Hz

For gjennomgående jordliner er jordimpedansen sett i en retning gitt som

$$Z_j \approx \sqrt{Z_{jj} \cdot s \cdot R_j} \quad (1.29)$$

der $Z_{jj} \cdot s$ er egenimpedans for jordlederen mellom to jordingspunkter (med jord som retur) og R_j er motstand til jord i hvert punkt. Formelen er basert på antakelser om like lange avstander mellom jordpunktene (spennlengder), like motstander til jord i hvert punkt og at jordlinen har en viss minste lengde. Den resulterende impedansen for begge retningene blir da $0,5Z_j$.

I praksis vil både R og s variere betydelig langs en kraftledning. Formelen kan derfor bare gi tilnærmet riktig impedans ved å benytte middelværdien for R og s f.eks. for forskjellige deler av en ledning. Er det spesielt lave jordmotstander og lange spenn bør Z_j tillegges $0,5Z_{jj}$.

Gangkonstanten (bølgekonstanten, transmisjonskonstanten) for linjen kan beregnes ut fra (1.30) eller (1.31).

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{\frac{Z_{jj} \cdot s}{R_j}} \quad \text{pr. mastespenn} \quad (1.30)$$

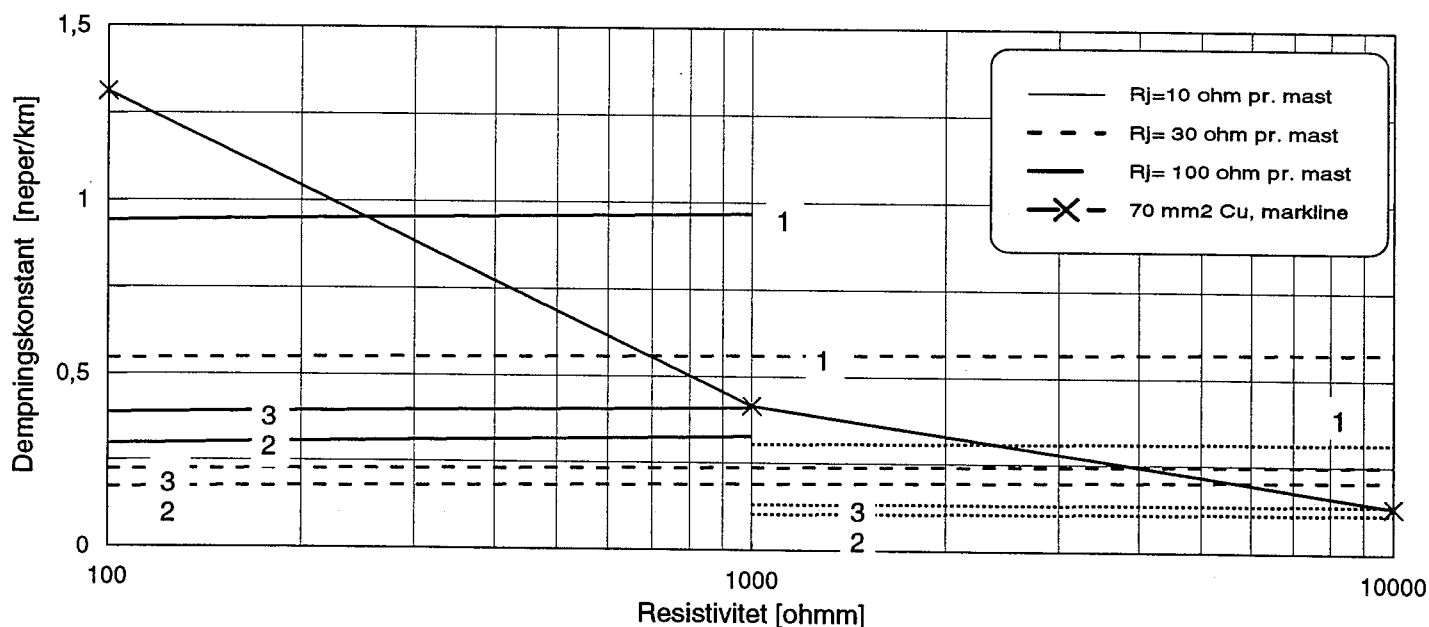
$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{\frac{Z_{jj}}{s \cdot R_j}} \quad \text{pr. km} \quad (1.31)$$

hvor

α dempningskonstant [neper/lengdeenhet]

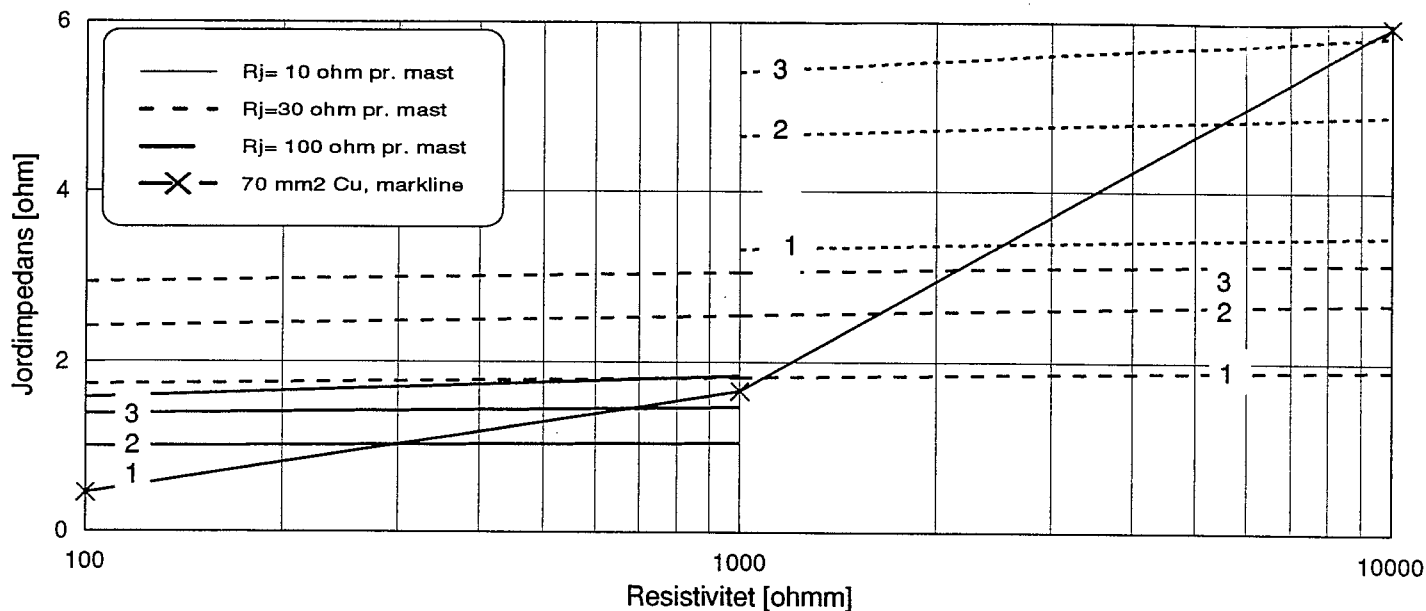
β fasekonstant [radianer/lengdeenhet]

Disse størrelsene angir hvordan en strøm til jord og tilhørende potensial dempes og faseforskyves utover fra feilstedet. De avgjør f.eks. hvor langt fra et endepunkt en må være for at impedansen mot jord skal komme ned mot beregnet Z_j etter (1.29).



1) 1xFeAl 25, 100 m spennlengde, 2) 2xFeAl 60, 350 m spennlengde 3) 1xFeAl 60, 350 m spennlengde

Figur V1.18 Beregnet verdi for dempningskonstanten som funksjon av jordresistivitet med jordmotstander og forskjellige jordlinjer som parameter.

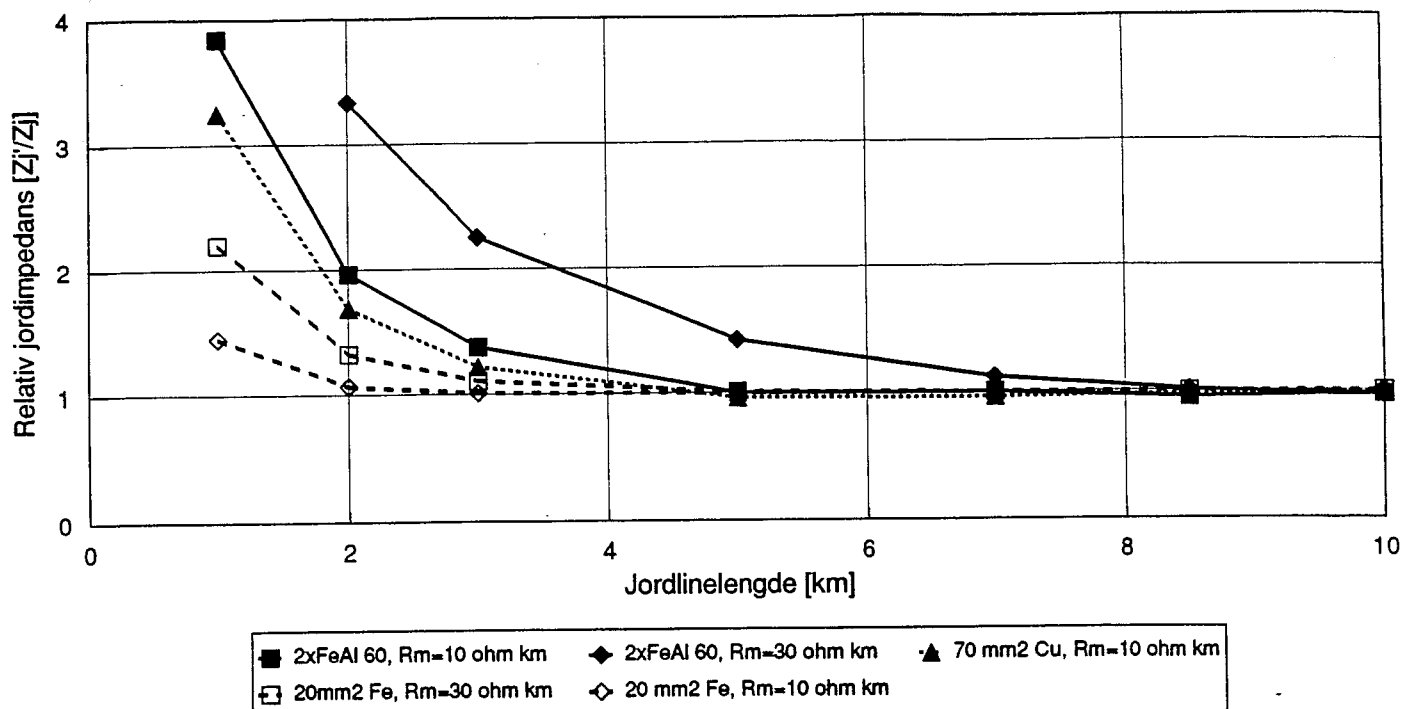


1) 1xFeAl 25, 100 m spennlengde 2) 2xFeAl 60, 350 m spennlengde 3) 1xFeAl 60, 350 m spennlengde

Figur V1.19 Beregnet jordimpedans for kraftlinjer sett i en retning som funksjon av jordresistivitet med jordmotstander for mast og forskjellige jordliner som parameter.

V1.8.6 Jordliner med begrenset utstrekning

Innføringsvern (toppliner bare ved stasjoner) brukes først og fremst som vern mot lynoverspenninger. Innføringsvernet gir også en reduksjon i jordimpedansen ved 50 Hz sett fra stasjonen. Jordimpedans, Z_j' , sett fra en ende (stasjon) ved begrenset utstrekning på jordliner er vist i Figur V1.20 for $\rho = 10\,000\ \Omega\text{m}$ og forskjellige linetyper og arrangement.



Figur V1.20 Beregnet relativ jordimpedans for jordliner sett fra en stasjon som funksjon av linjelengde med forskjellige jordliner og avledningsmotstander som parameter og fast jordresistivitet $\rho = 10\,000\ \Omega\text{m}$.

Som en ser av figuren vil jordimpedansen avta mot impedansen for uendelig lang jordline, Z_j , når lengden øker. Det er relativt lite å vinne ved å øke lengden utover det som svarer til en impedans på $1,25\ Z_j$. Tilsvarende lengde er ca 3-3,5 km for godt ledende jordliner (>FeAl 25) når avledningsmotstanden til jord er $10\ \Omega\text{km}$ og 5-6 km når avledningsmotstanden er $30\ \Omega\text{km}$. For dårlig ledende jordliner, f.eks. $20\ \text{mm}^2\ \text{Fe}$, er tilsvarende lengde bare 1,5 hhv. 2,5 km for de to verdiene på avledningen mot jord.

V1.8.7 Beregning av strømfordeling og potensial rundt et feilsted

Dersom en tar utgangspunkt i

2xFeAl 60 toppliner, $R_j = 30\ \Omega/\text{mast}$, $\rho = 10\,000\ \Omega\text{m}$ og $s = 350\ \text{m}$

vil følgende verdier for reduksjonsfaktor (r), motstand (Z_j) og dempningskonstanten (α) beregnes fra formelverket foran:

$$r = 0,402$$

$$Z_j = 2,703\ \Omega \quad \alpha = 0,207\ \text{neper/km}$$

Ved en feil der feilstrømmen $3I_0$ flyter på faselinene vil jordstrømmen, I_j , og strømmen i jordlederne, I_{jL} , være gitt av (1.32).

$$I_j = r \cdot 3I_0 \qquad I_{jL} = (1-r) \cdot 3I_0 \qquad (1.32)$$

Potensialet på jordlederne ved feilstedet vil være

$$\frac{U_j}{3I_0} = \frac{Z_j}{2} \cdot r \quad [kV/kA] \qquad (1.33)$$

fordi jordstrømmen, $3I_0$, ser impedansen $0,5Z_j$ mot sann jord.

Med en feilstrøm $3I_0 = 10$ kA får en:

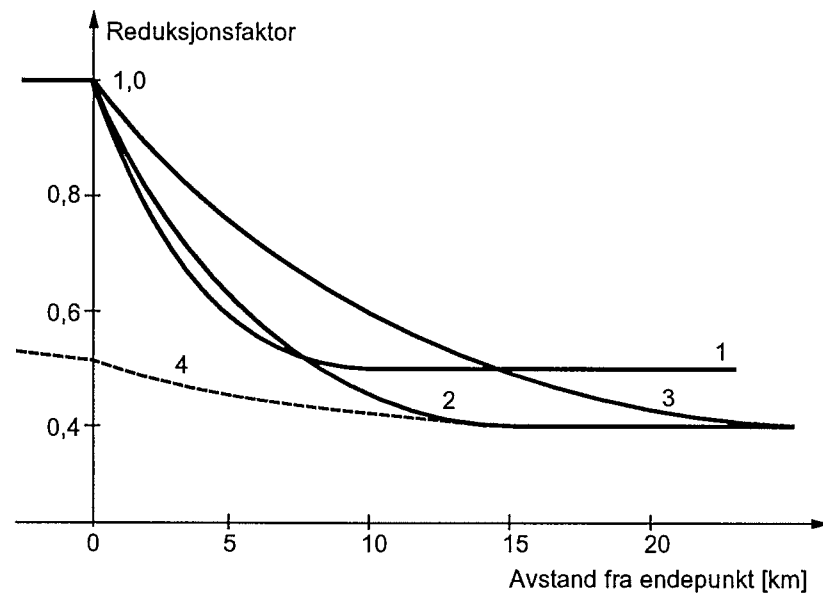
$$I_j = 4,022 \text{ kA} \qquad I_{jL} = 5,978 \text{ kA} \qquad U_j = 5,463 \text{ kV}$$

Ca 6 kA av feilstrømmen går ikke til jord. Ca 2 kA går til jord på toppliner i hver retning. Bare 180 A går direkte til jord over 30Ω ved feilstedet. Den effektive reduksjonsfaktoren nær feilstedet er derfor lavere enn beregnet. Potensialet blir halvert i en avstand på $0,7/\alpha \approx 3,5$ km fra feilstedet.

V1.8.8 Jordlinearrangement med diskontinuiteter

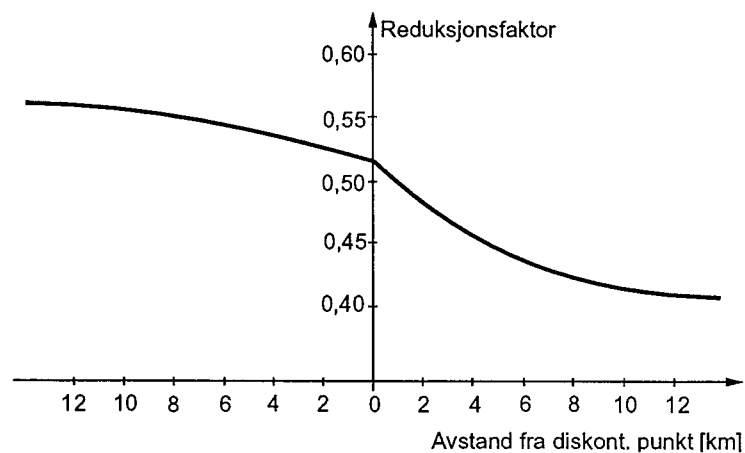
I områder omkring overgangspunkter mellom ulike typer jordliner (og ved avslutning av jordliner) vil det på grunn av forskjellig indusert strøm i de to ledertypene oppstå jordpotensial selv om overgangen er langt fra feilstedet. Den effektive reduksjonsfaktoren vil derfor inneholde et ledd som dempes ut langsetter linjen.

I figurene V1.21-V1.22 er det vist beregnede verdier for reduksjonsfaktorer ved avslutning av jordline og overgang mellom ulike typer jordline.



- 1) $\rho = 100 \Omega\text{m}$ $sR_j = 3,5 \Omega\text{km}$ endepotensial 0,7 kV/kA
- 2) $\rho = 10000 \Omega\text{m}$ $sR_j = 10,5 \Omega\text{km}$ endepotensial 1,6 kV/kA
- 3) $\rho = 10000 \Omega\text{m}$ $sR_j = 35,0 \Omega\text{km}$ endepotensial 3,0 kV/kA
- 4) Overgang fra kurve 2 til en markline (se Figur V1.22)

Figur V1.21 Beregnede reduksjonsfaktorer for 2xFeAl 60 toppliner som funksjon av avstand til endepunkt.



Figur V1.22 Beregnede reduksjonsfaktorer for overgangen mellom 2xFeAl 60 toppliner og 70 mm² Cu markline, $\rho = 10\,000 \Omega\text{m}$ og $R_j = 10,5 \Omega\text{km}$.

Jordpotensialet som oppstår rundt diskontinuitetspunktet vil dempes langs linjen på samme måte som den variable strømmen.

V1.8.9 Bølgeimpedans for jordliner og mastejordinger

Bølgeimpedansen for en jordline i luft er ca 500Ω ved høye frekvenser. Ved en bølgehastighet på $300 \text{ m}/\mu\text{s}$, spennlengde på 450 m og jordfeil ved en mast vil det gå $3 \mu\text{s}$ før refleksjoner fra de nærmeste mastene merkes ved feilstedet. I løpet av de første $3 \mu\text{s}$, sett fra feilstedet, sees bølgeimpedansen, Z_0 , i begge retninger i parallell med mastens impulsjordmotstand. Idet refleksjoner fra nabomaster når feilstedet vil impedansen sett fra feilstedet avta sterkt dersom impulsjordmotstanden i nabomastene er lavere enn bølgeimpedansen for jordliner.

V1.9 REFERANSER

1. Sunde, E.: Earth Conduction Effects in Transmission Systems
New York: Dover Publication Inc. 1968.
2. Meliopoulos, A.P.: Power System Grounding and Transients
New York: Marcel Dekker, Inc. 1988.
3. British Standard: Code of practice for design og high-voltage open-terminal station
London: 1990. BS 7354:1990.
4. American National Standards Institute, ANSI/IEEE: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
New York: 1986. ANSI/IEEE Std. 80-1986.
5. Seljeseth, Herlof: Bruk av toppliner i det høyspente overføringsnett
Trondheim. EFI, 1990. (EFI TR 3665)
6. Rolfseng, Lars: Impedansparametre og reduksjonsfaktor for overføringslinjer med og uten jordline(r)
Trondheim. EFI, 1990. (EFI AN 90.30.18)

VEDLEGGSRAPPORT 2

BEREGNINGSMODELLER FOR MOTSTAND TIL JORDELEKTRODER I ELKRAFTANLEGG

BEREGNINGSMODELLER FOR MOTSTAND TIL JORDELEKTRODER I ELKRAFTANLEGG

Beskrivelse av beregningsmodeller som underlag for praktiske beregningsrutiner og beregningsprogram som er mer slagkraftig enn forenklet formelverk.

EDB-baserte beregningsmodeller for DC eller 50 Hz jordmotstand og prinsipiell oppbygging av beregningsrutiner er beskrevet med utgangspunkt litteraturstudium. Forhold som er bestemmende for impulsmodstanden og som skiller den fra driftsfrekvent jordmotstand er omhandlet. Nøyaktig beregning for elektroder lengre enn 10-15 meter bør gjøres med bølgeforplantningsmodeller i stedet for modeller basert på konsentrerte RLC-elementer.

V2.1 INNLEDNING

Dersom det inntreffer jordfeil, kortslutning med forbindelse til jord eller en annen feil hvor det er kontakt til jord, vil maskenett og andre jordelektroder som har galvanisk forbindelse med kraftnettets nøytralt punkt normalt bli strøm- og spenningsførende. Dette skyldes potensialheving i forhold til fjern jord på elektroder fordi strøm flyter fra elektrodene ut i jordsmonnet. Denne strømmen kalles i den etterfølgende tekst for jordstrøm.

Som følge av jordstrømmen blir det satt opp et elektrisk felt både i jordsmonnet og på jordoverflaten. Feltet forårsaker spenningsforskjeller mellom ulike deler av elektrodeanlegget og jordsmonnet omkring. Jordstrømmen vil normalt bestå av en driftsfrekvent strøm overlagret høyfrekvente komponenter som vanligvis dempes ut etter kort tid. Strømmen kan i tillegg inneholde en stadig avtagende likestrømskomponent (DC).

Nøyaktige analyser av strømforplantning i jord er ofte kompliserte og tidkrevende å gjennomføre. Dersom utstrekningen av elektrodeanleggene er vesentlig mindre enn strømmens ekvivalente returdybde i jord eller inntrengningsdybde i jord, vil det normalt være tilstrekkelig med DC-analyser. Med jordresistivitet i området 50-1000 Ωm og nettfrekvens 50-60 Hz, vil inntrengningsdybden i et homogent materiale, δ , ligge i området 400 -1900 m i hht. (2.1) som er basert på feltet fra en strømførende leder halveis nedgravd i jordoverflaten.

$$\delta \approx \frac{1,85}{\sqrt{\mu_o \mu_r \omega \sigma}} \quad [m] \quad (2.1)$$

hvor

- μ_r jordsmonnets relative permeabilitet ($\mu_o = 4\pi 10^{-7}$ H/m)
- ω strømmens vinkelfrekvens [s^{-1}]
- σ jordsmonnets ledningsevne [$1/\Omega m$]

For en horisontal leder over bakken som fører strøm og som har retur gjennom homogen jord, vil returstrømmen fordele seg ujevnt i jordsmonnet. Strømtettheten er størst rett under lederen. For analyseformål kan en ekvivalent returdybde for strømmen brukes og tilsvarer plasseringen av en ekvivalent returleder i jord. En forenklet formel for returdybden, h_j , er gitt i (2.2), [1]. Med de verdier som er angitt foran for resistivitet og frekvens vil ekvivalent returdybde ligge i området 360-1790 m.

$$h_j \approx 400 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [m] \quad (2.2)$$

hvor

- ρ jordresistivitet [Ωm]
- f strømmens frekvens [Hz]

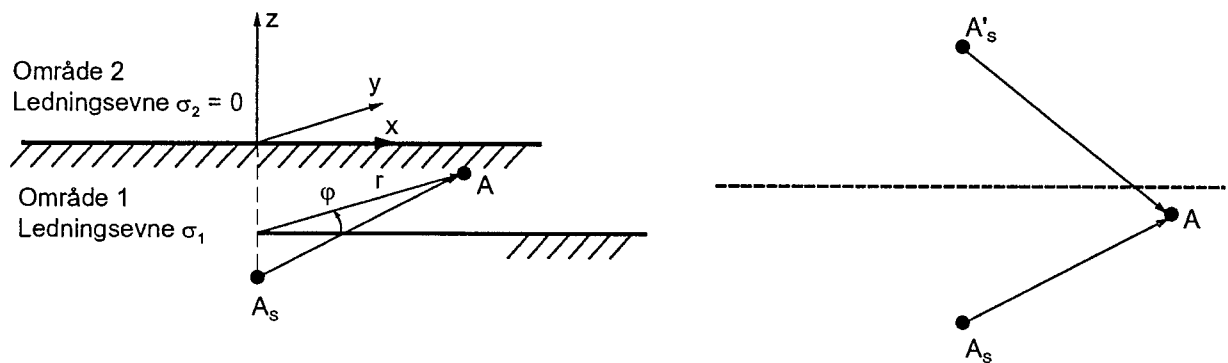
Ustrekningen av typiske elektrodeanlegg er normalt fra noen få meter opp til ca 200 m. DC-beregninger gir derfor god tilnærming for å bestemme jordmotstander ved driftsfrekvens. Dette er bakgrunnen for at DC-forhold er utgangspunkt for utledning av formelverket for enkle jordelektroder i vedleggsrapport 1.

Ved mer nøyaktig beregning av jordmotstander for høyfrekvente strømforløp som f.eks. jordfeil eller lyn, må det tas hensyn til strøm- og spenningsbølgenes frekvensavhengighet. Dette blir nærmere behandlet i kapittel V2.4.

V2.2 GRUNNLEGGENDE DC- OG 50 Hz-MODELL FOR JORDELEKTRODER

For å etablere en matematisk modell for beregning av motstand til en vilkårlig jordleder tas det utgangspunkt i figur V2.1. Figuren viser en *punktstrømkilde* i halvuendelig ledende jord. Halvuendelig ledende jord er definert som homogent jordsmonn med uendelig utstrekning og endelig ledningsevne σ_1 [$1/\Omega m$] med vakuum over hvor ledningsevnen er null.

Punktstrømkilden, A_s , framkommer ved å betrakte et lite segment av en større nedgravd metallisk leder. Det antas at den totale strøm som flyter ut i jordsmonnet fra segmentet er lik I_s . Potensialet som punktkilden setter opp i et vilkårlig punkt A i jordsmonnet eller på jordoverflaten skal bestemmes. Utledningen av selve formelverket behandles ikke i denne vedleggsrapporten. Det blir i stedet vist hvordan resultatet kan anvendes videre for praktisk bruk i beregningsprogrammer. Det henvises heller til [1], kap. 5.5, som også gir referanser til mer grunnleggende litteratur.



Figur V2.1 Punktstrømkilde i halvuendelig homogen jord som underlag for numeriske beregningsmodeller for motstand til jordelektroder.

Pga. symmetriegenskaper vil potensialet, V_A , i et punkt A i jorden være uavhengig av vinkelen ϕ slik at $V_A(r, \phi, z) = V_A(r, z)$. I et rettvinklet koordinatsystem kan det vises, [1], at potensialet i punkt A, V_A , pga. punktstrømkilden kan settes lik:

$$V_A(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z+z_s)^2}} \right] [V] \quad (2.3)$$

hvor

σ_1 jordens ledningsevne [$1/\Omega m$]

x, y, z koordinater til punktet $A(r, z)$

I_s total strøm som flyter ut fra et lite ledersegment [A]

Spenningen i jord (område 1) blir derfor lik den spenning som settes opp av to punktstrømkilder, begge lik I_s , i punktene (x_s, y_s, z_s) og $(x_s, y_s, -z_s)$. Planet mellom områdene 1 og 2 vist i figur V2.1 kan derfor betraktes som en speilingsflate for punktkilden I_s .

V2.3 BEREGNINGSMODELLER FOR DC- OG 50 Hz MOTSTANDER

Med utgangspunkt i ligning (2.3) er det utviklet mange forskjellige rutiner for beregning av jordmotstand for vilkårlige elektrodeanlegg. Selv om beregning av jordmotstander, strøm- og spenningsfordelinger for enkle elektroder kan gjøres vha. analytiske formler, er det nødvendig å bruke datamaskinprogram dersom det er større krav til nøyaktighet i beregningsresultater for praktiske elektrodeanlegg av noen utstrekning.

Detaljert oppbygging av slike program blir ikke beskrevet i denne vedleggsrapporten. Den prinsipielle framgangsmåten som kan benyttes for beregning av jordmotstander for vilkårlige jordelektroder og for beregning av skritt- og berøringsspenninger blir imidlertid behandlet.

V2.3.1 Matrisemetoden

Felles for de fleste numeriske beregningsmetodene er å dele et elektrodeanlegg opp i mange små segmenter for deretter å benytte beregningsmodellen som er omtalt i kapittel V2.2. I første omgang beregnes sammenhengen mellom potensial på ledersegmenter og den strømmen som flyter ut i jordsmonnet fra de enkelte segmentene. Deretter bestemmes potensialet på vilkårlige steder i jordsmonnet eller på jordoverflaten.

Eksempelvis kan en rett horisontal leder inndeles i n like lange segmenter. Det antas at segment i har potensial V_i i forhold til fjern jord og at den totale strøm som flyter ut fra dets overflate er I_i . I tillegg er det innbyrdes kopling mellom alle segmenter. Dette kan illustreres ved beregning av spenningen V_i , [1].

$$V_i = \sum_{j=1}^n f(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \sigma_j) I_j \quad (2.4)$$

hvor

$$f(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \sigma_j) \quad (2.5)$$

beregnes vha. grunnligningen (2.3) i kapittel V2.2. Punktet med indeks A_i er på overflaten av segment i , indeks j representerer koordinatene til midtpunktet for segment j . I_j er den

totale strøm som flyter ut fra overflaten på element j. På tilsvarende måte kan det etableres n ligninger for V_i , $i=1,2,3,\dots,n$ som vist i (2.6).

$$\begin{aligned} V_1 &= \sum_{j=1}^n f(x_{A1}, y_{A1}, z_{A1}, x_j, y_j, z_j, \sigma_j) I_j \\ V_2 &= \sum_{j=1}^n f(x_{A2}, y_{A2}, z_{A2}, x_j, y_j, z_j, \sigma_j) I_j \\ &\quad \dots \dots \dots \\ V_n &= \sum_{j=1}^n f(x_{An}, y_{An}, z_{An}, x_j, y_j, z_j, \sigma_j) I_j \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dersom alle spenningene V_i er kjent, kan strømmene I_j , $j=1,2,3, \dots, n$, beregnes vha. (2.6). Så snart samtlige strømmer er kjent, beregnes spenningen $V(x,y,z)$ i et vilkårlig punkt (x,y,z) vha. (2.7).

$$V(x,y,z) = \sum_{j=1}^n f(x,y,z, x_j, y_j, z_j, \sigma_j) I_j \quad (2.7)$$

Ligning (2.7) danner utgangspunkt for å bestemme skritt- og berøringsspenninger ved at potensialdifferanser mellom punkt på jordoverflaten eller mellom jordete anleggsdeler og punkt på jordoverflaten beregnes. Det antas ren resistiv strøm- og spenningsfordeling i jordsmonnet.

Vanligvis er jordelektroder laget av kopper. Ved driftsfrekvens vil potensialet normalt være likt over hele elektrodeanlegget pga. kopperets høye ledningsevne. Derfor antas hele elektrodeanlegget å ha samme potensial i forhold til fjern jord. Spenningen på alle segmenter settes lik; $V_1=V_2=\dots=V_n$. Sammenhengen mellom spenning på jordelektroden og strøm ut fra segmentene kan beregnes vha. følgende matriseformel, [1]:

$$[V] = [VDF][I] \quad (2.8)$$

hvor

- [V] søylevektor med n like spenningsverdier [V]
- [I] søylevektor med n ukjente strømverdier [A]
- [VDF] n x n matrise som beskriver koplingen mellom de forskjellige segmenter
VDF- Voltage Distribution Factor) [Ω]

Strømmene, som er proporsjonale med spenningstigningen på elektodeanlegget, kan beregnes vha. matriseligningen (2.9).

$$[I] = [VDF]^{-1} [V] \quad (2.9)$$

Basert på matriseligningen (2.8) kan den totale jordmotstanden beregnes som forholdet mellom elektrodeanleggets spenningstigning mot fjern jord, V_T , og den totale strøm som flyter ut fra jordelektroden. Totalstrømmen er gitt av ligning (2.10)

$$I_T = \sum_{j=1}^n I_j \quad [A] \quad (2.10)$$

mens motstanden kan beregnes fra (2.11).

$$R = \frac{V_T}{I_T} \quad [\Omega] \quad (2.11)$$

Denne beregningsmetoden blir kalt "matrisemetoden" fordi [VDF]-matrisen inngår i modellen. Matrisen må inverteres dersom strømmene skal beregnes. For praktiske elektrodeanlegg er [VDF]-matrisen svært stor og er ofte uhensiktsmessig for direkte implementering i numeriske beregningsprogram. Dette er bakgrunnen for at det er utviklet flere alternative beregningsrutiner til matrisemetoden.

V2.3.2 Kombinert integrasjon / matrisemetode

Beregninger utført med matrisemetoden viser at strømfordelingen langs elektrodene er mer eller mindre konstant med unntak fra områdene rundt endene eller der hvor elektroder krysser hverandre. Den virkelige strømfordelingen tilnærmes derfor ofte med en trappeformet fordeling langsetter elektroden.

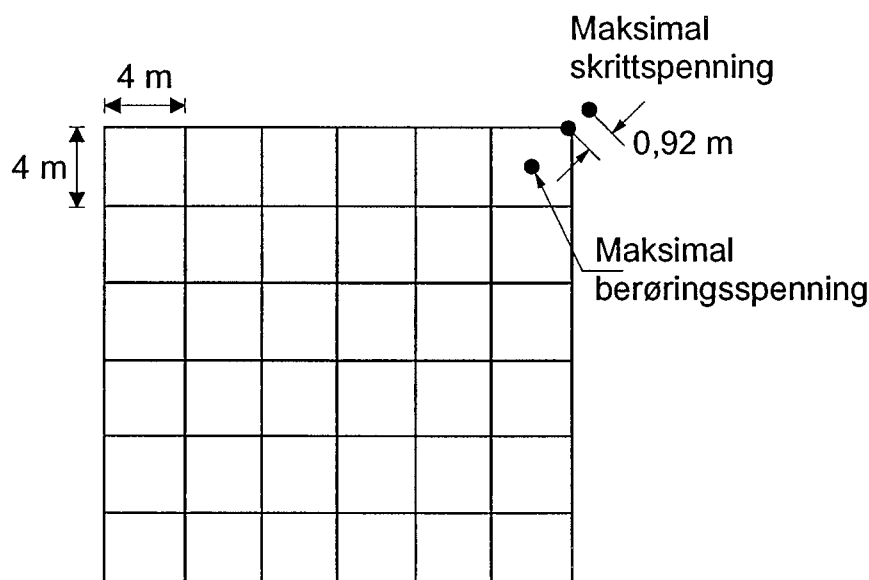
Det er utviklet metoder for å beregne strømfordelingen langsetter elektroder fordi den på forhånd er ukjent for et gitt elektrodeanlegg. Elektrodene deles opp i et endelig antall segmenter. Strømtettheten langs et gitt segment er ukjent men antas konstant. Deretter beregnes sammenhenger mellom spenningen i et gitt punkt og den totale strøm som flyter ut fra det enkelte segment. Beskrivelse av hvordan dette kan gjøres for relative enkle elektroder er vist i [1].

Matrisemetoden brukes deretter for å bestemme de ukjente strømverdiene. Størrelsen på matrisene er direkte proporsjonale med antall segmenter. Nøyaktigheten i beregningene øker ved økende antall segmenter samtidig som regnebehovet øker. Ved å tilpasse oppdelingen av segmenter til krav om nøyaktighet i beregningsresultatene, er metoden likevel et godt alternativ til den rene matrisemetoden.

V2.3.3 Parametrisk bestemmelse av jordmotstand, skritt- og berøringsspenning

Krav til begrensning av skritt- og berøringsspenninger ved feil i elkraftanlegg har stor betydning for hvordan elektrodeanlegg under kraft- eller transformatorstasjoner skal utformes. Det er ofte nødvendig å bruke dataprogram dersom nøyaktige beregninger må gjennomføres for anlegg med utstrekning utover helt enkle elektroder.

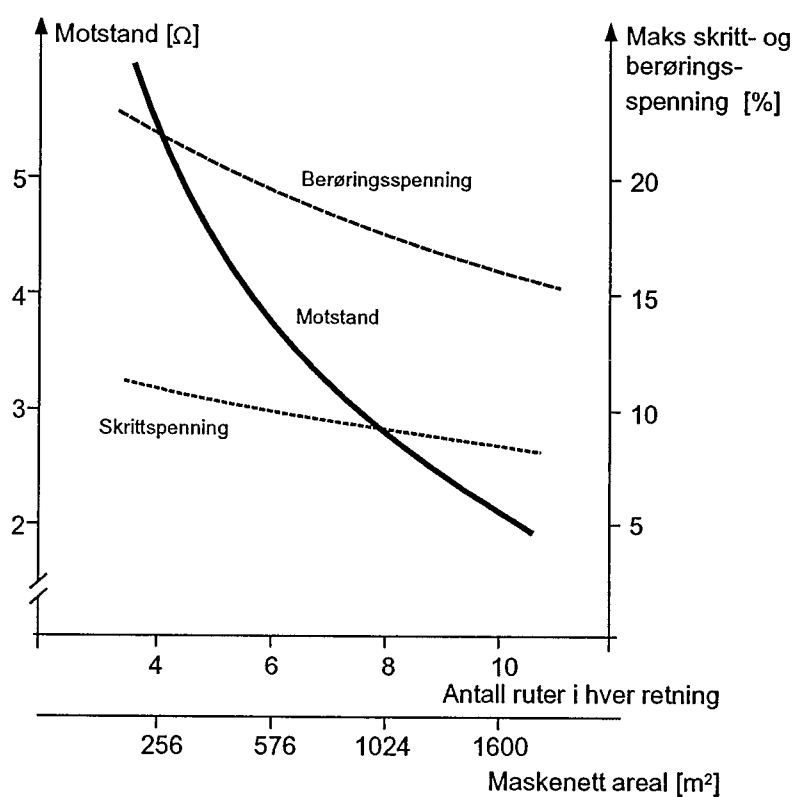
Det er imidlertid nyttig å undersøke hvordan motstandsverdiene til f.eks. et maskenett forandrer seg som funksjon av en del viktige konstruksjonsparametre. Som utgangspunkt for en slik analyse betraktes figur V2.2 som viser et maskenett basert på rektangulære ruter, [1].



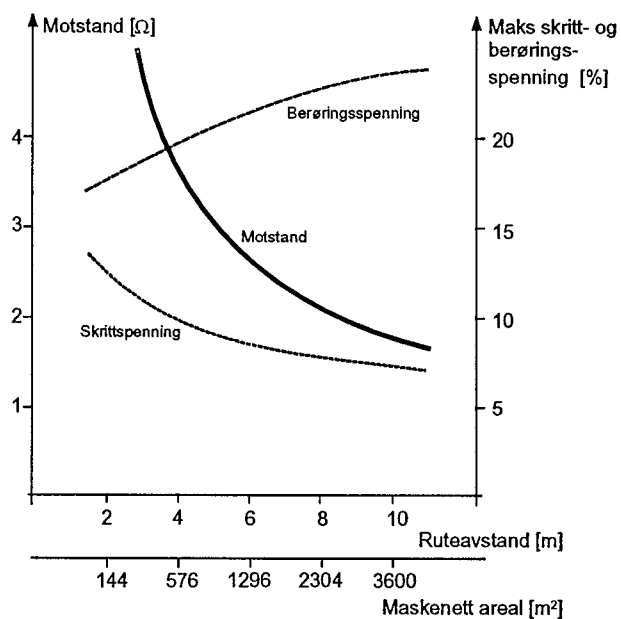
Figur V2.2 Geometrisk utforming av maskenett for parametrisk bestemmelse av jordmotstand, skritt- og berøringsspenninger. 6 ruter á 4x4 m, 67,4 mm²Cu-tverrsnitt, $\rho=200 \Omega\text{m}$, 0,76 m nedgravingsdybde.

Maksimal skrittspenning for dette maskenettet er beregnet til 9,8 % og maksimal berøringspenning er beregnet til 19,2 % av maskenettets totale spenningstigning mot fjern jord. Jordmotstanden for dette maskenettet er beregnet til 3,9 Ω . Spenningstigningen er proporsjonal med strømmen som mates inn i elektrodeanlegget.

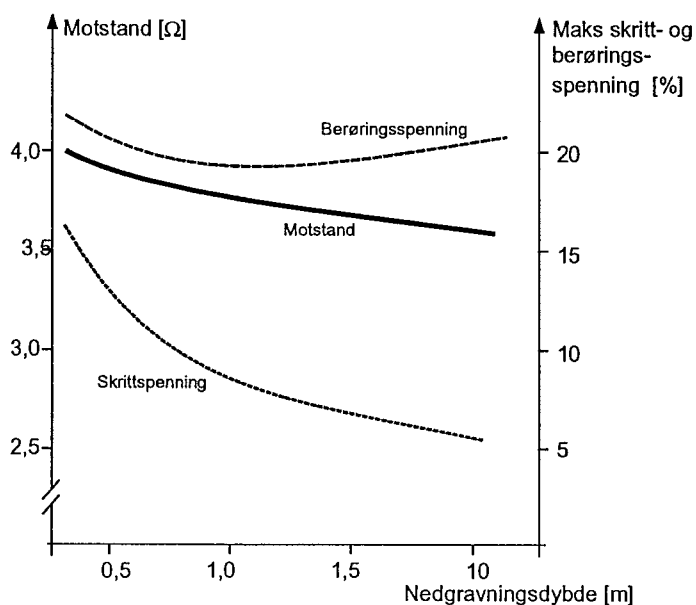
I figurene V2.3-V2.6 er det vist beregnede verdier for maskenett med utgangspunkt i figur V2.2, kap.5.9 i [1]. I [2] finnes det også mange diagrammer som viser tilsvarende parametrisk bestemmelse av motstand, skritt- og berøringspenninger både for rene maskenett og kombinasjoner av maskenett og jordspyd.



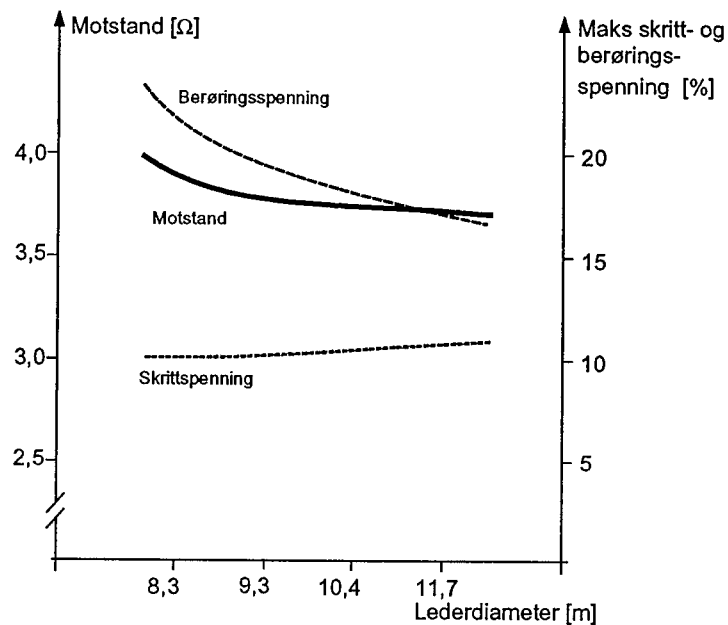
Figur V2.3 Beregning av jordmotstand, berørings- og skrittspenning for maskenett som funksjon av antall ruter. (4 m ruteavstand, 67 mm²Cu, 0,76 m dybde, homogen jord med $\rho = 200 \Omega\text{m}$).



Figur V2.4 Beregning av jordmotstand, berørings- og skrittspenning for maskenett som funksjon av ruteavstand. (6 ruter i hver retning, 67 mm²Cu, 0,76 m dybde, homogen jord med $\rho = 200 \Omega\text{m}$).



Figur V2.5 Beregning av jordmotstand, berørings- og skrittspenning for maskenett som funksjon av nedgravningsdybde. (6 ruter i hver retning, 4 m ruteavstand, 67 mm²Cu, homogen jord med $\rho = 200 \Omega\text{m}$).



Figur V2.6 Beregning av jordmotstand, berørings- og skrittspenning for maskenett som funksjon av lederdimensjon. (6 ruter i hver retning, 4 m lederavstand, 0,76 m dybde, homogen jord med $\rho = 200 \Omega\text{m}$).

V2.4 GRUNNLEGGENDE KARAKTERISTIKKER FOR IMPULSMOTSTAND

Dersom en nedgravd jordelektrode påtrykkes en impulsstrøm med amplitude på noen kA, er det normalt ikke lineære forhold mellom strøm ut fra elektroden og spenningsfall i jordsmonnet. På grunn av høy lokal feltstyrke og ionisering av luft og jordsmonn oppstår det ofte utladninger som gjør at jordsmonnets kjemiske sammensetning gjennomgår forandringer under selve utladningsforløpet. Dette kan ha stor betydning for jordsmonnets elektriske egenskaper og i noen grad også for jordelektroden.

Beregningsgrunnlaget som er etablert for DC eller 50 Hz kan derfor ikke uten videre brukes ved analyser i forbindelse med lynstrømmer eller andre hurtige strømforløp. Ved driftsfrekvens er det hovedsakelig den geometriske utstrekning av elektrodeanlegget og jordsmonnets spesifikke motstand som bestemmer motstanden mot fjern jord. Normalt vil jordmotstanden reduseres med økende utstrekning på elektrodeanlegget.

For å få bedre forståelse for hvorfor det kan være betydelig forskjell mellom jordmotstand ved driftsfrekvens og ved lynstrømmer, vil noe av bakgrunnen bli omtalt i delkapitlene

under kapittel V2.4. Samtidig er dette underlag og forutsetninger for de modeller og rutiner som blir beskrevet i kapittel V2.5.

V2.4.1 Innledning

Ved analyser av forstyrrelser i kraft- og telenett pga. lynnedslag er impedans, admittans, transferimpedans og -admittans sentrale begreper. I analysesammenheng blir de ofte kalt for karakteristiske størrelser. De inngår som parametre i undersøkelser av hvordan strøm- og spenningsbølger forplanter seg langs ledere. Ved lynnedslag vil det normalt flyte store feilstrømmer i deler av elektrodeanlegget før strømmen går til jord. Det kan oppstå betydelige spenningsdifferanser mellom ulike deler av samme elektrodeanlegg.

De karakteristiske størrelsene avhenger av faktorer som f.eks. jordsmonnets resistivitet og dielektrisitetskonstant, nedgravingsdybde, ledernes forlegningsmåte, lederdiameter, lengde og eventuelt innbyrdes avstand mellom parallelle ledere. Ionisering både ved lederoverflaten og lenger ut i jordsmonnet har også betydning for jordmotstanden ved høye feltstyrker.

Karakteristiske responser for en elektrisk krets kan undersøkes vha. matematiske metoder dersom stasjonære responser fra sinusformede strøm- eller spenningspåtrykk er kjent. Det er ofte hensiktsmessig å betrakte responser som følge av påtrykk med enhetsstrøm (trinnstrøm) eller enhetsspenning (trinnspenning) fordi et trinnpåtrykk kan betraktes som sammensatt av mange høyfrekvente sinusformede delbidrag. Det er normalt tilstrekkelig å ta hensyn bare til det øvre frekvensområdet i stedet for hele frekvensspektret.

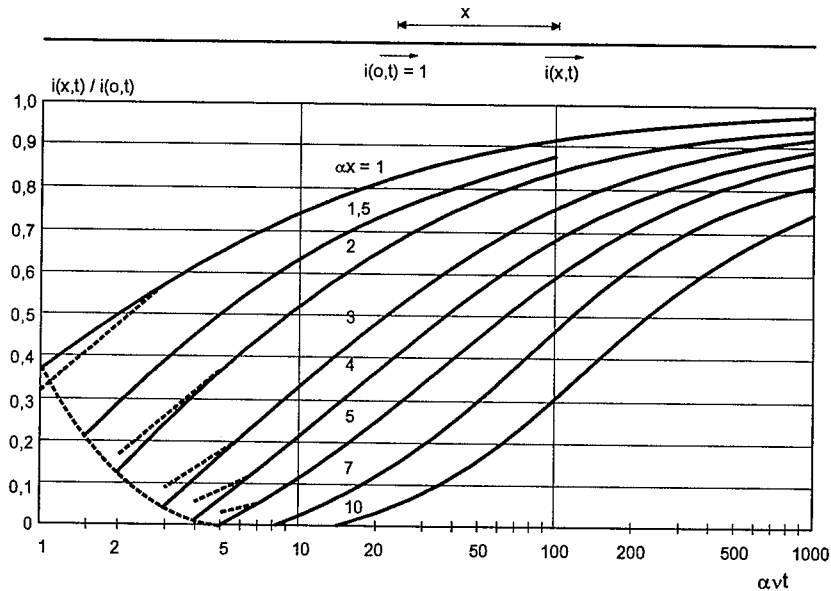
Den umiddelbare bølgeresponsen til et enhets strømpåtrykk vil i det etterfølgende bli kalt *bølgeimpedanskarakteristikk*. Forholdet mellom to strømmer eller to spenninger på *forskjellige steder* i en krets vil bli kalt *bølgeforplantningskarakteristikk*.

V2.4.2 Bølgeforplantningskarakteristikk for jordledere

Høyfrekvente strøm- og spenningsbølger dempes og forvrenges etter hvert som de forplanter seg langsetter nedgravde jordledere på lignende måte som for ledere i luft. Det henvises til spesiallitteraturen når det gjelder teoretigrunnlaget for bølgeforplantning på jordledere. I kapitlene V2.4.2 og V2.4.3 beskrives en del forhold omkring bølgeforplantning vha. diagrammer hentet fra [3].

Generelle beregningsresultater for demping og forvrengning av en enhets trinnstrøm langsetter en nedgravd og *uendelig lang* jordleder er på en komprimert måte vist i figur V2.7, [3]. Figuren viser at det tar tid for strømmen å bygge seg opp mot toppverdien av

den påtrykte trinnstrømmen, og at dette er avhengig både av jordsmonnets egenskaper og avstanden mellom strømpåtrykk og det sted hvor strømmen betraktes. I teksten nedenfor er bruken av figuren vist med noen enkle beregningseksempler. Selv om en uendelig lang jordleder er av mer teoretisk interesse og figuren er noe komplisert, viser den flere prinsipielle egenskaper med bølgeforplantning langsetter nedgravde jordledere.



Figur V2.7 Beregnet bølgeforplantningskarakteristikk, $i(x,t)/i(0,t)$, for en trinnstrøm som påtrykkes en uendelig lang nedgravd jordleder. Begge aksene er dimensjonsløse. Prikkete linjer angir tilnærmet løsning dersom forskyvningstrømmen i jord neglisjeres.

Sammenheng mellom parameteren α [m^{-1}] i figur V2.7, egenskaper til jordsmonnet og bølgers forplantningshastighet kan beregnes vha. det dimensjonsløse uttrykket i (2.12).

$$\alpha vt = \frac{t}{2\rho\epsilon_r\epsilon_0} \quad (2.12)$$

hvor

- ρ jordresistivitet [Ωm]
- ϵ_r relativ dielektrisitetskonstant for jord
- ϵ_0 dielektrisitetskonstant for vakuum [$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$]
- v strømbølgers forplantningshastighet [m/s]
- x avstand mellom strømpåtrykk og observasjonstedet [m]

Parameteren αx er proporsjonal med avstanden mellom det sted hvor strømmen påtrykkes og der hvor responsen observeres. Verdien langs absisseaksen er proporsjonal med tidsintervallet mellom påtrykk og tidspunkt for observasjon av responsen på et gitt sted.

Med utgangspunkt i (2.13), $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ F/m, $\epsilon_r=10$ og homogen jord med $\rho=100 \Omega\text{m}$ kan forplantningshastigheten for strøm- og spenningsbølger beregnes til maksimalt 134 m/ μs ved jordoverflaten.

$$v = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.13)$$

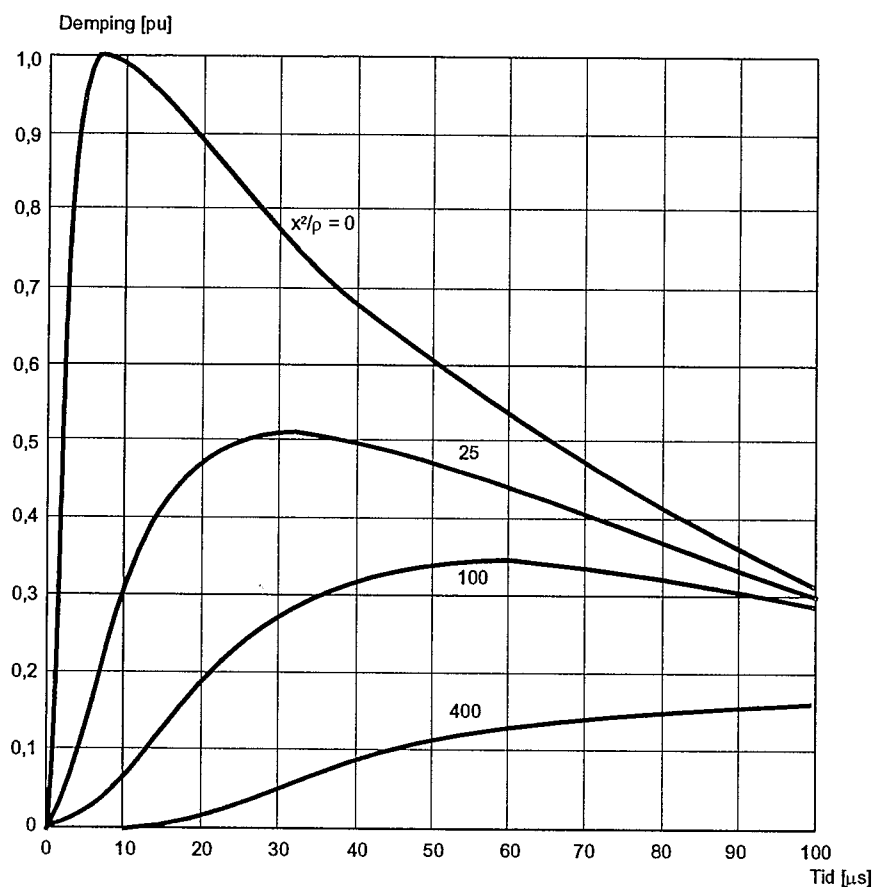
Fra (2.12), figur V2.7 og de verdier som er angitt for ρ og ϵ_r er $\alpha=0,4214 \text{ m}^{-1}$. En verdi på $\alpha x=3$ gir da at avstanden mellom strømpåtrykk og observasjonsted er ca 7,1 m, og at halve amplitudeverdien av påtrykt strøm på dette stedet inntreffer etter ca 0,36 μs . For å ha en sammenligning med andre tidsforløp senere i dette kapittel vil den maksimale absisseverdien på $\alpha x t=1000$ i figur V2.7 tilsvare 17,7 μs med $\rho=100 \Omega\text{m}$ og $\epsilon_r=10$.

Forskyvningstrømmer i jord har praktisk betydning kun for bølgefronten for svært steile forløp. Forskyvningstrømmen er helt uten betydning for de høyfrekvente strømpåtrykk som normalt opptrer i kraftnett.

Figur V2.8 inneholder beregningsresultater for en enkel nedgravd jordleder. Figuren viser hvordan en støtstrøm med tilnærmet fronttid/halvverditid lik 7/65 μs dempes som funksjon av jordresistivitet og avstand mellom strømpåtrykk og det sted hvor strømmen observeres. Kurven for $x^2/\rho=0$ tilsvare den injiserte støtstrømmen. Med utgangspunkt i $\rho=100 \Omega\text{m}$ fås sammenheng mellom parameteren x^2/ρ og avstanden x som vist i tabell V2.1.

Tabell V2.1 Sammenheng mellom kurveparametre i figur V2.8, jordresistivitet og avstand mellom strømpåtrykk og observasjonsted.

x^2/ρ	0	25	100	400
x [m]	0	50	100	200



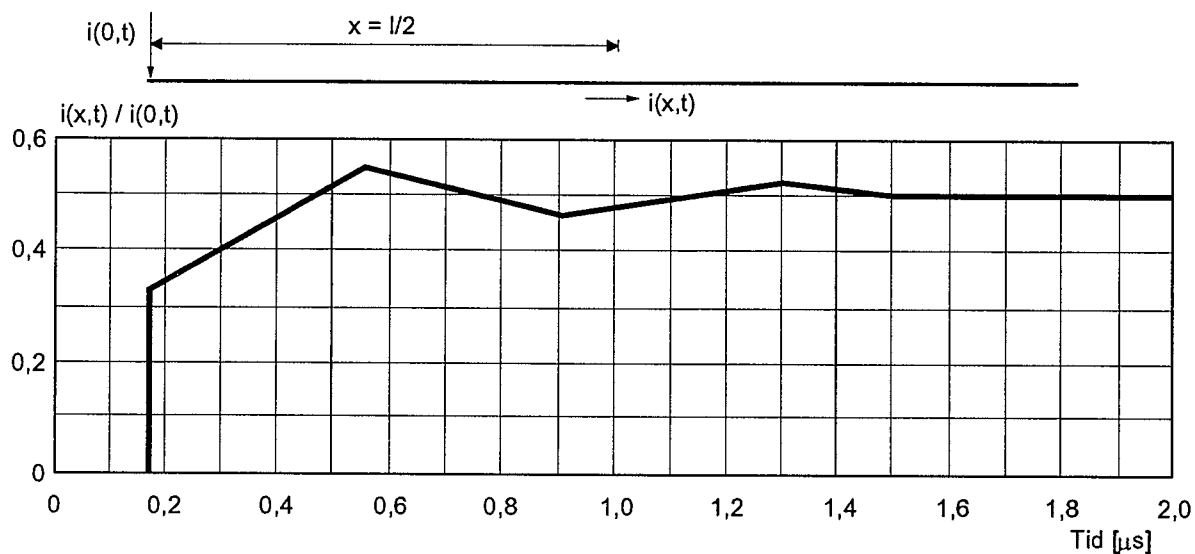
ρ - jordresistivitet [Ω/m]

x - avstand mellom påtrykk og observasjonsted [m]

Figur V2.8 Beregninger som viser hvordan en påtrykt $7/65\mu\text{s}$ strømbølge ($x^2/\rho=0$) dempes og forvrenges langs en nedgravd jordleder med x^2/ρ -forholdet som parameter.

For korte jordledere vil refleksjoner fra endepunktene ha betydning for strømresponsen. Den maksimale lengden den kan ha for at jordlederen fortsatt skal betraktes som kort er avhengig av både strømmens frekvens og jordresistivitet. Jordlederen betraktes som kort dersom lekkstrøm ut i jordsmonnet pr. enhetslengde er konstant langsetter lederen. Dette ansees som oppfylt dersom strømmen internt i selve lederen midtvegs mellom innmating- og endepunktet er halvparten av den påtrykte strømmen.

I figur V2.9 er det vist beregning av trinnstrømresponsen midt på en 50 m lang jordleder nedgravd i jord med $\rho=1000 \Omega \text{ m}$ og hvor strømmen påtrykkes i det ene endepunktet. Stasjonær strømvledning inntreffer etter ca $1\mu\text{s}$.



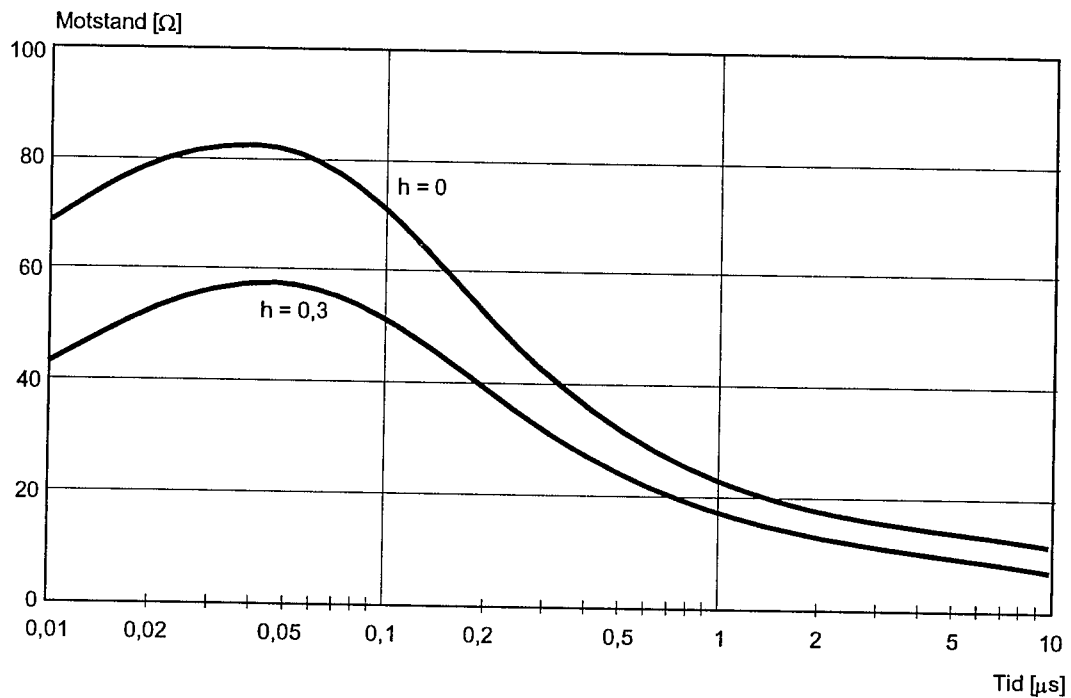
Figur V2.9 Beregning av strøm midt på en 50 m lang jordleder nedgravd i homogent jordsmonn med $\rho=1000 \Omega\text{m}$ og $\epsilon_r=10$ med trinnstrømpåtrykk i ett av endepunktene.

V2.4.3 Bølgeimpedanskarakteristikk for jordledere

Før avledning av strøm fra jordledere kan betraktes som stasjonær, vil motstanden eller impedansen som en strøm ser i forhold til fjern jord normalt avvike vesentlig fra DC-verdien. Stasjonær avledning og resistiv strøm- og spenningsfordeling er en forutsetning for utledning av formelverket for DC-jordmotstander. På bakgrunn av det som tidligere er beskrevet er den motstand som jordlederen representerer ovenfor høyfrekvente strømmer eller steile støtstrømmer nødvendigvis ikke konstant. Motstanden vil normalt variere over tid og er bl.a. bestemt av strømpulsens form, jordlederens utstrekning og jordsmonnets elektriske egenskaper.

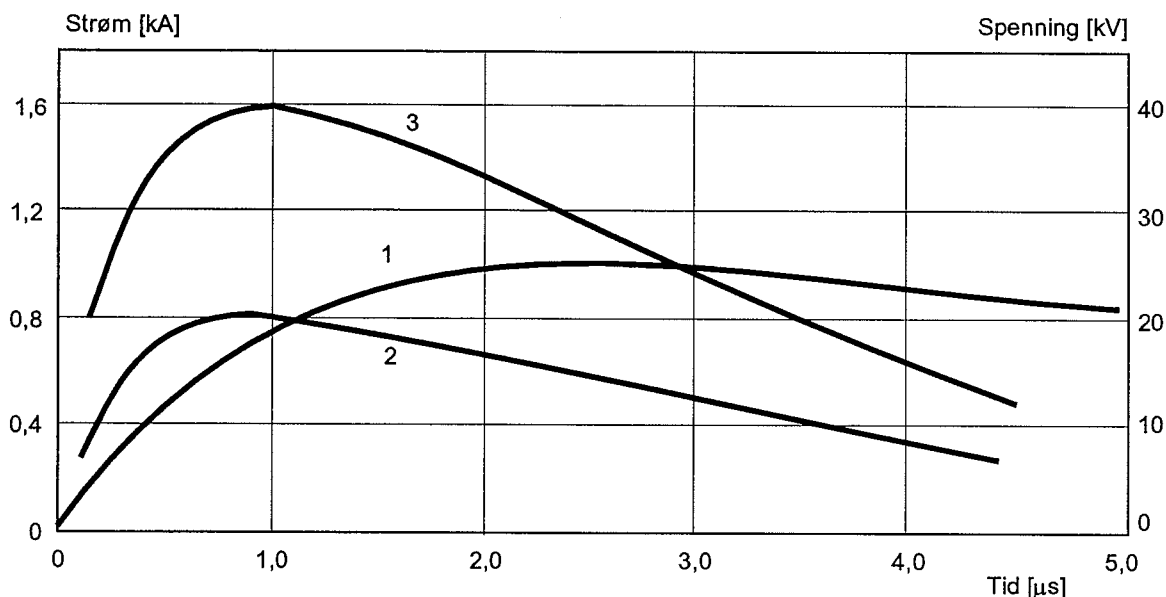
Den initiale bølgeresponsen til et enhets strømpåtrykk blir kalt for *bølgeimpedans*-karakteristikk og angir et forhold mellom spenning og strøm. Teoretiske utledninger i forbindelse med impedanskarakteristikker bli ikke omtalt her. Det tas i stedet utgangspunkt i utregnede kurveforløp fra [3] for å vise forskjeller mellom DC- og/eller driftsfrekvente motstander og typiske motstandsverdier ved høyfrekvente strømforløp.

Beregnete verdier for bølgeimpedanskarakteristikken for en *uendelig lang* jordleder nedgravd i homogent jordsmonn med nedgravingsdybde som parameter er vist i figur V.2.10. Det er tatt hensyn til innvirkningen av forskyvningstrøm i jord.



Figur V2.10 Beregnede verdier for bølgeimpedanskarakteristikken midt på en uendelig lang jordleder påtrykt trinnstrøm med nedgravingsdybde som parameter. Radius lik 5 mm, nedgravingsdybde $h=0$ og 0,3 m, $\rho=1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r=10$.

Ved påtrykk av impulsstrømmer på *lange* nedgravde jordledere vil spenningen i matepunktet normalt stige raskere enn strømmen. Forløpene vil imidlertid være avhengig både av strømsteilhet og jordsmonnets egenskaper. I figur V2.11 er det vist beregnede spenninger i innmatingspunktet på en lang jordleder nedgravd på 0,3 m dybde med en strømimpuls som angitt i kurve 1. Strømmen påtrykkes enten midt på eller i det ene endepunktet på lederen.



Kurve 1: Strømimpuls

Kurve 2: Potensial ved strømpåtrykk midt på ledere

Kurve 3: Potensial ved strømpåtrykk i det ene endepunktet på ledere

Figur V2.11 Beregnede spenninger i punktet hvor en impulsstrøm, som vist i kurve 1, påtrykkes en *lang* jordleder nedgravd på 0,3 m dybde. Lederradius er 5 mm, $\rho=1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r=10$.

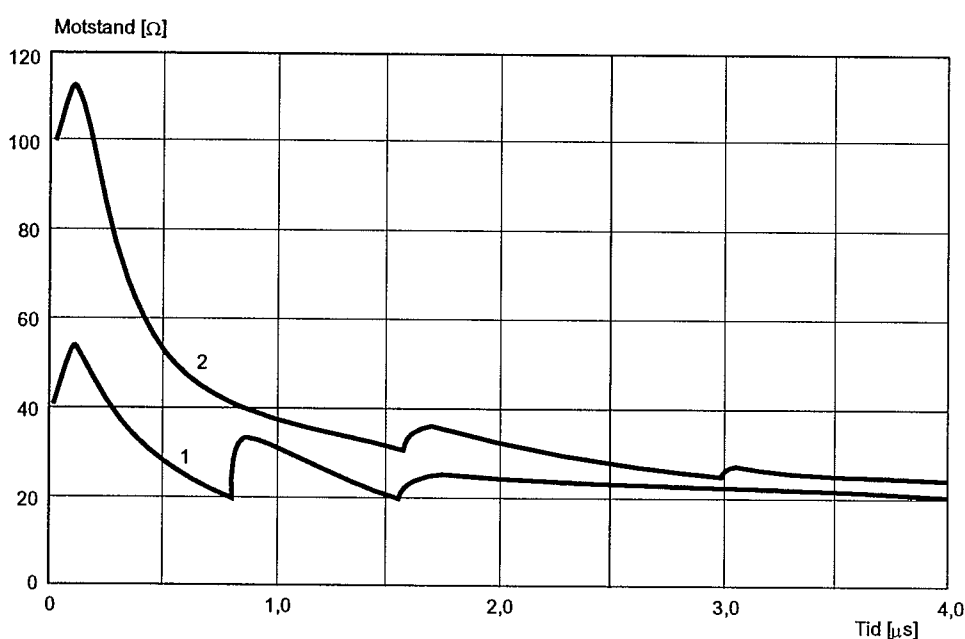
Fra figuren sees at maksimalspenningene inntreffer etter ca 0,5-1 μs mens strømmen når sin maksimalverdi først etter ca 3 μs . Ved påtrykk midt på jordlederen blir maksimalspenningen halvparten av maksimalverdien når strømmen mates inn i lederenden.

Impedansen som fås ved å beregne forholdet mellom *momentanverdier* for spenning og strøm i figur V2.11, bølgeimpedanskarakteristikken, avviker ikke svært mye fra verdiene i figur V2.10 hvor det påtrykkes trinnstrøm. Jordresistiviteten er den samme i begge figurene. Det er innenfor tidsrommet opp til ca 1-1,5 μs fra strømpåtrykk at det er størst forskjell i responser mellom trinnstrømmen og den andre strømimpulsen som når sin toppverdi etter ca 3 μs .

Ved DC- og driftsfrekvens er jordmotstanden proporsjonal med jordresistiviteten. I vedleggsrapport 1 er de fleste figurer og beregninger basert på $\rho=100 \Omega\text{m}$. I denne vedleggsrapporten blir det imidlertid presentert flere beregningsresultater med resistivitet høyere enn $\rho=100 \Omega\text{m}$. Med god tilnærming er bølgeimpedansen proporsjonal med $\sqrt{\rho}$ før stasjonære forhold inntreffer etter impulspåtrykk.

For korte jordledere vil det normalt ikke bli en raskere oppbygging av spenning i forhold til strøm slik som vist i figur V2.11. Beregnede verdier av impedansen i matepunktet for en trinnstrøm, i endepunktet eller midt på en 100 m lang nedgravd jordleder, er vist i figur V2.12. Selv om den maksimale impedansen med påtrykk midt på lederen er ca halvparten så stor som ved påtrykk av strøm i endepunktet, nærmer begge kurvene seg raskt mot DC-motstanden. DC-motstanden er beregnet til ca 24Ω fra formelverket i vedleggsrapport 1.

For strømpåtrykk midt på lederen sees at stasjonære forhold inntreffer allerede etter et par refleksjoner fra endepunktene. Dette tilsvarer et tidsintervall på ca $1,5 \mu\text{s}$.



Kurve 1: Større påtrykk midt på lederen.

Kurve 2: Større påtrykk i det ene endepunktet på lederen.

Figur V2.12 Beregning av bølgeimpedanskarakteristikk fra trinnstrømpåtrykk midt på og i et endepunkt på en 100 m lang jordleder på 0,3 m dybde. Lederradius er lik 5 mm, $\rho=1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r=10$.

Ved å sammenligne kurvene for strømpåtrykk i endepunktet av jordlederen i figurene V2.11 og V2.12 i løpet av de første ca $3 \mu\text{s}$, sees at verdiene i figur V2.12 ikke er svært forskjellig fra verdiene for en *lang* leder. Potensialet på jordlederen kan langt på veg beregnes ut fra figur V2.11. Dersom DC-motstanden ble lagt til grunn for utregning av spenningen, ville det gi en betydelig feil i potensialet. For beregning av potensialet midt på lederen kan DC-motstanden brukes dersom lederen er vesentlig kortere enn f.eks. 100 m. 50 m er angitt som en øvre grense i [3].

V2.4.4 Innvirkning på bølgekarakteristikker fra ionisering i jord

Ved ionisering av jordsmonnet og den betydning dette har for bølgekarakteristikker, er det nødvendig å skille mellom den interne overslagsfeltstyrken i jord og overslagsfeltstyrken ved elektrodeoverflatene. Eksperimenter utført med nedgravde kuleelektroder har gitt typiske verdier for overslagsfeltstyrke i jord i området 1000 til 2000 kV/m mens overslagsfeltstyrken ved elektrodeoverflaten gjerne er så lav som 100 til 500 kV/m.

Det prinsipielle ioniseringsforløpet kan beskrives ved å anta at en stor tidsavhengig strøm, $I=I(t)$, injiseres i en punktelektrode og at det som følge av ioniseringen dannes et ledende sylinder-/kuleformet elektodeplan. Radien øker inntil den radielle feltstyrken, $E(r)$, blir lik overslagsfeltstyrken mellom elektodeplanets overflate og jord, E_o . Motstanden mellom den sirkulær elektroden og sann jord vil følgelig være tidsavhengig. Den er normalt større på stigende strømflanke i forhold til fallende flanke fordi ioniseringsmekanismene trenger tid til å utvikle seg.

For å ta utgangspunkt i en mer praktisk jordelektrode antas det at strømmen $I(t)$ injiseres i et vertikalt jordspyd som er nedgravd i homogen jord. Den radielle feltstyrken i avstand r fra spydet, $E(r)$, kan beregnes fra (2.14).

$$E(r) = \frac{I(t) \rho}{2\pi r l} \quad [V/m] \quad (2.14)$$

hvor

- ρ jordresistivitet [Ωm]
- l spydlengde [m]
- r avstand fra spyd til stedet for $E(r)$ [m]

Ioniseringen pågår inntil $E(r)$ blir lik feltstyrken for overslag i jordsmonnet, E_o . Den effektive spydradius, r_o , kan settes lik

$$r_o = \frac{I \rho}{2\pi l E_o} \quad [m] \quad (2.15)$$

og motstanden mot sann jord kan beregnes vha. tilsvarende formel som for et enkelt vertikalt jordspyd som angitt i kapittel V1.3, vedleggsrapport 1.

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r_o} - 1 \right) \quad [\Omega] \quad (2.16)$$

Motstanden R_o , hvor det nå er tatt hensyn til ionisering, er redusert i forhold til DC-motstanden med η -faktoren som gitt i (2.17).

Utrekninger basert på de oppgitte formlene med data for $\rho=100 \Omega\text{m}$, $l=3 \text{ m}$, $E_o=1000 \text{ kV/m}$, spydradius $r=1,25 \text{ cm}$ og $\hat{I}=10 \text{ kA}$, viser at ekvivalent spydradius $r_o \approx 0,1 \text{ m}$ samt at den ekvivalente jordmotstanden blir ca 20Ω . Reduksjonsfaktoren η bli i dette tilfellet lik 0,65.

$$\eta = \frac{\ln \frac{4l}{r_o} - 1}{\ln \frac{4l}{r} - 1} \quad (2.17)$$

For en horisontal jordleder og ionisering i jordsmonnet kan det på lignende måte som for et vertikalt jordspyd beregnes en ekvivalent lederradius som er bestemt av resistivitet, overslagsfeltstyrke og strømmens størrelse. Dersom lederen med lengde l er nedgravd på en dybde som er vesentlig større enn lederradius, er den ekvivalente lederradius uten ionisering, r' , gitt av (2.18).

$$r' = \sqrt{2rh} \quad [m] \quad (2.18)$$

hvor

r lederradius [m]

h nedgravingsdybde [m]

Med ionisering kan ekvivalent radius for den horisontale lederen, r_o' , beregnes vha. (2.19), og r_o beregnes fra (2.15).

$$r_o' = \sqrt{2r_o h} \quad [m] \quad (2.19)$$

Reduksjonsfaktoren for jordmotstanden til en horisontal jordleder nedgravd i homogen jord med ionisering kan beregnes vha. (2.20).

$$\eta = \frac{\ln \frac{2l}{r_o'} - 1}{\ln \frac{2l}{r'} - 1} \quad (2.20)$$

Utrekninger basert på de oppgitte formlene med data for $\rho=1000 \Omega\text{m}$, $l=100 \text{ m}$, $E_0=1000 \text{ kV/m}$, trådradius $r=2 \text{ cm}$ og $\hat{I}=100 \text{ kA}$, viser at $r_0 \approx 0,16 \text{ m}$. Med en nedgravningsdybde $h=0,3 \text{ m}$ blir reduksjonsfaktoren lik 0,84. Dette viser at selv med svært høye lynstrømmer og relativ høy resistivitet blir det normalt en reduksjon i jordmotstanden selv om lederne er forholdsvis lange.

Til sammenligning er det foretatt tilsvarende beregninger for et 20 meter langt vertikalt jordspyd og en 20 meter lang horisontal jordleder, begge med 1 cm spyd/trådradius, nedgravd på 0,3 m dybde og med følgende data: $\rho=1000 \Omega\text{m}$, $E_0=1000 \text{ kV/m}$, $\hat{I}=10 \text{ kA}$. Resultatene er angitt i tabell V2.2.

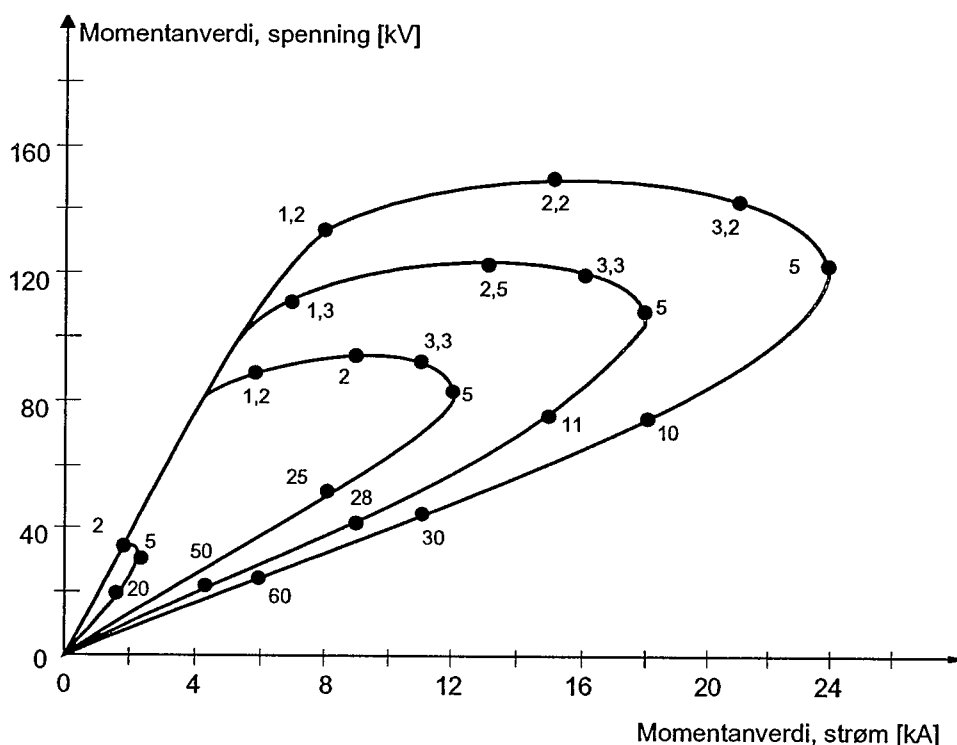
Tabell V2.2 Beregnede DC-motstander og reduksjonsfaktorer for jordmotstander pga. ionisering av jordsmonnet.

Jordleder	DC-motstand [Ω]	Reduksjonsfaktor η
Vertikalt spyd	64	0,74
Horisontal leder	116	0,80

V2.5 BEREGNINGSMODELLER FOR IMPULSMOTSTAND

For å vise noen karakteristiske strøm- og spenningsforløp som kan opptre ved påtrykk av impulsstrømmer, er det i figurene V2.13-V2.15 presentert resultater fra eksperimenter utført med nedgravde jordelektroder innstøpt i betong. De representerer typiske fundamenter for kraftledningsmaster, [4]. Fundamentene har en sopplignende form med "sopphatten" nederst og har total lengde 3-5 m. Diameter for "stilken" ligger i området 0,2-0,4 m.

Slike målinger er bl.a. grunnlag for beregningsmodeller for impulsmotstand. Figur V2.13 angir sammenheng mellom målte momentanverdier for strømmen som flyter ut i jord fra elektroden og momentanverdier for spenningsfallet over en gitt strekning i jordsmonnet. Kurver for fire forskjellige maksimalverdier på strømmen er angitt.



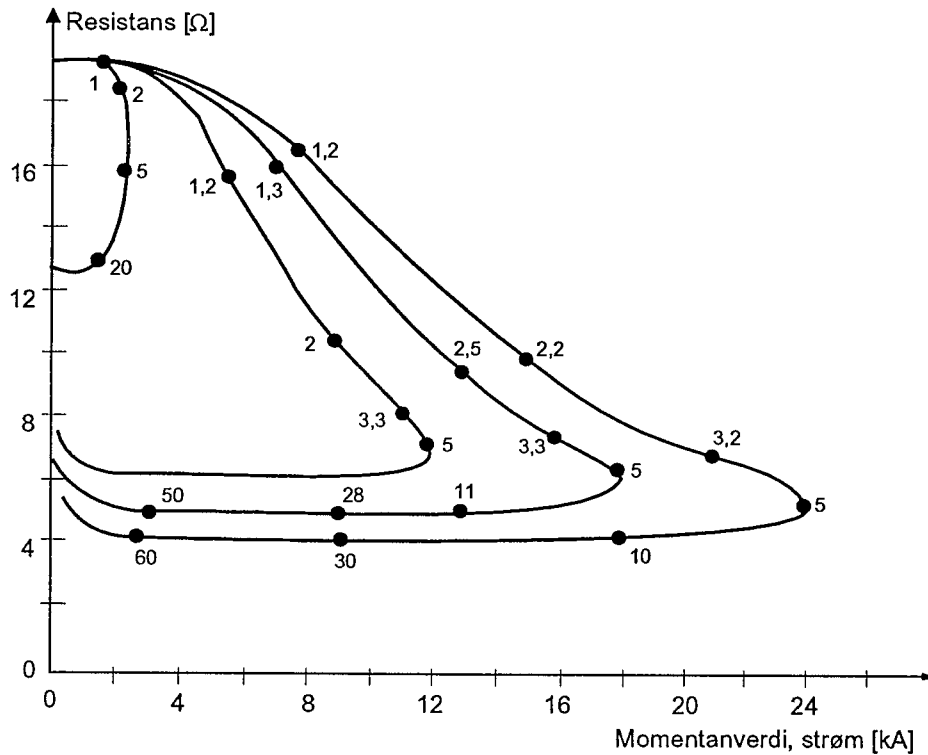
Figur V2.13 Målte momentanverdier for spenningsfall i jord som funksjon av impulsstrøm som mates ut i jordsmonnet via en nedgravd jordelektrode med strøamplituden som parameter, [4]. Tallene som er avmerket på kurvene angir de tidspunktene [μs] strøm og spenning er målt med referanse til tidspunkt for påtrykk av strømmen. Strømform: 5/35 μs .

Det er tilnærmet lineær sammenheng mellom strøm og spenning opp til nesten 2 μs . Maksimalspenningen inntreffer når di/dt er størst. Deretter reduseres spenningen sakte inntil strømmen når maksimalverdi. Det er tilnærmet lineær sammenheng mellom strøm og spenning når strømmen går videre mot null. For den minste strøamplituden på 2 kA samsvarer disse resultatene godt med *beregninger* av strøm og spenninger for en lang horisontal jordleder som er vist i figur V2.11 tidligere i denne vedleggsrapporten.

De ulineære sammenhengene mellom strøm og spenning gjør at forholdet mellom spenning og strøm blir både strøm- og tidsavhengig. Impulsmotstanden for en jordleder, som normalt er definert som forholdet mellom maksimalt spenningsfall i jordsmonnet og maksimalverdien av strømmen som mates inn i elektroden, er basert på verdier som opptrer ved ulike tidspunkt. Impulsmotstanden vil som oftest være forskjellig fra forholdet mellom momentanverdiene for spenning og strøm, slik det er omtalt i kapittel V2.4.3.

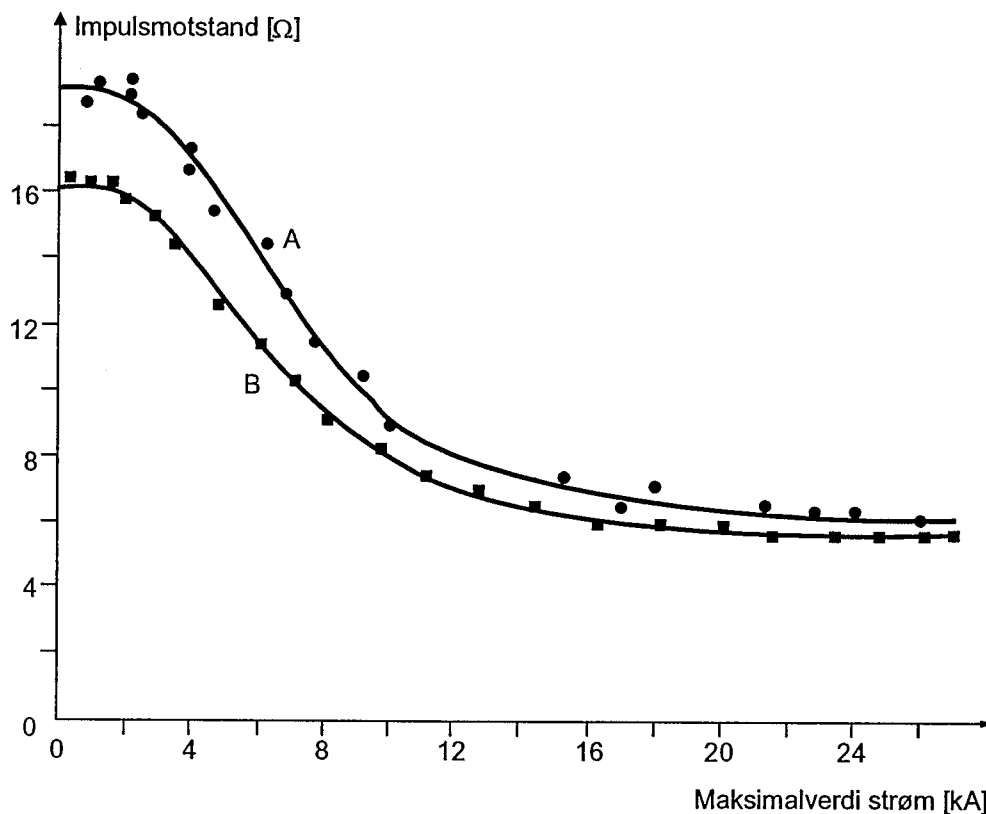
I figur V2.14 er momentanverdier av resistansen, bølgeimpedanskarakteristikken, i [4] kalt dynamisk resistans, som funksjon av strømmens maksimalverdi beregnet ut fra resultatene

i figur V2.13. Strømmens toppverdi er parameter. Forholdet mellom største og minste resistansverdi ligger i området 3,3 til 4,9 avhengig av maksimalstrømmen.



Figur V2.14 Forholdet mellom momentanverdi av spenning og strøm, dynamisk resistans, basert på måleresultatene i figur V2.13 for en jordelektrode innstøpt i et mastefundament med strømmens toppverdi som parameter, [4]. Strømform: 5/35 μ s.

I figur V2.15 er det vist hvordan *impulsmotstanden*, gitt som forholdet mellom maksimalverdiene av spenning og strøm, som funksjon av støtstrømmens maksimalverdi blir med utgangspunkt i måleresultatene fra figur V2.13.



Figur V2.15 Beregnet impulsmotstand, basert på måleresultatene i figur V2.13 for en nedstøpt jordelektrode/mastefundament, som funksjon av strømmens maksimalverdi. Kurve A og B gjelder for strømtetthet i fundamentets armeringsjern på hhv. 0,3 og 0,26 A/cm². Strømform: 5/35 μ s.

Fra figurene foran framgår det at ulineære strøm- og spenningsforhold begynner allerede ved strøamplituder på 2-3 kA.

V2.5.1 Beregningsmodeller basert på bølgeforplantning

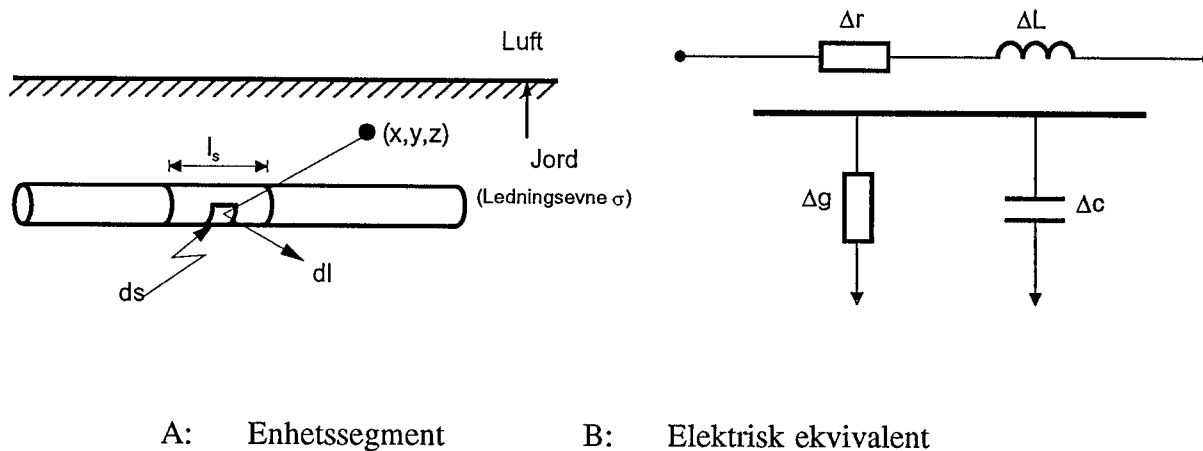
Det finnes svært mye litteratur som beskriver hvordan strøm- og spenningsbølger med frekvenskomponenter høyere enn driftsfrekvens forplanter seg langs ledere som er forlagt i jord, i luft eller nedsenket i f.eks. olje. Det er imidlertid vanskelig å lage pålitelige høyfrekvente beregningsmodeller for større praktiske elektrodesystem nedgravd i jord.

Det er tidligere i denne vedleggsrapporten vist at det er mange elektriske parametre som er avgjørende for nøyaktigheten i modellene. I tillegg vil induktansen i tilledninger og i selve elektrodeanlegget normalt ha stor betydning for impedansen. Ofte innføres det forenklinger som gjør at modellene egner seg best til helt spesielle analyser i tids- eller frekvensplanet. Det finnes en del publikasjoner som tar for seg en kopling mellom mer

generelle program for beregning av strøm- og spenningsforløp i tidsplanet og høyfrekvente beregningsmodeller for jordmotstand. Det er da mulig å foreta analyser, f.eks. isolasjonskoordinering, hvor både elektrodeanlegg, kraftlinjer og stasjonsanlegg kan modelleres under ett.

Dette kapittel gir en kortfattet beskrivelse av en del viktige parametere som inngår i beregningsmodellene og viser hvordan beregningsrutiner kan bygges opp. Det henvises forøvrig til spesiallitteraturen, f.eks. ICLP-konferansene (International Conference on Lightning Protection) for mer detaljert omtale av både enkle og mer kompliserte elektrodeanlegg.

Ved modeller som er basert på bølgeforplantning undersøkes det f.eks. hvordan strøm- og spenningsoppbyggingen foregår avhengig av utstrekning på tilledninger og utførelsen av elektrodeanlegget. I figur V2.16 er det vist et typisk utgangspunkt for hvordan modellering av jordlektroder kan gjøres, [5]. Slike modeller benyttes for beregninger både i tids- og frekvensplanet.



Figur V2.16 Utgangspunkt for modellering av et elektodeanlegg basert på bølgeforplantning.

Modellene tar vanligvis utgangspunkt i at horisontale metalliske sirkulære ledere som ligger nedgravd i homogent jordsmonn under en horisontal jordoverflate deles opp i mindre segmenter. En slik oppdeling i segmenter er også utgangspunktet for modeller som tillater vilkårlig plassering av jordledere.

I hht. figur V2.16 B blir et segment med lengde l_s modellert med en serieresistans Δr , serieinduktans ΔL , konduktans lik Δg og kapasitans lik ΔC . De numeriske verdier for

størrelsene Δr , ΔL og ΔC kan tilnærmet beregnes vha. konduktansen og bølgehastigheten, v_s , for elektromagnetiske bølger i jord.

Under forutsetning av at lederne ligger langt ned i jord kan bølgehastigheten, v_s , beregnes fra (2.21). Virkelig bølgehastighet vil imidlertid være et sted mellom verdier beregnet vha. (2.13) og (2.21).

$$v_s = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad [m/s] \quad (2.21)$$

hvor

- c lyshastigheten i vakuum [m/s]
- ϵ_r relativ dielektrisitetskonstant for homogen jord

Beregningen av konduktansen Δg er basert på løsning av Laplace's ligning for en leder plassert i et halvuendelig ledende jordsmonn med luft over slik som vist i figur V2.16 A. Det henvises f.eks. til [5] for beregning av konduktansen og for beskrivelse av hvordan rutinene for beregning av transiente strøm- og spenningsbølger kan etableres.

Induktans og kapasitans beregnes som vist i ligning (2.22).

$$\begin{aligned} \Delta C &= \frac{\epsilon}{\sigma} \Delta g \quad [F] \\ \Delta L &= \frac{\sigma l_s^2}{\epsilon_0 c^2 \Delta g} \quad [H] \end{aligned} \quad (2.22)$$

hvor

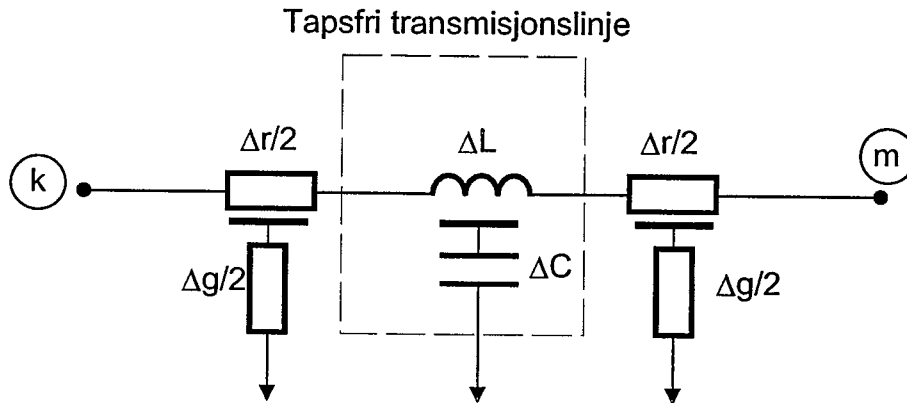
- ϵ_0 dielektrisitetskonstant for vakuum [$8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m]
- ϵ dielektrisitetskonstant for jordsmonnet [F/m]
- σ jordsmonnets ledningsevne [$1/\Omega m$]

Dersom Kirchoff's lover anvendes på et lite segment med lengde Δx , kan det etableres en ligningen for ledersegmentet med resultat som vist i (2.23). I er totalstrømmen som flyter fra segmentoverflaten ut i jorden.

$$\frac{\delta^2 I}{\delta x^2} = \frac{\epsilon_r}{c^2} \frac{\delta^2 I}{\delta t^2} + (\Delta r \cdot \Delta C + \Delta L \cdot \Delta g) \frac{\delta I}{\delta t} + \Delta r \cdot \Delta g \cdot I \quad (2.23)$$

Det er to hovedmåter å løse denne ligningen på. Den ene metoden benytter frekvensplanet og FFT-teknikker (Fast Fourier Teknikk) for å beregne responser i tidsplanet. Denne teknikken er ikke særlig velegnet for (2.23). I stedet gjøres det en ytterligere forenkling

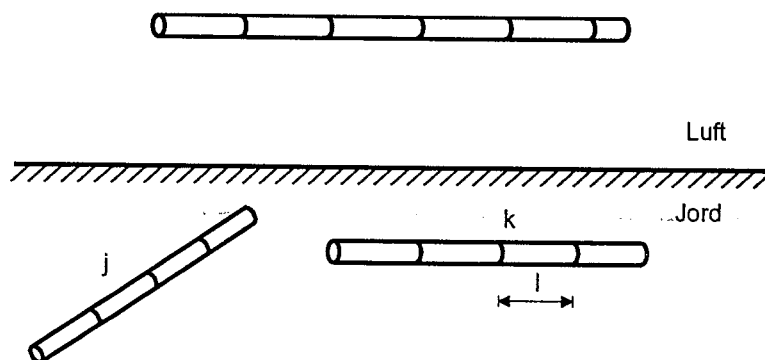
ved å dele modellen opp i en tapsfri del og en del som representerer tapene. Dette er vist i figur V2.17 og er en teknikk som også kan brukes ved beregning av strøm- og spenningsbølger på luftlinjer.



Figur V2.17 Ekvivalentskjema for et kort jordledersegment med utgangspunkt i figur V2.16. Oppdeling i en tapsfri del og en del som representerer tapene.

En slik modellering av jordledere forutsetter lineære egenskaper både for jordsmonn og ledere. Innvirkningen av partielle overslag i jord eller andre ulineære forhold som kan oppstå ved store strøm- og spenningsgradienter kan ikke tas hensyn til i denne modellen. Ulineære forhold kan imidlertid studeres ved f.eks. å kombinere modeller basert på bølgeforplantning med modeller basert på konsentrerte elementer.

I figur V2.18 er det vist utgangspunktet for en alternativ modellering til den som er vist i figurene V2.16-17, [6]. Modellen i figur V2.18, hvor ledere i luft også kan inngå, tar utgangspunkt i en oppdeling av sirkulære ledere i små segmenter.



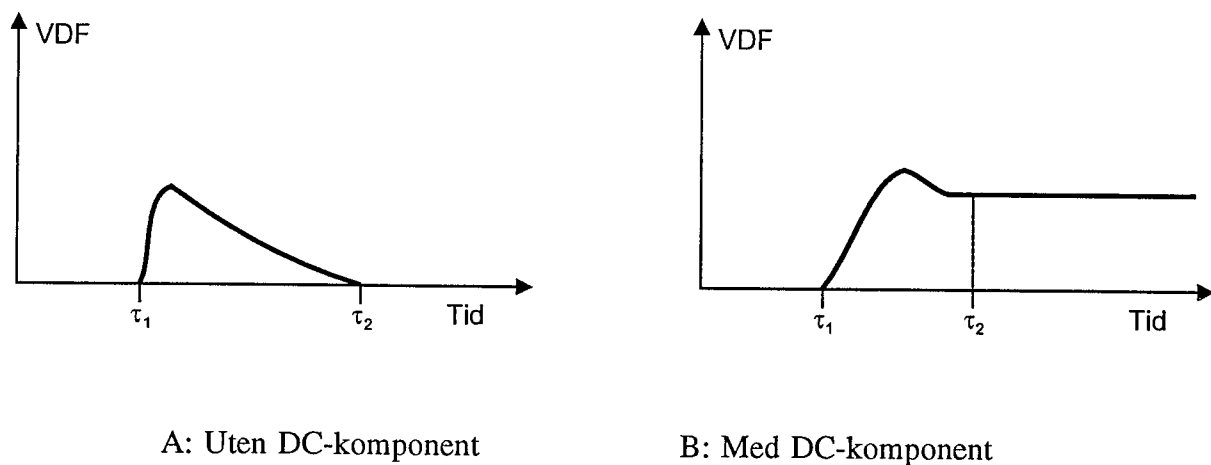
Figur V2.18 Utgangspunkt for høyfrekvent beregningsmodell av motstand til nedgravde jordledere og ledere i luft basert på bølgeforplantningprinsippet.

Modellen går ut på at ledersystemet deles opp i N segmenter hvor det etableres innbyrdes koplinger mellom dem. Dette kan illustreres ved å betrakte to segmenter j og k. En

trinnstrøm som antas å flyte i segment j resulterer i at det induseres en spenning i segment k. Dersom ledersegmentet j tilhører en jordelektrode kan strømmen flyte gjennom selve segmentet, fra ledersegmentet ut i jordsmonnet eller en kombinasjon av begge deler.

Figur V2.19 A viser typisk bølgeform for den gjennomsnittlige induserte spenning på segment k som følge av en enhets trinnstrøm *gjennom* j-segmentet. Figur V2.19 B viser den gjennomsnittlige induserte spenning på segment k når en enhets trinnstrøm forutsettes å flyte *ut i jordsmonnet* fra segment j.

Trinnresponsene i figur V2.19 kalles Voltage Distribution Functions (VDF). De angir *gjennomsnittlige* spenninger på et gitt segment som følge av en trinnstrøm i et annet ledersegment. VDF-responsene avhenger bl.a. av jordresistivitet og dielektrisitetskonstant, lederdimensjoner og segmentoppdeling. De blir beregnet ved en direkte løsning av Maxwell's ligninger i et halvuendelig ledende jordsmonn. Prosedyrer for utregning av VDF-verdier er vist i [6], appendix A. Etter at VDF-verdiene er bestemt, benyttes kjente metoder innenfor systemteorien for utregning av strøm- og spenningsfordelinger både på ledersystemet og i jordsmonnet.



Figur V2.19 Typisk kurveform på trinnresponser, Voltage Distribution Functions (VDF), som underlag for beregning av jordlederimpedanser basert på prinsippet om bølgeforplantning på ledere.

I den generelle kurveformen for VDF-responsene er det en tidsforsinkelse τ_1 i forhold til tidspunktet for strømpåtrykk og et tidspunkt τ_2 hvor trinnresponsen når en stasjonær verdi. Stasjonærverdien er null dersom det er et ikke-ledende materiale mellom de to segmentene (A-figuren) mens den er forskjellig fra null dersom det er et ledende materiale mellom segmentene (B-figuren).

V2.5.2 Beregningsmodeller basert på konsentrerte elementer

Svært høyfrekvente strøm- og spenningsforløp bør normalt analyseres vha. modeller basert på bølgeforplantning. For en del overslagsberegninger kan det være tilstrekkelig med modeller basert på konsentrerte elementer. Dette kapittel gir en kortfattet oversikt over den prinsipielle måten å lage slike modeller på.

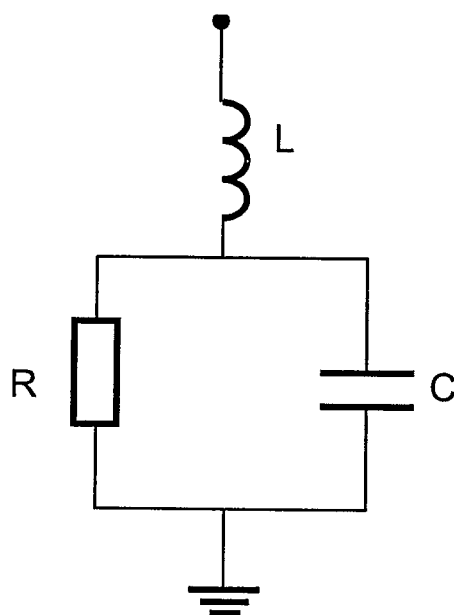
I beregningsmodeller for impulsmotstand må det ofte gjøres forenklinger uavhengig av om modellene baserer seg på bølgeforplantningsprinsippet eller konsentrerte elementer. Ulineære forhold som f.eks. partielle overslag i jordsmonnet kan modelleres vha. konsentrerte elementer med eller uten ulineære egenskaper.

For driftsfrekvente forhold kan strøm- og spenningsfordeling i jordsmonnet og jordledere analyseres med modeller som er basert på ohmske motstander. Ved høye frekvenser eller ved steile bølgefronter vil kapasive forhold i jord og mellom jordsmonn og ledere få større betydning. I tillegg får induktansen i ledere normalt stor innvirkning på strøm- og spenningsverdiene. Det er derfor nødvendig å etablere modeller basert på R-, L- og C-elementer (resistans, induktans, kapasitans) dersom f.eks. et maskenett skal modelleres.

I [7] er modellering av impulsmotstand vha. konsentrerte elementer behandlet, og det er tatt hensyn til mange av de parametrene som må bestemmes. Følgende forhold er omhandlet for et typisk maskenett eller jording av et større mastefundament:

- relasjon mellom impulsmotstand og kapasitans
- etablering av ekvivalent krets (modell)
- etablering av impulsimpedans som funksjon av tid og overgang til stasjonær motstandsverdi
- betydningen som mastefotjordingens impulsmotstand har for isolatorenes overslagspenning
- betydningen av maskenettets induktans på impulsmotstanden

Figur V2.20 viser en meget enkel ekvivalentkrets for et maskenett basert på konsentrerte elementer. For bestemmelse av R, L og C-verdier henvises det til [7]. Det er forutsatt at det ikke inntreffer partielle overslag i jord.



Figur V2.20 Enkel beregningsmodell for impulsmotstand til jordledere eller elektrodeanlegg basert på konsentrerte elementer.

Fra måleresultater med påtrykk av impulsstrømmer i elektrodeanlegg er det etablert beregningsmodeller basert på konsentrerte elementer, [4]. Modellene tar hensyn til ulineære forhold som f.eks. ved partielle utladninger i jord. Målingene viste at impulsmotstanden for et kort jordspyd med lengde l_{sp} inkluderer resistansen til det som kalles kanal- og elektolyttsonene.

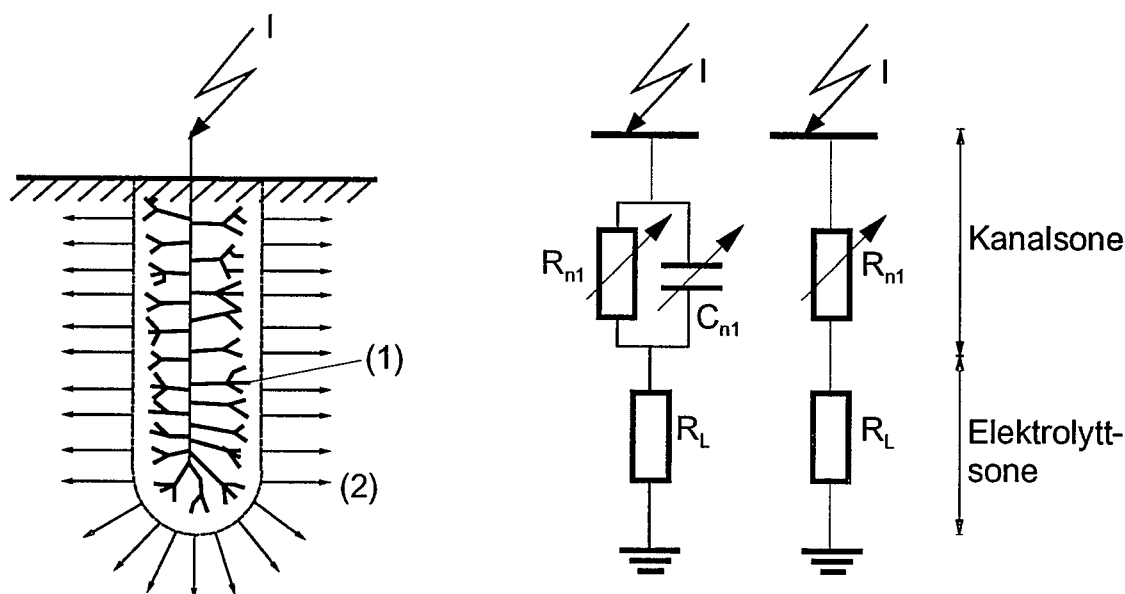
$$l_{sp} < v T_t \quad [m] \quad (2.24)$$

hvor

v strøm- og spenningsbølgers forplantningshastighet [m/s]

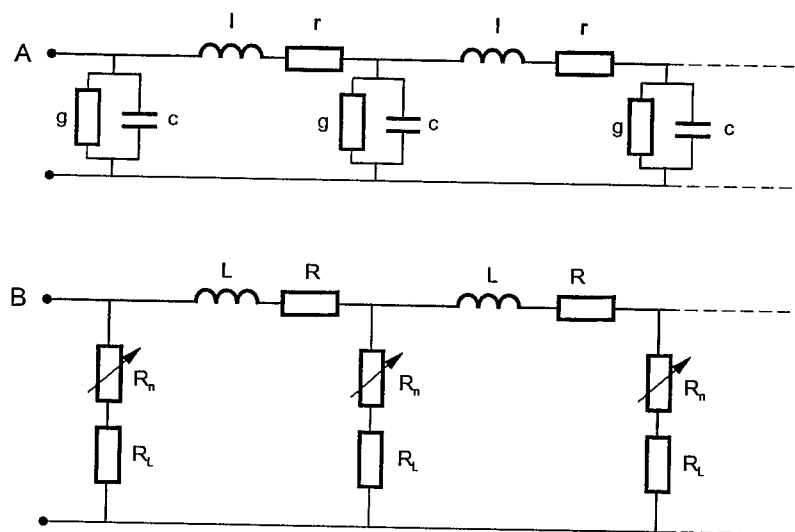
T_t tid til støtstrømmen når sin maksimalverdi [s]

Impulsmotstanden kan modelleres vha. et ikke-lineært element Z_n (kanalsonen), i serie med en lineær resistans R_L (elektrolyttsonen). Figur V2.21 viser en prinsipiell modell av impedansene. Det er også tatt med en ulineær kapasitans C_n for kanalsonen. Normalt kan C_n neglisjeres fordi den kapasitive strømkomponenten er liten i forhold til den resistive delen. I [4] er det vist hvordan parametrene kan bestemmes og hvilke forutsetninger som gjelder.



Figur V2.21 Modell og ekvivalentkrets for impulsmotstand til et jordspyd basert på strømledning gjennom to soner kalt kanalsonen (1) og elektrolyttsonen (2).

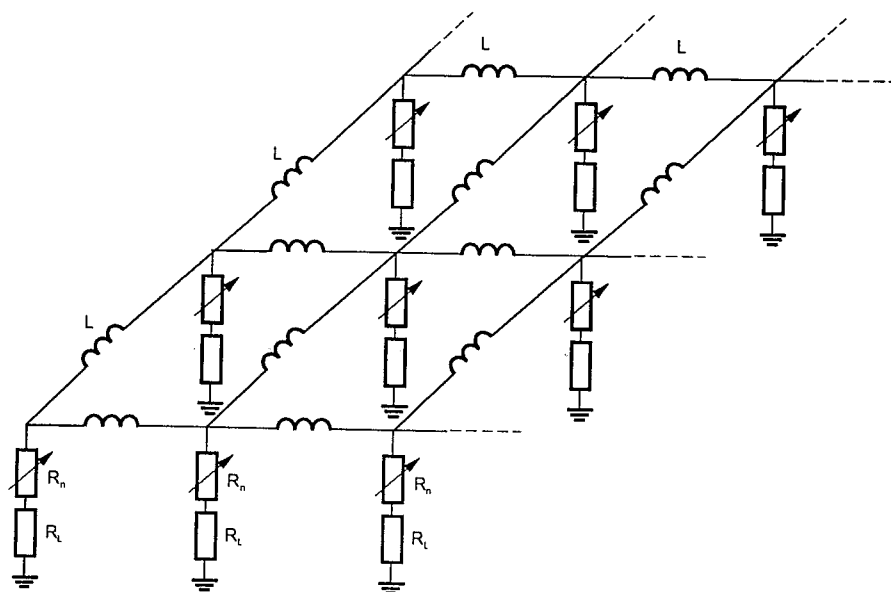
Ved impulsstrømmer påtrykt jordspyd eller jordelektroder med lengder over 10-15 meter, bør det velges modeller basert på bølgeforplantning fordi induktansen får stor betydning for spenningsfordelingen. I [4] er det foreslått modeller basert på en kjede av konsentrerte elementer og hvor det også er tatt utgangspunkt i bølgeforplantning på jordledere. En gruppe med konsentrerte elementer representerer ca 10-15 m jordleder. Figur V2.22 viser modellen basert på fordelte parametre (A) og konsentrerte elementer (B). Resistansen i selve jordelektroden kan normalt neglisjeres fordi den har liten betydning for den totale jordmotstanden. Selv om det tas hensyn til strømførtregning i lederen blir resistansen sjelden større enn 0,005-0,1 Ω/m .



l, r elektrodens induktans og resistans pr. lengdeenhet
 g, c jordsmonnets konduktans og kapasitans pr. lengdeenhet
 L, R induktans og resistans pr. segment/ledd
 R_n, R_t resistans i hhv. kanal- og elektrolyttsonen

Figur V2.22 Jordleder modellert som transmisjonslinje med fordelte parametre (A) og som en ekvivalentkrets basert på konsentrerte elementer (B).

Figur V2.23 viser hvordan et maskenett kombinert med jordspyd kan modelleres med utgangspunkt i modellene angitt i figurene V2.21-22. Det er sett bort fra motstanden R i selve elektroden.



Figur V2.23 Modellering av maskenett med jordspyd basert på modellene i figurene V2.21-22 for beregning av impulsmodstanden for elektrodeanlegget.

V2.6 REFERANSER

1. Meliopoulos, A.P: Power System Grounding and Transients
New York: Marcel Dekker, Inc.1988.
2. American National Standards Institute, ANSI/IEEE: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
New York: 1986. ANSI/IEEE Std. 80-1986.
3. Sunde, E: Earth Conduction Effects in Transmission Systems
New York: Dover Publication Inc. 1968.
4. Kosztaluk, Loboda, Mukhedkar: Experimental Study of Transient Ground Impedances
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no.11, 1981, pp. 4653-60.
5. Meliopoulos, Moharam: Transient Analysis of Grounding Systems
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no.2, 1983, pp.389-99.
6. Papalexopoulos, Meliopoulos: Frequency dependent Characteristics of Grounding Systems
IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, no.4, 1987, pp.1073-81.
7. Verma, Mukhedar: Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no.3, 1981, pp.1023-30.

VEDLEGGSRAPPORT 3

METODER FOR MÅLING AV JORDMOTSTAND I ELKRAFTANLEGG

METODER FOR MÅLING AV JORDMOTSTAND I ELKRAFTANLEGG

Beskrivelse av målemetoder for å kunne sammenligne og anbefale teknikker for ulike formål.

Gjennomgang av metoder for måling av jordresistivitet og jordmotstand samt alternative metoder for bestemmelse av jordmotstand og hvilket utstyr som trengs for å foreta målinger er beskrevet. Forskjellige metoders begrensninger og fortrinn er i korthet behandlet. Metoder for å løse praktiske måleproblem er angitt.

V3.1 INNLEDNING

Målinger av jordingsforholdene i et anleggsområde vil normalt bli foretatt innenfor en av to hovedfaser:

- 1: De kan foretas i planleggingsfasen av et elektrodeanlegg for å gi underlag til utforming og dimensjonering av anlegget eller for å avgjøre om området i det hele tatt er egnet til formålet. Grunnlaget for en slik analyse er målinger av *jordresistivitet* på stedet og etterfølgende beregning av jordmotstanden.
- 2: De kan foretas under idriftsettingsfasen etter at elektrodeanlegget er etablert ved at *jordmotstanden* måles for å verifisere at den er tilstrekkelig lav til formålet.

Måling av jordmotstand kan avvike en del fra beregningsverdier og skyldes normalt usikkerhet i verdien på jordresistiviteten som ligger til grunn for beregningene. Resistiviteten kan variere i betydelig grad med jordsmonnets temperatur og fuktighet, og den vil også kunne ha store lokale variasjoner avhengig av bonitet. Det formelverk som brukes for å beregne jordmotstander er vanligvis basert på homogent jordsmonn og er mangelfullt når det gjelder å ta hensyn til inhomogeniteter i jorden.

Hensikten med måling av *jordresistiviteten* kan oppsummeres med følgende momenter:

- * Grunnlag for å estimere jordmotstanden i et elektrodeanlegg
- * Anslå spenningsgradienter, skritt- og berøringsspenninger
- * Beregne induktiv kobling mellom kraftlinjer og kommunikasjonslinjer
- * Utforming av katodiske beskyttelsessystemer (korrosjon)
- * Avdekke mineralforekomster

Hensikten med måling av *jordmotstand* kan oppsummeres med følgende momenter:

- * Kontrollere om et nytt elektrodeanlegg er tilfredsstillende
- * Dokumentere/fastslå endringer i et eksisterende elektrodeanlegg etter forandringer i anlegget eller nettet
- * Oppdage utillatelige skritt- og berøringsspenninger
- * Klarlegge eventuell økning i jordpotensial som kan medføre beskyttelsestiltak for kraft- og kommunikasjonskretser
- * Rutinemålinger for å kontrollere om mindre elektrodeanlegg er intakte

Alle målinger av jordmotstand og jordresistivitet utføres ved å plassere referanseelektroder i jorden. Referanseelektrodene må plasseres i tilstrekkelig avstand fra hverandre og fra et eventuelt elektrodeanlegg for å redusere gjensidig påvirkning mellom elektrodene.

Måleprosedyrene går ut på å måle strøm og spenning mellom referanseelektroder eller mellom referanseelektroder og elektrodeanlegg.

Det må alltid legges stor vekt på sikkerhet under måling av jordingsforhold. Spesielt er det viktig å være klar over det kan oppstå store potensialforskjeller mellom et etablert elektrodeanlegg og referanseelektrodene. Farlige situasjoner kan inntreffe dersom jordfeil oppstår i kraftnettet eller spesielt dersom lyn slår ned med etterfølgende strømpåtrykk elektrodeanlegget. Selv om sannsynligheten er liten for at en feilsituasjon skal oppstå mens det pågår målinger, bør det likevel gjøres sikkerhetsmessige tiltak. Tilledninger fra anvendte jordelektroder må behandles som spenningsførende, personell bør ha verneutstyr og personer og dyr må forhindres fra uforvarende eller i ren nysgjerrighet å komme i kontakt med måleutstyret under selve målingene.

Det vil alltid være en del problemer og vanskeligheter forbundet ved å gjennomføre målinger av jordmotstand eller jordresistivitet. En kortfattet oppsummering av de vanligste vanskelighetene er gitt nedenfor. En del tiltak for å redusere noen av disse problemene er nærmere beskrevet i kapittel V3.5.

- * Det kan være vanskelig å finne nøytral jord til referanseelektroder i tettbebygde områder.
- * Elektroder med tilknytning til jordliner, vannrør etc. krever stor avstand til referanseelektroder.
- * Dårlige kontakter i elektrodeanlegget kan gjøre at en lavspenningstest ikke gir riktig resultat.
- * Jordmotstanden kan være både strøm- og frekvensavhengig.

* Krav til referanseelektroder:

Topunktsmetoden: Jordmotstanden til referanseelektroden må være neglisjerbar eller kjent.

Trepunktsmetoden: Jordmotstanden til de to referanseelektroderne må være av omtrent samme størrelse og avstanden mellom elektrodene må være tilstrekkelig stor.

Potensialfallmetoden: Jordmotstanden er av mindre betydning så lenge avstandene mellom elektrodene er stor nok.

I alle tilfeller må jordmotstanden til referanseelektroderne være så lav at det går tilstrekkelig stor strøm i jorden slik at nøyaktigheten i målingene blir tilfredsstillende.

- * DC strøm: Jordsmonnet vil til en viss grad virke som en likerettende elektrolytt. Dette gjør at likespenningspåtrykk vil gi feil i måleresultatene. En periodisk firkantpuls er å foretrekke og gir tilstrekkelig gode resultater for DC forhold.
- * AC strøm: Det kan være lekkstrøm fra andre kretser i nærheten. Påtrykk av AC strøm bør derfor gjøres med en frekvens noe forskjellig fra 50 Hz. Målesignalet bør også filtreres for å fjerne 50 Hz lekkstrømskomponenten.
- * Måling av store elektrodesystem: Her kan induktans i elektrodeanlegget få stor betydning. Tilledninger fra referanseelektroder blir lange og gir både ohmske og induktive bidrag. I tillegg vil det ofte være noe induktiv kobling mellom tilledningene. Nødvendige tiltak for å redusere problemene er å holde så stor avstand mellom tilledningene som mulig og å ta hensyn til motstanden i tilledninger til de elektroder som måles.
- * Ved måling av jordresistivitet og/eller jordmotstand vil nedgravde metallgjenstander kunne påvirke resultatene.

V3.2 MÅLING AV JORDRESISTIVITET

Jordresistiviteten er en nødvendig parameter for å gjennomføre beregninger, utforme og dimensjonere et elektrodeanlegg. Jordmotstanden for DC og vanlig driftsfrekvens er proporsjonal med resistiviteten. Firepunktsmetoden, beskrevet i kapittel V3.2.4, gir de mest pålitelige resultat og anbefales derfor brukt ved måling. Andre metoder som er egnet til å anslå resistiviteten blir beskrevet i de følgende underkapitlene til V3.2. Det er forutsatt homogent jordsmonn ved utledning av formlene. For mer detaljert beskrivelse av metoder for måling av resistivitet, jordmotstand og potensialfordeling på jordoverflaten henvises det f.eks. til [1].

V3.2.1 Inspeksjon

Ved å kartlegge typen av jordsmonn (sand, leire, humus etc.) og sammenholde dette med erfaringsdata kan det gjøres et meget røft estimat av resistiviteten. Det er imidlertid vanskelig å ta hensyn til fuktighetsinnholdet på stedet.

V3.2.2 Dybdevariasjonsmetoden

Metoden kan benyttes til å måle og kartlegge resistivitet i det øvre jordlaget. Den baserer seg på å måle jordmotstand på testelektroder, jordspyd, som kan drives ned til forskjellige dybder. Resistiviteten beregnes etter formel for jordspyd gitt i (3.1). Det må anvendes 2 eller 3 spyd. Metoden gir midlere resistivitet for spydets lengde og gir dermed også indikasjoner på hvordan resistiviteten varierer opptil største spydlengde.

$$\rho = \frac{2\pi R_j l}{\ln\left(\frac{4l}{r}\right) - 1} \quad [\Omega m] \quad (3.1)$$

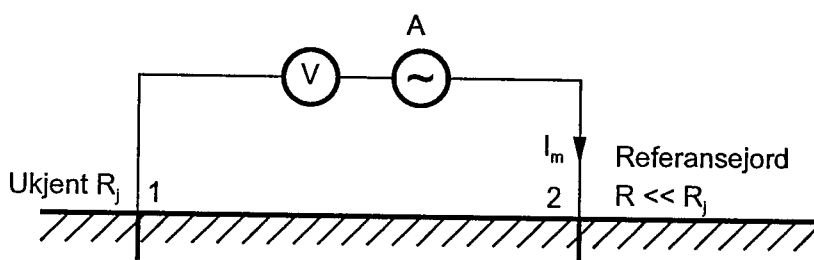
hvor

- l lengde av jordspyd [m]
- r radius av jordspyd [m]
- R_j målt jordmotstand som funksjon av spydlengde [Ω]

V3.2.3 Topunktsmetoden

Denne metoden brukes kun til overflatemåling. Som ved tre- og firepunktsmetoder er den ikke særlig velegnet til å brukes med DC-kilder. Ofte leveres det lett og portabelt utstyr for topunktsmetoden basert på DC-kilder. Figur V3.1 viser et prinsippskjema for topunktsmetoden. Måleoppsettet er utelukkende egnet til å få et raskt estimat av jordresistiviteten i overflaten.

Metoden går ut på at den totale motstand mellom to elektroder, hvorav den ene helst skal være kjent og ha svært liten jordmotstand i forhold til den verdien som skal måles, beregnes som forholdet mellom spenningsfallet mellom elektrodene, U_m , og strømmen, I_m , som mates inn i jorden. For måling av resistivitet kan det like godt benyttes to like spyd som drives ned til samme dybde dersom avstanden er minst fire ganger største spydlengde. Med tre elektroder er det nok at den ene elektroden er testelektrode.



Figur V3.1 Topunktsmetoden brukt som underlag for beregning av jordresistivitet.

Jordmotstanden, R_j , kan beregnes vha. (3.2).

$$R_j = \frac{U_m}{I_m} \quad [\Omega] \quad (3.2)$$

Resistiviteten beregnes ut etter tilsvarende formel som (3.1) dersom jordspyd blir brukt som elektrode. Referanseelektroden bør helst være tilknyttet et større elektrodesystem. Forøvrig kan formel som angitt i vedleggsrapport 1 benyttes for å bestemme resistiviteten ut fra måling av jordmotstand med andre enkle elektroder.

V3.2.4 Firepunktsmetoden

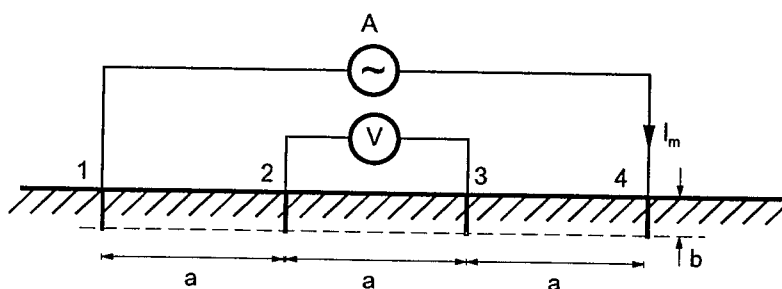
Som navnet tilsier benyttes det fire referanseelektroder. Små elektroder med isolerte tilledninger blir gravd ned i jorden og plassert på en rett linje. Det påtrykkes strøm mellom de to ytterste elektrodene samtidig som spenningsfallet mellom de to midterste elektrodene måles. Basert på måling av spenningsfallet mellom de to midterste elektrodene beregnes den gjennomsnittlige resistiviteten i jordsmonnet. De to mest vanlige kategorier av denne metoden og som normalt gir de beste resultater er:

Wenners metode og Schlumberger-Palmers metode.

Wenners metode blir oftest brukt og gir de mest pålitelige resultater.

I figur V3.2 er det vist et prinsippskjema for Wenners metode. Mellom de to referanseelektrodene 1 og 4 påtrykkes strømmen I_m . Mellom de to andre elektrodene, 2 og 3, avleses spenningen U_m . Påtrykt strøm bør være vekselstrøm med frekvens noe forskjellig fra nettfrekvensen. Strømmen bør være så stor at tilstrekkelig sterkt målesignal for spenningen, U_m , oppnås. Fra målingene beregnes en jordmotstand vha. (3.2).

Wenners metode forutsetter innbyrdes lik avstand mellom de fire elektrodene som alle blir satt ned til dybden h og plassert på en rett linje.



Figur V3.2 Wenners metode brukt som underlag for beregning av jordresistivitet.

Resistiviteten i jord kan beregnes vha. (3.3) for små elektroder nedgravd på dybden h med isolerte tilledninger fram til måleutstyret. Innbyrdes avstand mellom elektrodene er lik a .

$$\rho = \frac{4\pi a R_j}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}}} \quad [\Omega m] \quad (3.3)$$

Formelen for beregning av resistiviteten basert på målinger fra firepunktsmetoden, (3.3), er ikke basert på at det brukes jordspyd. I praksis brukes ofte fire jordspyd som blir plassert på en rett linje med innbyrdes lik avstand a og drevet ned til en dybde som ikke overstiger $0,1a$. Nedgravingsdybden h i (3.3) antas lik null, og ved bruk av jordspyd beregnes den omtrentlige gjennomsnittlige resistiviteten vha. (3.4). En sammenligning mellom de to ligningene for jordspyd drevet ned til dybden $0,1a$ viser imidlertid at (3.3) gir mindre enn 2 % feil i forhold til (3.4).

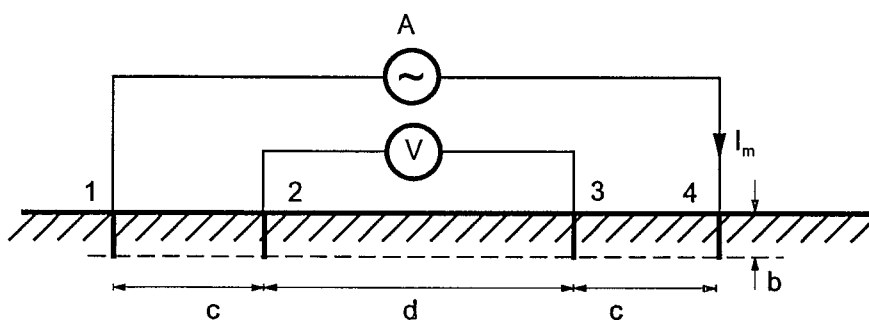
$$\rho \approx 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_j \quad [\Omega m] \quad (3.4)$$

hvor

- R_j beregnet motstand vha. (3.2) $[\Omega]$
- a avstand mellom elektrodene $[m]$
- h nedgravingsdybde for måleelektroder $[m]$

Det bør foretas målinger ved flere avstander mellom spydene. Dersom ρ varierer viser dette at resistiviteten ikke er konstant men varierer med dybden.

I figur V3.3 er det vist et prinsippskjema for Schlumberger-Palmers metode. Metoden er helt lik Wenners metode bortsett fra at avstandene mellom elektrodene ikke trenger å være innbyrdes like.



Figur V3.3 Schlumberger-Palmers metode brukt som underlag for beregning av jordresistivitet.

En tilnærming for verdien av den gjennomsnittlige resistiviteten i jordsmonnet basert på målinger med denne metoden kan beregnes vha. (3.5).

$$\rho = \frac{\pi c(c+d) R_j}{d} \quad [\Omega m] \quad (3.5)$$

hvor

- R_j beregnet motstand vha. (3.2) $[\Omega]$
- c avstand mellom elektroder som vist på figur V3.3 $[m]$
- d avstand mellom elektrodene for spenningsmåling $[m]$

I (3.5) er det forutsatt at nedgravingsdybden h er liten i forhold til avstandene c og d . Fordelen med Schlumberger-Palmers metode er at det fås større følsomhet i spenningsmålingen (større spenningsfall mellom elektrode 2 og 3) ved å velge avstanden $d > c$. Dette er gunstig dersom avstanden mellom elektrode 1 og 4 blir stor.

V3.2.5 Resistivitet dypt i jordsmonnet

Metodene beskrevet foran er upraktiske og til en viss grad uegnet for å bestemme resistiviteten langt ned i jordsmonnet (>100 m). For bestemmelse av ekvivalent resistivitet ned til store dybder (1-10 km) kan *induksjonsmetoden* benyttes.

Metoden tar som utgangspunkt at det er en teoretisk sammenheng mellom jordresistivitet og induserte spenninger i ledninger i luft eller på bakken ved strømgjennomgang i jordsmonnet. En jordfeilstrøm i høyspenningsnettet vil f.eks. indusere spenninger i parallellførte telekabler eller ledninger. Basert på målinger av slike induserte spenninger kan resistiviteten i jorden beregnes. Ved 50 Hz bør konstant jordfeilstrøm flyte over en strekning på minst 10 km for at de målte spenningene skal gi riktig ekvivalent resistivitet tilstrekkelig langt ned i jorden. Avstanden er avhengig av jordresistiviteten som typisk ligger i området 1.000-10.000 Ωm .

V3.2.6 Jordmodeller

De målemetodene som er beskrevet i kapitlene V3.2.2 og V3.2.4, og som forøvrig er godt egnet til å bestemme resistiviteten, gir ofte et resultat som varierer med dybder på eller avstander mellom elektrodene. Dette betyr at resistiviteten ikke er konstant men har forskjellig verdi i ulike skikt i jordsmonnet. I [2] er det gitt en noe forenklet omtale av forskjellige modeller for jordsmonn mens [3] gir mer detaljerte og teoretiske beskrivelser av forskjellige jordmodeller.

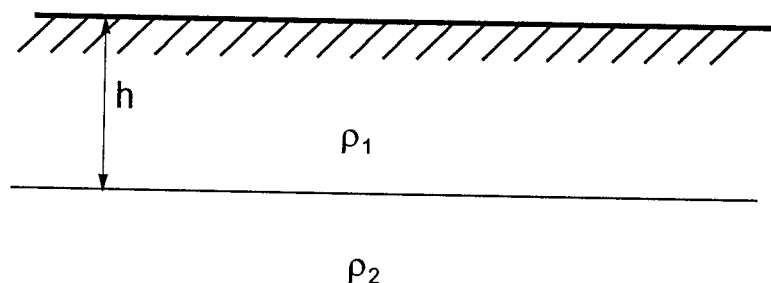
En måte å bestemme denne variasjonen i resistiviteten på er å benytte modeller for jordsmonnet som er tilpasset måleresultatene. Resultatene fra målinger antas videre å være gitt som resistivitet $\rho_m(a)$ som funksjon av avstand mellom elektrodene, a , i Wenners metode. Det finnes flere typer modeller med varierende kompleksitet. De to vanligste modellene er:

Tolagsmodellen

Eksponentsialmodellen

Tolagsmodellen

Jordsmonnet deles opp i to skikt. Det øverste skiktet har tykkelse h og resistivitet ρ_1 mens det nederste skiktet har resistivitet ρ_2 som vist på figur V3.4.



Figur V3.4 Tolagsmodellen brukt som underlag for å bestemme forandring i jordresistivitet med dybden.

Den tilsynelatende resistiviteten for jordsmonnet, som funksjon av avstanden mellom elektrodene, basert på en slik modell kan beregnes fra (3.6).

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2nh/a)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2nh/a)^2}} \right) \right] \quad [\Omega m] \quad (3.6)$$

med

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

hvor

- ρ_1 resistivitet i øverste skikt [Ωm]
- ρ_2 resistivitet i nederste skikt [Ωm]
- h tykkelse av øverste skikt [m]
- a avstand mellom elektroder i Wenners metode [m]
- K refleksjonskoeffisient

Det kan videre gjøres tilpasning mellom målt resistivitet $\rho_m(a)$ med Wenners metode og modellert resistivitet $\rho(a)$ fra (3.6) ved å variere ρ_1 , ρ_2 og h .

Ekspontensialmodellen

Denne modellen forutsetter at resistiviteten varierer kontinuerlig mellom resistiviteten ρ_1 i jordsmonnets øverste skikt og ρ_2 langt nede i jorden.

Den tilsynelatende resistiviteten basert på målinger fra Wenners metode kan i eksponetsialmodellen beregnes vha. (3.7).

$$\rho(a) = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)e^{-\lambda a}(2 - e^{-\lambda a}) \quad [\Omega m] \quad (3.7)$$

hvor

- ρ_1 resistivitet i øverste skikt [Ωm]
- ρ_2 resistivitet i nederste skikt [Ωm]
- a avstand mellom elektroder i Wenners metode [m]
- λ fri variabel

Det kan videre gjøres tilpasning mellom målt resistivitet $\rho_m(a)$ med Wenners metode og modellert resistivitet $\rho(a)$ fra (3.7) ved å variere ρ_1 , ρ_2 og λ .

V3.3 MÅLING AV JORDMOTSTAND

V3.3.1 Driftsfrekvens/lavfrekvens, små elektrodeanlegg

Med små elektrodeanlegg menes jordelektroder med liten geografisk utstrekning og som ikke er tilknyttet eksterne elektrodesystemer som f.eks. gjennomgående jordliner eller vannrør. For alle

metodene som er beskrevet i kapitlene V3.3.1 og V3.3.2 bør det påtrykkes vekselspanning (sinus eller firkant) med en frekvens i nærheten av 50 Hz. Selv for relativt små elektrodeanlegg kan imidlertid induerte 50 Hz strømmer påvirke måleresultatene. Disse strømmene bør filtreres fra målingene enten ved at de måles separat og trekkes fra (korrigering) eller ved bruk av filter i målekretsen (selektiv måling). Det er tre hovedteknikker/metoder som kan brukes for å unngå slike problemer:

- Synkronfrekvensmetoden
- Beatfrekvensmetoden
- Asynkronfrekvensmetoden

Metodene blir nærmere omtalt i kapittel V3.3.2.

Topunktsmetoden

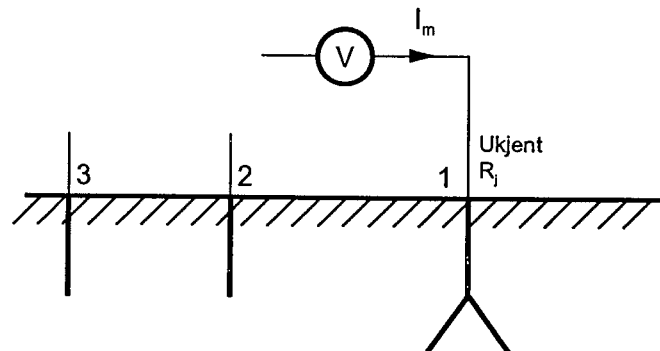
Metoden er tidligere beskrevet i forbindelse med måling av jordresistivitet i kapittel V3.2.3 og vist i figur V3.1. Metoden går ut å påtrykke en strøm mellom referansejord og den elektroden som ønskes målt. For å få tilfredsstillende verdier for den ukjente jordmotstanden forutsetter metoden at motstanden til referansejord er mye mindre enn jordmotstanden som skal måles.

Metoden er ikke særlig pålitelig og bør kun brukes dersom det er ønskelig med omtrentlige verdier for jordmotstanden. I enkle portable jordmålere benyttes det ofte DC-kilder og små stålelektroder. Apparatene kan kalibreres slik at de gir direkte avlesning av tilsynelatende jordmotstand.

Trepunktsmetoden

Metoden ligner på topunktsmetoden. Den benytter tre elektroder som vist på figur V3.5. I tillegg til jordelektroden 1 med den ukjente jordmotstanden R_j brukes to referanselektroder 2 og 3. Jordmotstanden til disse to elektrodene trenger ikke å være neglisjerbar i forhold til R_j , men innbyrdes bør de være av omtrent samme størrelse.

Strømkilden plasseres mellom to og to elektroder og spenningsfallet, U_m , mellom dem måles. Beregning av motstand mellom elektrodene gjøres vha. (3.1) inntil alle tre kombinasjoner av motstandsverdiene er bestemt.



Figur V3.5 Trepunktsmetoden brukt som underlag for måling av jordmotstand til en enkel jordelektrode.

Den ukjente jordmotstanden kan beregnes vha. (3.8). Alle tre motstandsverdiene er systematisk litt for lave dersom avstanden mellom elektrodene ikke er tilstrekkelig stor.

$$R_j = \frac{R_{12} - R_{23} + R_{13}}{2} \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

hvor

R_{12} Motstand beregnet mellom elektrode 1 og 2 $[\Omega]$

R_{23} Motstand beregnet mellom elektrode 2 og 3 $[\Omega]$

R_{13} Motstand beregnet mellom elektrode 1 og 3 $[\Omega]$

Vanlige jordmotstandsmålere basert på trepunktsmetoden viser R_j direkte som forholdet mellom den spenning som måles mellom elektrodene 1 og 2 og den strøm som påtrykkes mellom 1 og 3. Dette tilsvarer måling etter potensialfallmetoden som beskrevet nedenfor.

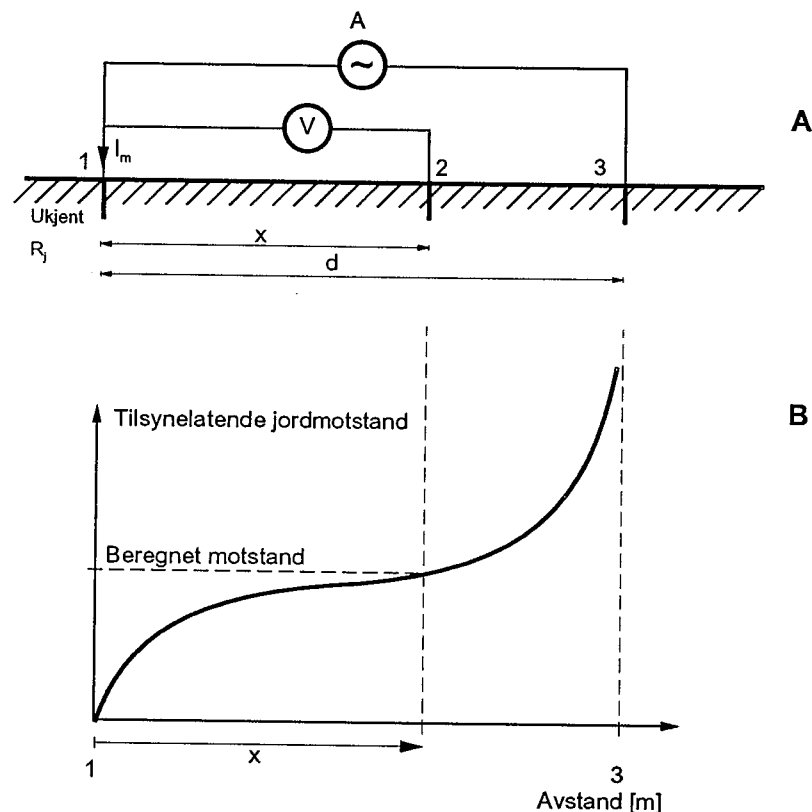
Potensialfallmetoden

Metoden er den mest benyttede av alle metodene i denne kategorien. Den gir som regel gode resultater og er særlig hensiktsmessig fordi den gir svar på om måleoppsettet er godt nok eller om andre plasseringer av referanseelektroder må vurderes.

Metoden, som forøvrig er skissert i figur V3.6 A, består i å påtrykke en strøm mellom jordelektroden 1, hvor jordmotstanden ønskes bestemt, og en referanseelektrode 3 (strømelektrode) med innbyrdes avstand d . Samtidig måles spenningen mellom jordelektrode 1 og referanseelektrode 2 med forskjellig innbyrdes avstand, x , (spenningselektroden). Dersom måleoppsettet er gjort riktig kan en tilsynelatende jordmotstand beregnes ut fra forholdet

mellom avlest spenningsfall og påtrykt strøm i hht. (3.1). Mer detaljert beskrivelse av metoden og hvilke krav og forutsetninger som stilles for å få best mulig resultater er angitt i [2].

Basert på slike målinger og beregninger etableres en grafisk sammenheng mellom tilsynelatende jordmotstand og avstanden x som vist i Figur V3.6 B. Figuren angir forøvrig en typisk spenningsprofil for elektroder i homogent jordsmonn. Den søkte jordmotstand settes lik verdien som avleses på den horisontale delen av spenningsprofilen før den stiger bratt oppover. Det bør brukes sinusformet veksel- eller firkantstrøm med frekvens i nærheten av nettfrekvens.



Figur V3.6 Potensialfallmetoden brukt som underlag for å bestemme motstanden til en jordelektrode.

Generelt bør avstanden d være så stor at elektrode 1 og 3 ikke påvirker hverandre. En teknikk for å bestemme riktige avstander kalles *62%-teknikken*. Denne går i korthet ut på følgende:

1. Velg en avstand d (større enn elektrodeanleggets utstrekning). Påtrykk strømmen I_m .
2. Velg avstand $x=0,62d$. Mål spenning U_{62} .
3. Velg avstand $x=0,52d$. Mål spenning U_{52} .
4. Velg avstand $x=0,72d$. Mål spenning U_{72} .
5. Dersom det er stor forskjell i spenningsmålingene må avstanden d økes. Er det liten forskjell mellom spenningsverdiene kan jordmotstanden beregnes vha. (3.9).

V3.3.2 Driftsfrekvens, store elektrodeanlegg

$$R_j = \frac{U_{62}}{I_m} \quad [\Omega] \quad (3.9)$$

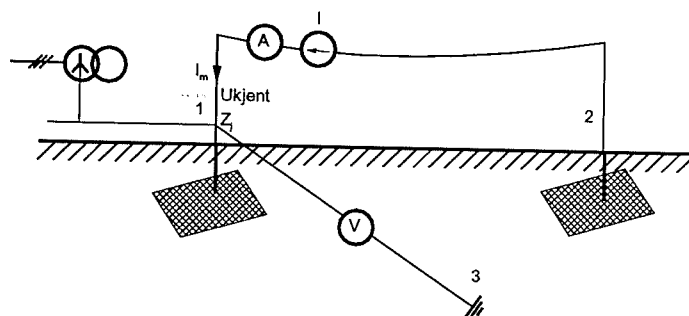
Det kan være problematisk å foreta målinger på store elektrodeanlegg først og fremst av tre grunner:

- * De har lav jordmotstand. Dette stiller store krav til utførelsen av målingene.
- * Det må tas hensyn til det induktive leddet i jordmotstanden. Selv om begrepet *jordmotstand* som oftest blir brukt, er det normalt snakk om en *jordimpedans*.
- * Den store utstrekningen på anleggene gjør at resultatet blir påvirket av induktanser i og induserte spenninger mellom tilledninger fra fjern jord.

De mest typiske store elektrodeanlegg finnes i kraft- og transformatorstasjoner og i anlegg tilknyttet gjennomgående jordline.

Til måling av jordmotstand i store elektrodeanlegg brukes en form for potensialfallmetoden som kalles strøminjeksjonsmetoden. Den er illustrert på figur V3.7. Metoden går ut på å påtrykke en strøm, I_m , mellom elektrodeanlegget hvor motstanden ønskes bestemt og fjern jord. Fjern jord bør i praksis være en kraft- eller transformatorstasjon. Spenningsøkningen, U_m , i vedkommende elektrodeanlegg måles og jordmotstanden beregnes vha. (3.10).

$$Z_j = \frac{U_m}{I_m} \quad [\Omega] \quad (3.10)$$



Figur V3.7 Strøminjeksjonsmetoden brukt som underlag for måling av jordmotstand til store elektrodeanlegg.

I figur V3.7 representerer elektrode 1 anlegget hvor jordmotstanden skal bestemmes. Elektrode 2 er fjern jord, f.eks. en nabostasjon i tilstrekkelig stor avstand fra 1. Elektrode 3 er referanseelektrode for spenningsmålingen. Denne bør ligge i god avstand fra både 1 og 2 og være omtrent vinkelrett på forbindelsen fra 1 til 2. Tilledningen til referanseelektroden bør ikke gå parallelt med andre kraftledninger med jordline og jordelektroder.

Målingene kan påvirkes av induerte spenninger i måleledningene for 1-3 og ukjente strømmen som flyter i elektrodeanlegget. Det er tre hovedteknikker som kan brukes for å redusere disse problemene:

Synkronfrekvensmetoden

Først foretas målinger uten påtrykt strøm I_m . Strømmen til elektrodeanlegget, I_i , og spenningen, U_i , måles. Mateutstyret for I_m bør være tilkoblet eller representeres med en ekvivalent impedans slik at de induerte strømmene blir de samme som under den endelige målingen av jordmotstanden.

Deretter måles strøm og spenning i kretsen med påtrykk av vekselstrøm I_m med nettfrekvens. Strømmens amplitude bør være i størrelsesorden 50 A, men ikke så stor at uakseptable berøringsspenninger oppstår. Strøm og spenning i kretsen registreres for begge polariteter.

Positiv polaritet:	U_p og I_p for hhv. spennings- og strømmåling.
Negativ polaritet:	U_n og I_n for hhv. spennings- og strømmåling.

Ekvivalent jordstrøm, I_m' , beregnes ut fra (3.11).

$$I_m' = \sqrt{\frac{I_p^2 + I_n^2}{2} - I_i^2} \quad [A] \quad (3.11)$$

Ekvivalent jordspenning, U_m' , beregnes ut fra (3.12).

$$U_m' = \sqrt{\frac{U_p^2 + U_n^2}{2} - U_i^2} \quad [V] \quad (3.12)$$

Jordmotstanden beregnes som forholdet mellom U_m' og I_m' og tilsvarende (3.10).

Beatfrekvensmetoden

Først foretas målinger uten påtrykt strøm I_m . Strømmen til elektrodeanlegget, I_i , og spenningen, U_i , måles.

Deretter måles strøm og spenning i kretsen ved påtrykk av en vekselstrøm I_m med nettfrekvens $\pm 0,1-0,5$ Hz. Strømmens amplitude bør være i størrelsesorden 50 A, men ikke så stor at uakseptable berøringsspenninger oppstår. Det lille frekvensavviket mellom påtrykt strøm og nettfrekvensen gjør at avlest spenning og strøm får bestemte maksimums- og minimumspunkter. Disse betegnes h.h.v U_{\max} , U_{\min} , I_{\max} og I_{\min} .

$$\begin{aligned} \text{Ekvivalent strøm blir} \quad I_m' &= \frac{1}{2} \cdot (I_{\max} + I_{\min}) & \text{for } I_m' > I_i \\ I_m' &= \frac{1}{2} \cdot (I_{\max} - I_{\min}) & \text{for } I_m' < I_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ekvivalent spenning blir} \quad U_m' &= \frac{1}{2} \cdot (U_{\max} + U_{\min}) & \text{for } U_m' > U_i \\ U_m' &= \frac{1}{2} \cdot (U_{\max} - U_{\min}) & \text{for } U_m' < U_i \end{aligned}$$

Jordmotstanden beregnes som forholdet mellom U_m' og I_m' og tilsvarende (3.10).

Injeksjonsstrøm med asynkron frekvens

Det påtrykkes en strøm I_m med minst 5 Hz i forskjell fra nettfrekvensen. Mer enn 10 Hz i forskjell vil gi unøyaktig resultat spesielt med elektrodeanlegg tilknyttet kabelanlegg eller jordlinjer på kraftledninger.

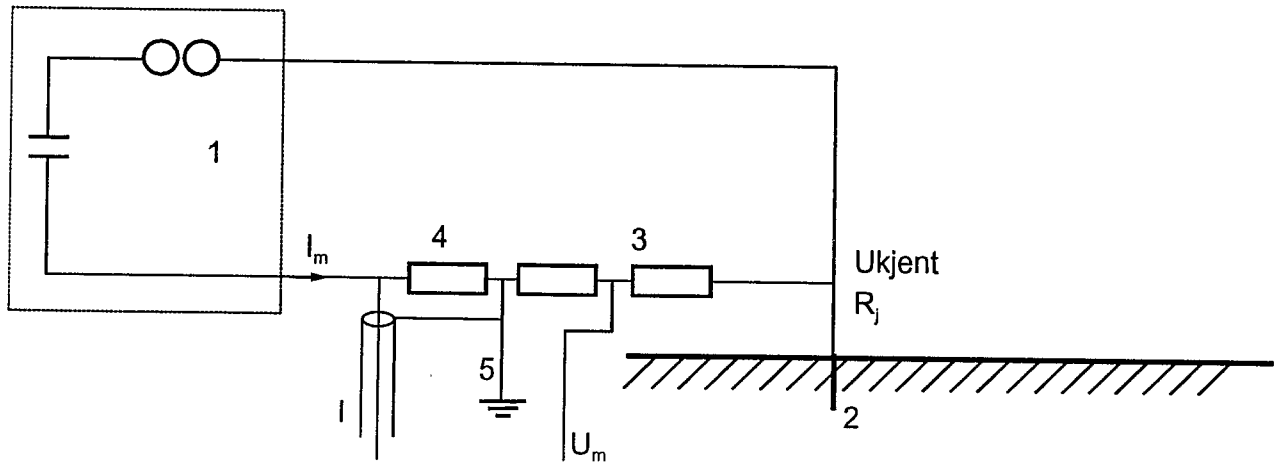
Strøm og spenning måles. Etter at nettfrekvenskomponenten i strøm- og spenningsmålingene blir filteret framkommer I_m' og U_m' .

Jordmotstanden beregnes som forholdet mellom U_m' og I_m' og tilsvarende (3.10).

V3.3.3 Impulsmotstand

Impulsmotstanden defineres som jordimpedans eller jordmotstand ved påtrykk av høye impulsstrømmer. Størrelsen på strømmen er viktig dersom spenningstigning pga. lynnedslag i et elektrodeanlegg skal beregnes. Jordmotstanden er avhengig av både strømmens størrelse og form. Dette gjør at måling av impulsmotstand må foretas med strømmer som har form og toppverdier som er sammenlignbare med virkelige verdier på lynstrømmer. Disse har typiske toppverdier i området 10-100 kA. Det er gitt en mer utførlig beskrivelse av impulsmotstand i kapittel V2.4 i vedleggsrapport 2.

Måling av impulsmotstand baserer seg på bruk av topunktsmetoden. Dette krever referansejord med svært liten jordmotstand eller at det bare kan måles på elektroder som representerer vesentlig større motstand (impulsmotstand) enn referanseelektroden. Et typisk prøveoppsett er vist i figur V3.8.



- | | | | |
|---|--|----------------------|------------------------------------|
| 1 | Støtspenningsgenerator. | Typiske kurveformer: | 8/20 μ s og 4/10 μ s støt. |
| | | Typiske strømmer: | 10-100 kA. |
| 2 | Elektrodeanlegg med impulsmotstand R_j som skal bestemmes. | | |
| 3 | Spenningsdeler. | | |
| 4 | Strømshunt eller støtstrømtransformator. | | |
| 5 | Referansejord $R \ll R_j$. | | |

Figur V3.8 Prøveoppsett for måling av impulsmotstand til jordelektroder basert på topunktsmetoden.

Strøm, I_m , og spenning, U_m , måles i forhold til referansejord som funksjon av tid. Impulsmotstanden beregnes vha. (3.13).

$$R_j = \frac{U_t}{I_t} \quad [\Omega] \quad (3.13)$$

hvor

- | | |
|-------|--------------------------------------|
| U_t | toppverdi av målt spenning U_m [V] |
| I_t | toppverdi av målt strøm I_m [A] |

Impulsmotstanden vil variere avhengig av strømmens steilhet og toppverdi. Det må derfor foretas mange målinger med ulike kurveformer og amplitudeverdier for å bestemme omtrentlige verdier for impulsmotstanden.

Problemet med et slikt måleoppsett er at det krever referansejord med svært liten jordmotstand (impulsmotstand). Det er vanskelig å unngå kobling mellom måleledninger og elektroder ved bruk av f.eks. potensialfallmetoden som alternativ til topunktsmetoden.

V3.4 MÅLING AV SKRITT- OG BERØRINGSSPENNINGER

Vanligvis er det tilstrekkelig å måle kun berøringsspenninger. Dette gjøres ved å påtrykke en strøm mellom fjern jord og elektrodeanlegget og samtidig å måle spenningsforskjeller innenfor det aktuelle anlegget. Skritt- og berøringsspenninger vil være proporsjonale med strømmen som flyter til jord. Forøvrig henvises det til [2] som inneholder en rekke figurer og beregninger for skritt- og berøringsspenninger.

Maksimal berøringsspenning som må ligge innenfor tillatte grenser, kan beregnes vha (3.14).

$$U_{bmaks} = U_b \frac{I_{maks}}{I_m} \quad [V] \quad (3.14)$$

hvor

- I_m påtrykt strøm ved måling [A]
- U_b målte spenningsforskjeller innenfor området til elektrodeanlegget [V]
- I_{maks} maksimal jordstrøm ved feil i anlegget [A]

For store elektrodeanlegg må slike målinger utføres samtidig med strøminjisering til nabostasjoner. For små anlegg kan det anvendes jordmotstandsmåler.

V3.5 METODER FOR Å LØSE PRAKTISKE MÅLEPROBLEM

I kapittel V3.1 er det listet opp noen problemområder og vanskeligheter forbundet ved måling av jordresistivitet og jordmotstand. Mulige løsninger på de problem som ble beskrevet blir omtalt i delkapitlene under kapittel V3.5.

Likestrøm anbefales ikke brukt til måling av lavfrekvensmotstand, f.eks ved driftsfrekvens, pga. polarisasjonsspenningen. Brukbare resultat kan oppnås med skifting av polaritet.

Strøm og frekvensavhengighet er normalt bare av interesse for impulsjording. Motstanden ved lav frekvens blir korrekt med de metoder som er beskrevet og gir de maksimale 50 Hz jordpotensial som er aktuelle.

V3.5.1 Plassering av referanseelektroder ved jordmotstandsmåling

I tettbebygde områder med mange rørledninger og kabler nedgravd i jorden kan det være vanskelig både å oppnå tilstrekkelig stor avstand mellom elektrodene og å finne brukbar plassering for referanseelektrodene. Det er normalt behov for å ha tilstrekkelig avstand fra andre ledere i jorden for å redusere virkningen fra slike elektroder på jordpotensialet. I realiteten er det på forhånd umulig å vite hvordan en noenlunde pålitelig måling kan utføres.

Dersom det kan skaffes kart over rørledninger og kabler i området, er dette et godt utgangspunkt for valg av elektrodeplassering. Det er ikke godt nok dersom brukbart fritt måleområde er for lite.

Både materiale og dimensjoner for referanselektroden er normalt av svært liten betydning når det anvendes moderne elektroniske jordmålere. Men det stilles krav til maksimal jordmotstand for strømelektroden (instrumentspesifikasjon) for måling av lave jordmotstander. Det er da aktuelt å bruke flere jordspyd. For potensialelektroden fås som regel riktig resultat selv med opptil 10-talls $k\Omega$ motstandsverdier (instrumentspesifikasjon).

Et annet problem er at det bare kan angis minimumsavstander for et område med homogent jordsmonn. Men teoretisk sett trengs det ikke særlig stor avstand ved homogene forhold da avstandsfeilen korrigeres automatisk ved å sette potensialelektroden mellom måleobjektet og strømelektroden i avstand 62% fra måleobjektet (dvs. 38% fra strømelektroden, se figur V3.6). Denne korrigeringen er meget god dersom utstrekningen av måleobjektet (a) i retning mot strømelektroden er mindre enn halvparten av middellavstanden (d) fra strømelektroden til måleobjektet ($a < 0,5d$).

Under forutsetning av at målt motstand mot potensialelektrode i fjern jord eller ved nullpotensialet midt mellom måleobjektet og strømelektroden skal være mindre enn 5% for lavt, angir Tabell V3.1 minimumsavstander avhengig av dimensjoner på forskjellige elektrodetyper.

Tabell V3.1 Minimumsavstander mellom strømelektroden, d, ved bruk av potensialfall-metoden for måling av jordmotstand med forutsetninger gitt i avsnittet ovenfor.

Måleobjekt	Jordspyd 3/4" diameter $l=2 - 20$ m	Horisontal elektrode $h = 0,3 - 0,5$ m $l = 5 - 50$ m	Maskenett 2-8 masker i hver retning
Minimumsavstand (d)	$(2,5 \text{ til } 3,5) \times l$	$(1,5 \text{ til } 3)^{1)} \times l$	$(5,5 \text{ til } 6,5) \times s$
Anbefalt avstand (d)	$5 \times l$	$(3 - 5) \times l$	10 s

hvor

- l lengde av jordspyd eller horisontal elektrode [m]
- s sidekant i kvadratisk maskenett med areal tilsvarende det som skal måles [m]
- h nedgravingsdybde [m]

- 1) Horisontal elektrode plassert i retning mot strømelektroden.
- 2) Minste verdi: Horisontal elektrode plassert vinkelrett på retning mot strømelektroden.
Største verdi: Horisontal elektrode plassert i retning mot strømelektroden.

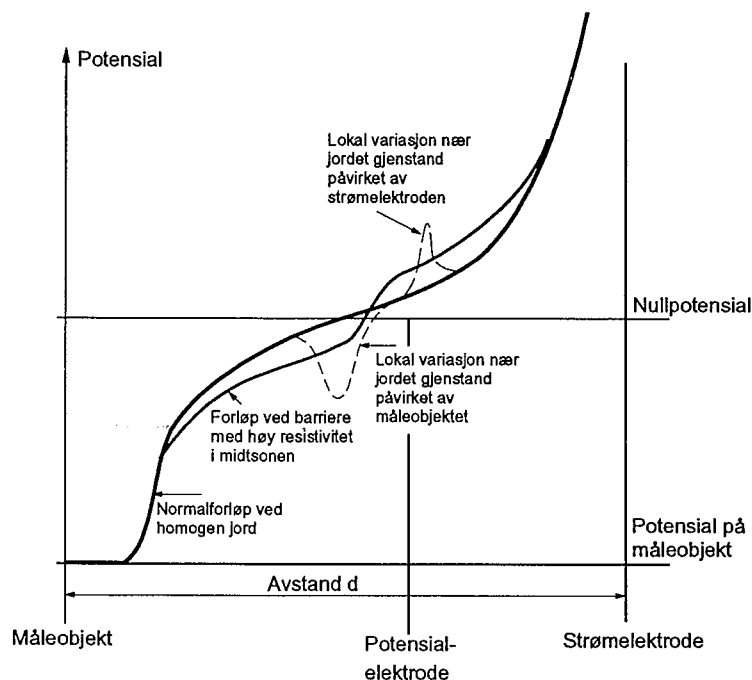
Målefeilen med potensialelektrode plassert ved $0,62d$ vil være ubetydelig når det er homogene jordforhold. Forøvrig henvises det til delkapittel V3.5.2 som behandler teoretisk og praktisk avstand mellom måleobjekt og referanselektroder ved bruk av potensialfallmetoden.

Relativt størst avstand mellom strømelektrodene kreves for de korteste elektrodelengder og de maskenett som har flest masker. Dette betyr at de laveste jordmotstander i forhold til måleobjektets utstrekning krever størst avstand for måling. Dersom en regner med total lengde for flere stenger eller markline vil derfor avstandskravet være enda bedre oppfylt.

Beregnet minimum avstand er dessverre ofte ikke tilstrekkelig ved inhomogen jord eller ledende gjenstander i jorden. Ved måling med jordspyd kan f.eks. beregnet avstand bli for liten dersom resistiviteten avtar med dybden. Dette betyr at jordmotstanden er lavere enn det som tilsvarer resistiviteten ved jordoverflaten.

For å kontrollere om uregelmessigheter kan skyldes ledende gjenstander i jorden er det en mulighet å flytte potensialelektroden på tvers av linjen mellom måleobjektet og strømelektroden. I enkelte tilfeller kan det også være nødvendig å flytte på strømelektroden for å se om den har urimelig stor påvirkning på resultatet.

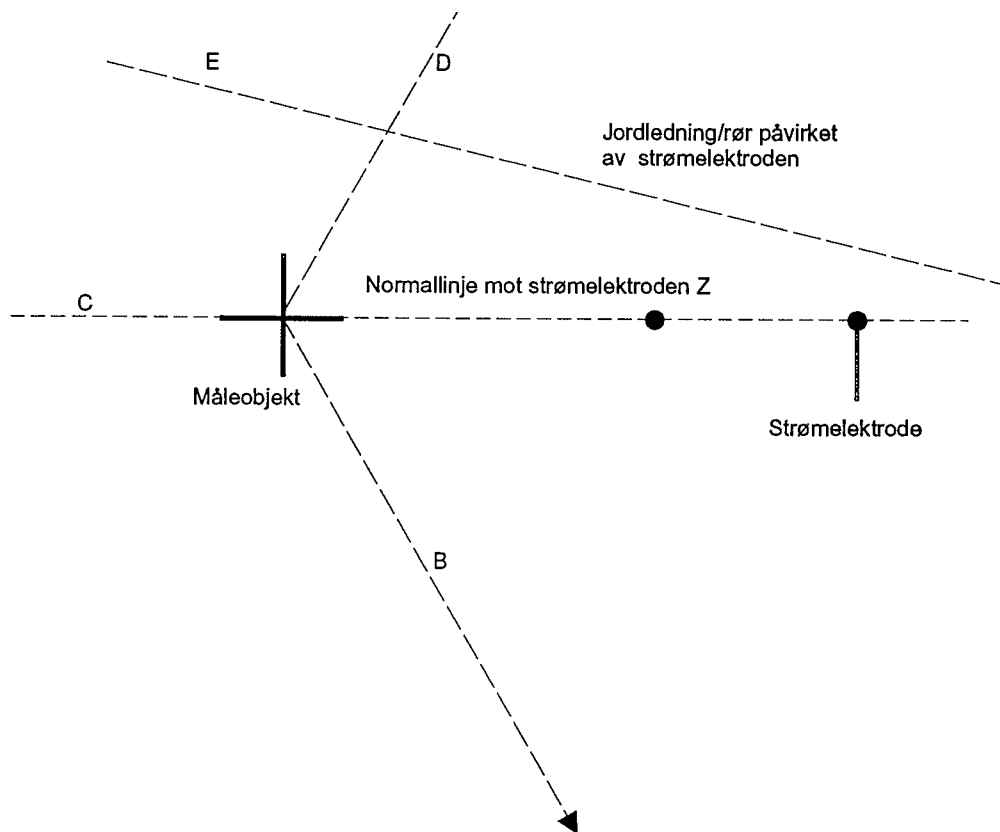
Ved store uregelmessigheter kan det være nødvendig å måle en fullstendig potensialprofil, som vist i figur V3.9, mellom måleobjektet og strømelektroden for å kunne gjøre en vurdering av resultater.



Figur V3.9 Profil av jordpotensial, målt med potensialfallmetoden, mellom måleobjekt og strømelektrode. Anbefalt plassering av potensialelektroden er angitt.

Ved såkalt "blomsterpottjording" i bra ledende jord omgitt av bergformasjoner vil det måles alt for lav motstand dersom alle elektrodene settes inne i potten. Referanseelektrodene bør settes utenfor og langt fra hverandre, eventuelt i hver sin potte.

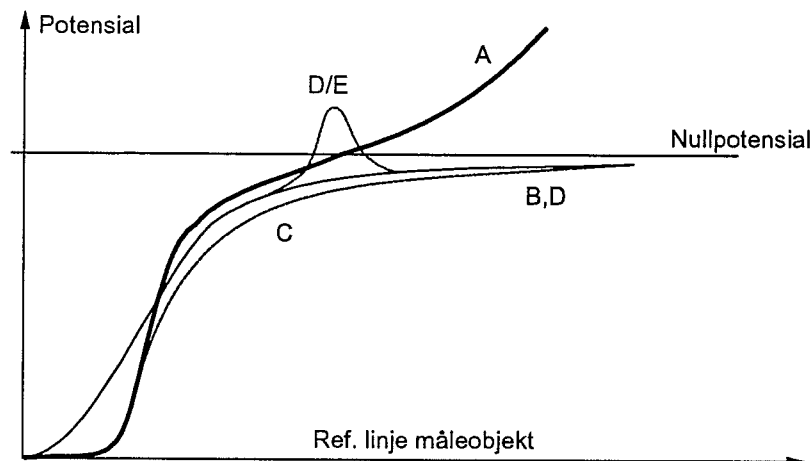
Dersom måleresultatet synes å være merkelig, finnes det også andre måter å måle på for å oppnå brukbare resultater og for å kontrollere størrelsesorden av mulige feil. En metode kan være å plassere potensialelektroden i flere retninger ut fra måleobjektet slik at de tre elektrodene utgjør hjørner i en omtrentlig likesidet trekant som vist i figur V3.10. Måling av profiler langs flere retninger er også aktuelt.



- A: Normallinje mot strømelektroden.
 B, C og D: Andre aktuelle retninger.
 E: Jordledning/rør som påvirkes av strømelektroden.

Figur V3.10 Aktuelle linjer/traseer i retning ut fra måleobjektet for måling av potensialprofiler vha. potensialfallmetoden.

Normalt fås noe lavere verdier ved måling på tvers og spesielt i motsatt retning. Den teoretiske forskjellen er liten i forhold til det som kan skyldes inhomogene forhold. Dersom flere forskjellige retninger/profiler går mot samme motstandsverdi vil dette være en rimelig verdi selv om den normalt kan være litt for lav. Eksempler på slike profiler er vist i figur V3.11.



Figur V3.11 Potensialprofiler for måletraseer vist i figur V3.10.

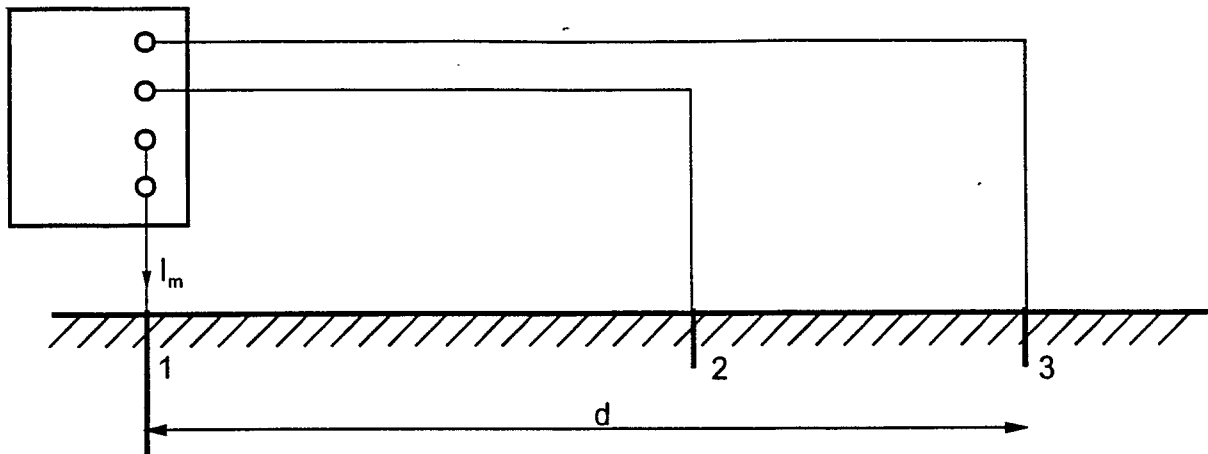
For måling av lave jordmotstander anbefales potensialledningen plassert på tvers for å redusere induisert spenning fra strømledningen.

En annen metode som egner seg for måling på små elektroder er topunktsmetoden. Den egner seg spesielt godt i områder hvor det ligger eller er tilkøplingsmulighet til større elektrodeanlegg med neglisjerbar jordmotstand i forhold til måleobjektet. Ved denne metoden kan det oppstå både feilmåling (interferens) og berøringsfare pga. jordpotensial på det store elektrodeanlegget. Interferens kan normalt unngås ved å måle enkeltelektroder med to referanseelektroder. Det må alltid vurderes å iverksette sikkerhetstiltak ved frakopling og tilkopling.

Berøringsspenninger ved små elektroder kan måles som en resistans R_B ved å plassere potensialelektroden på utsatte punkter nær den elektroden som er måleobjekt. For å finne aktuell berøringsspenning, $U_B = R_B \cdot I_B$, må den strøm I_B som vil flyte til jord via elektroden under feil beregnes. Skrittspenninger kan finnes på tilsvarende måte med et instrument med 4 terminaler der skrittspenningen måles med de 2 potensialterminalene. Forøvrig henvises til måling av større elektrodesystem i kapitlene V3.3.2 V3.5.3.

V3.5.2 Teoretisk og praktisk avstand mellom måleobjekt og referanseelektroder

Motstand mot fjern jord fra måleobjektet (1) i figur V3.12 kan teoretisk finnes ved å måle potensialet på (1) i forhold til spenningselektroden (2) i en avstand på $0,62d$ fra (1). Dette kompenserer for reduksjonen i potensialet pga. strømmen i strømelektrode (3).



Figur V3.12 Prinsipielt måleoppsett for måling av jordmotstand vha. potensialfallmetoden.

Jordmotstanden til (1) er gitt av (3.15) og er uavhengig av nøyaktig posisjon når både (2) og (3) ligger langt borte.

$$R_j = \frac{U_2}{I_m} \quad [\Omega] \quad (3.15)$$

hvor

U_2 Spenning mellom elektrodene 1 og 2 [V]

I_m Strøm som mates inn i jorden [A]

Ved kortere avstander vil det imidlertid måles en motstand R_j' gitt av (3.16) dersom (2) står på null potensial, dvs. langt borte eller midt mellom (1) og (3) ved homogen jord.

$$R_j' = R_j - \frac{\rho}{2\pi d} \quad [\Omega] \quad (3.16)$$

hvor

R_j Jordmotstand beregnet vha. (3.15) [Ω]

d Avstand mellom strømelektrodene [m]

ρ Jordresistivitet [Ωm]

I den anbefalte avstanden $0,62d$ for (2) vil målt U_2 teoretisk øke med $\rho I / 2\pi d$ slik at målt motstand blir lik R_j under forutsetning av homogen jord.

Dersom elektroden (1) gjøres større, blir R_j mindre, og den relative målefeil pga. (3) blir større. Den ideelle avstanden til (2) endres lite så lenge det geometriske middelpunkt for (1) ikke

endres. Dette gjelder f.eks. når (1) er et symmetrisk system av jordspyd, horisontale jordledere ("kråkeføtter") eller maskenett med diameter $< 0,5d$.

Dersom avstanden d er relativt liten, kan det likevel oppstå betydelige målefeil pga. inhomogen jord fordi den ideelle plassering av (2) ikke lenger er gyldig.

Ved inhomogene forhold er det umulig å angi korrekte avstander og plassering for å oppnå en bestemt målenøyaktighet. Den minste aktuelle avstand til den strømførende referanselektroden (3) kan imidlertid angis for homogene forhold dersom det f.eks. kreves at tilbakevirkningen fra (3) til (1) skal være mindre enn 5% ($0,05R_j$). Dette betyr at $\rho/2\pi d < 0,05R_j$. Ved ideell plassering av (2) må det under normale forhold forventes et rimelig nøyaktig resultat. Men det bør alltid foretas målinger med flere posisjoner av (2) for å unngå feil pga. inhomogen jord eller ledende gjenstander nedgravd i jorden.

Basert på målinger med potensialfallmetoden kan minimumsavstander mellom strømelektroden, d , for forskjellige elektrodetyper beregnes ved hjelp av forenklede formler for R_j :

Enkelt jordspyd:	$R_j = \text{ca } 0,9 \text{ til } 1,3 \text{ ganger } \rho/l \text{ for spydlengde } l = 2\text{-}20 \text{ m.}$
Enkel markline:	$R_j = \text{ca } 1 \text{ til } 2 \text{ ganger } \rho/l \text{ for lengde } l = 5\text{-}50 \text{ m på } 0,3\text{-}0,5 \text{ m dybde.}$
Regulært kvadratisk jordnett:	$R_j = \text{ca } 0,5\text{-}0,6 \text{ ganger } \rho/s \text{ der } s \text{ er lengde av sidekant (antall parallelle ledere i hver retning fra } 3 \text{ til } 9).$

Basert på maksimalt 5% tilbakevirkning fra strømelektroden og homogene jordingsforhold fås da følgende minimumsavstander som også framgår av Tabell V3.1:

Jordspyd (2-20 m) :	$d = 2,5 - 3,5 \text{ ganger } l$
Markline (5-50 m) :	$d = 1,5 - 3 \text{ ganger } l$
Jordnett (4-64 masker):	$d = 6,4 \text{ ganger sidekant } s. \text{ For nett med rektangelform (sider } a \text{ og } b), s = \sqrt{ab}.$

V3.5.3 Måling av jordmotstand for større elektrodesystem

Dette kan typisk være elektrodeanlegg i stasjoner med tilknytning til jordliner på kraftledninger og/eller jordliner i kabelgrøfter, eventuelt måling av mastejordinger med gjennomgående jordline.

Slike målinger anbefales utført etter potensialfallmetoden med 10-50 A strømpåtrykk, 50-60 Hz, mellom elektrodeanlegget og en annen stasjon eller kraftledningsmast. Avstanden mellom disse jordingspunktene bør være 10-20 km eller mer avhengig av type gjennomgående jordline. For

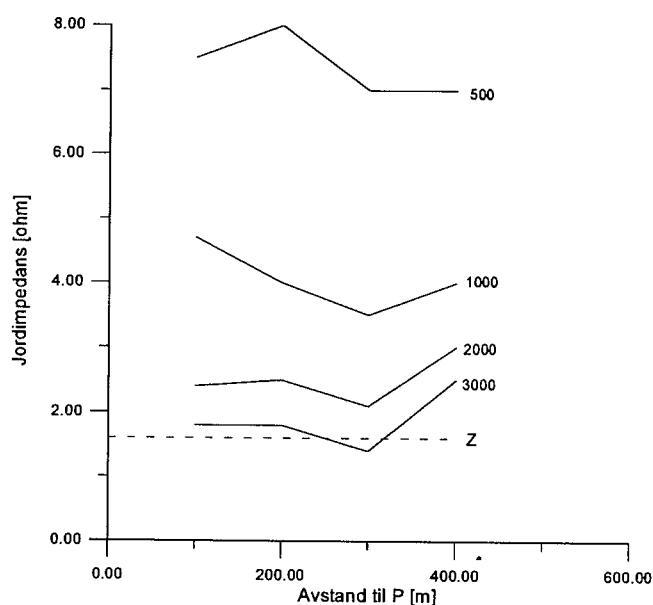
ledninger uten jordline bør avstanden være minst 1,5 ganger ekvivalent inntrengningsdybde som tilsvarer ca 15 km for jordresistivitet $\rho=10.000 \Omega\text{m}$ og ca 5 km for $\rho=5.000 \Omega\text{m}$.

Med jordline(r) bør jordlineimpedansen være minst 10 ganger så høy som summen av jordmotstandene i de to endene. For 2xFeAl nr.60 gir dette $l(\text{km}) \geq 14 \sum R_j$. Dette tilsvarer 28 km for $\sum R_j = 2 \Omega$.

Ved måling av jordmotstand i stasjoner bør det måles mot jordspyd (potensialelektrode) langs vei eller annen fremkommelig trasé hvor det ikke går kraftledning med jordline og jord-elektroder. Målinger bør gjøres ut til en avstand på ca 1 km fra stasjonen (fjern jord). Muligheten for å måle mot elektrodeanlegg til f.eks. lokale fordelingsanlegg, jernbaneskinner og telesentraler som har tilknytning til fjern jord bør også utnyttes dersom slike anlegg er tilgjengelige. Dersom slike punkt ligger klart innenfor stasjonens potensialområde bør også utsatte punkt sjekkes for berøringsspenninger mot jord pga. jordpotensialet. Potensialet i forhold til telesentraler kan også måles fra stasjonen eller sentralen i samarbeid med Televerket som ofte også er interessert i å måle indusert spenning i telelinjer.

Berørings- og eventuelt skrittspenningen bør også måles på utsatte punkter i anlegget og omkring gjerdet ved stasjonen. Skrittspenning er særlig aktuelt ved enden av markliner. Ved måling av skritt- og berøringsspenninger bør det brukes standard plateelektroder på 200 cm^2 pr. fotsåle og med en belastningsmotstand på $3 \text{ k}\Omega$ over måleinstrumentets inngang. Denne motstanden skal simulere kroppens motstand.

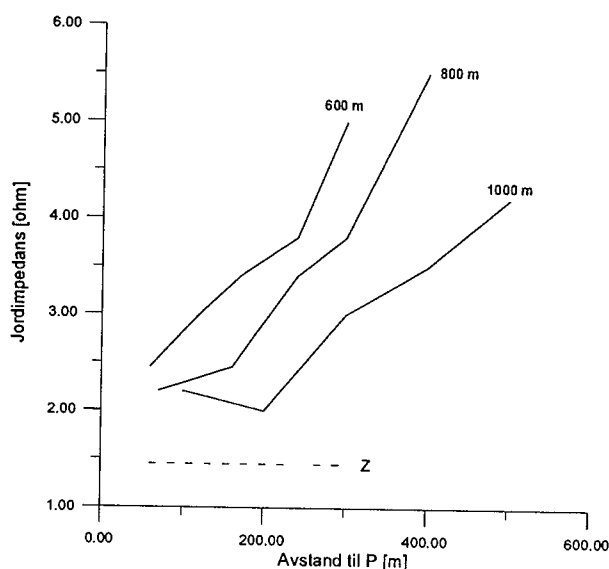
Teoretisk sett kan mastejording med gjennomgående jordline måles med jordmåler og referanse-elektroder dersom jordlinen(e) har relativ høy resistans. Ved lav resistans blir utbredelsen av målestrømmen så stor at nødvendig avstand til strømelektroden blir 1-3 km. Med mindre avstander måles det normalt for høy verdi fordi strøm til jord i nærmeste mast kan være av størrelsesorden bare 5-10 % av total strøm. Potensialelektroden kan derfor lett bli plassert for nært strømelektroden. For å unngå dette må strøm- og potensialelektroder settes på hver sin side av kraftledningen slik at avstanden mellom dem blir så stor som mulig. I figur V3.13 er det vist beregningseksempler for topplineimpedans basert på slike målinger utført på 300 kV linjer.



Figur V3.13 Målinger av jordimpedans for toppliner, 2xFeAl nr. 60, som funksjon av avstand fra mast til potensialelektrode, og med avstand fra mast til strømelektrode som parameter. Fjellterreng.

Strøm- og potensialelektrode plassert på hver sin side av kraftledningen. Midlere jordmotstand for master 38 Ω . Beregnet jordimpedans for topplinene Z_j er 1,6 Ω .

Tidligere målinger utført med mer normale og korte avstander til referanseelektroden kunne gi forskjell mellom to nabomaster på opp til 10 Ω til tross for at motstanden gjennom jordlinen(e) var mindre enn 1 Ω . Målinger på en 300 kV ledning hvor potensialelektroden var plassert opp til 1 km fra strømelektroden, har vist at det fortsatt var store variasjoner i resultatet avhengig av hvor elektrodene for potensialmålingene ble satt dersom den ble plassert på samme side som strømelektroden. Måleverdiene ble svært mye for høye fordi potensialelektroden i alle tilfeller ble stående i felt dominert av strømelektroden. Se forøvrig figur V3.14.



Figur V3.14 Målinger av jordimpedans for toppliner, 2xFeAl nr. 60, som funksjon av avstand fra mast til potensialelektrode, og med avstand fra mast til strømelektrode som parameter. Strøm - og potensialelektrode plassert på samme side av kraftledningen. Midlere jordmotstand for de 10 nærmest mastene er 10 Ω . Beregnet jordimpedans for topplinen, Z_j , er 1,45 Ω .

Det er forøvrig ikke nødvendig å måle gjennomgående jordline da resulterende jordmotstand (impedans) relativt enkelt kan beregnes fra de enkelte mastemotstandene og impedansen for jordlinen(e).

V3.5.4 Dårlige kontakter i elektrodeanlegget

De fleste jordmålere har så lav målespenning at dårlige kontakter kan gi en vesentlig høyere motstand enn det som fås ved normale feilstrømmer i et anlegg. Dette kan også gjelde ved målinger med potensialfallmetoden (10 A), men spesielt i forbindelse med bevegelige oppheng for jordline. Sammenkoplinger i jord (press eller sveis) skal normalt gi god kontakt ved lav spenning.

Ved provisorisk sammenkopling av flere enkeltelektroder ved f.eks. mast, må det sørges for god kontakt før måling. Felles tilkopplingsledning til måleinstrumenter er også en del av den målte motstanden. Dette kan være av betydning hvis det måles ekstra lave motstandsverdier, men

unngås normalt ved å bruke solid og kort ledning. Ved instrument med 4 terminaler kan potensialet også måles direkte på måleobjektet.

V3.5.5 Valg av jordmålere

De viktigste krav til måleinstrumentet er:

- * Tilstrekkelig stor målestrøm i forhold til måleområdene. (Samtidig krav til strømelektrode.)
- * Best mulig immunitet mot fremmedspenninger. Dette oppnås delvis med høy målespenning, men helst med selektiv måling ved frekvens betydelig høyere enn 50/60 Hz. Dersom små jordmotstander f.eks. ved større anlegg ($< 1\Omega$) måles, bør målefrekvensen ikke være vesentlig over 100 Hz av hensyn til begrensning av induktive komponenter.

Disse forhold har betydning for pris og vekt på instrument.

V3.5.6 Måling av jordresistivitet

Ved måling av resistivitet kan det heller ikke unngås uregelmessige måleverdier pga. lokale variasjoner i jordsmonnet eller ledende gjenstander i jorden, ref. figur V3.9. En uregelmessig kurve for resistivitet som funksjon av elektrodeavstand er vanskelig å tolke og kan like gjerne skyldes varierende resistivitet langs overflaten som i dybden. Dersom resistiviteten for et område skal kartlegges, anbefales det derfor å måle langs mange linjer som ligger vinkelrett mot hverandre. På dette grunnlaget kan middelkurver for større eller mindre deler av området bestemmes.

Dersom dybdevariasjoner over små områder skal bestemmes, er dybdevariasjonsmetoden som beskrevet i kapittel V3.2.2 best å anvende med jordspyd som elektroder. Resistiviteten beregnes på grunnlag av resistansmålinger for forskjellige spydlengder.

Det kreves naturligvis et måleinstrument med 4 terminaler. dersom det skal måles over store områder er det selvsagt gunstig å ha et instrument som kan levere stor målestrøm. Men store avstander vil ofte gi store uregelmessigheter i kurvene.

V3.5.7 Måling av impulsmotstand

Som beskrevet i kapittel V3.3.3 krever måling av impulsmotstand stort og komplisert måleutstyr. Selv om topunksmetoden prinsipielt er enkel, er det normalt vanskelig å få tilgang

til en referanseelektrode med svært lav motstand. Dersom det likevel er tilgang til en slik elektrode, kan den korte avstanden føre til måling av for lav motstandsverdi.

Bruk av potensialfallmetoden synes å være mer komplisert dersom det er nødvendig med store målestrømmer.

Det henvises forøvrig til vedleggsrapport 2 hvor det er gitt en mer detaljert oversikt over hvilke forutsetninger som må gjøres ved analyse av impulsotstand. I praksis vil det normalt aldri bli snakk om å gjennomføre måling av impulsotstand for elektrodeanlegg i tilknytning til elkraftanlegg.

V3.6 REFERANSER

1. American National Standards Institute, ANSI/IEEE: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
New York: 1986. ANSI/IEEE Std. 80-1986.
2. American National Standards Institute, ANSI/IEEE: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System
New York: 1983. ANSI/IEEE Std. 81-1983.
3. Sunde, E: Earth Conduction Effects in Transmission Systems
New York: Dover Publication Inc. 1968.

APPENDIX 1

DEFINISJONER OG BEGREPER MED RELASJON TIL JORDING

Disse definisjoner og begreper er hentet fra EFIs tekniske rapport "Jordingsarrangement i elkraftanlegg", EFI TR A4185.

DEFINISJONER OG BEGREPER

De internasjonale definisjoner med relasjon til jording, som er gitt av IEC, finnes spredd over flere forskjellige publikasjoner, f.eks. IEC 60364 (121, 131, 151), IEC 60364 (601, 604) og IEC 60364 (826). Disse synes ikke å dekke alle de begreper som vi anvender. En del oversettelser til norsk finnes f.eks. i: Forskrifter for elektriske forsyningsanlegg, [1], Forskrifter for elektriske bygningsinstallasjoner, [2], Driftsforskrifter for elektriske forsyningsanlegg, [3], Jording av tekniske installasjoner i bygninger, [4], og Håndbok i lynvernanlegg for bygninger, [5].

En del IEC-definisjoner er ikke gode, og i en del pågående arbeid i CENELEC benyttes bl.a. modifiserte definisjoner i forhold til IEC. De definisjonene som anvendes her er bare delvis i overensstemmelse med IEC men angir den betydning vi legger i de enkelte begrep. Det er så langt som mulig også tatt med i parentes engelske ord for begrepet.

GRUNNLEGGENDE DEFINISJONER

Jord (earth)

Ledende masse i jordskorpen, dvs. forskjellige jordarter, sand, stein, berg, vann, hav. Forskjellig fra IEC 60364-04-01).

Fjern jord/sann jord/nøytral jord (remote earth/reference earth)

Jord som ligger utenfor potensialområdet rundt strømførende jordelektroder.

Jordelektrode (earth electrode)

Leder som er nedgravd/satt i jord eller innstøpt i betong i jord.

Jordforbindelser/jordleder/beskyttelsesleder (protective conductor PE)

Beskyttelsesleder for vern mot berøringsfare ved sammenkopling av forskjellige jordelektroder og jordsamleskinner samt tilkopling av utsatte og andre ledende anleggsdeler og eventuelt nøytralt punkt. IEC 60364-04-05).

Beskyttelsesleder

Særlig brukt om PE-leder i lavspenningskabel.

Jording

Omfatter metoder og tiltak for å forbinde anleggsdeler og apparater til jord.

Potensialutjevningsleder (bonding conductor)

En leder mellom to nærliggende ledende strukturer som fjerner mulig potensialforskjell mellom dem.

Utsatt ledende anleggsdel (exposed conductive part)

Ledende del som kan bli spenningssatt ved jordfeil i det elektriske anlegget.

Annen ledende del (extraneous conductive part)

Del som kan ha et annet elektrisk potensial i farlig nærhet til utsatt del/jordingsanlegg.

Jordingsanlegg/jordingssystem (earthing system)

Et begrenset anlegg/system av jordledere, elektroder og tilkoblede ledende strukturer (f.eks. stålarmering, stålkonstruksjoner, ledende kabelmantler og jordliner). Vil også omfatte deler av lynvernbygg og tilkoblede jordingsanlegg for tele- og kontrollsignal.

Jordliner

Tråd/wire langs kabelføringer eller på kraftledninger.

Toppline

Jordline plassert som lynoppfangere på kraftledninger.

Innføringsvern

Toppline/jordline ca 1-5 km ut fra en kraft-/transformatorstasjon.

Hovedjording

Hele jordingsanlegget bortsett fra tilkoplinger til utsatt og annen ledende del, lynvernbygg og spesielle tilkoplinger til tele- og kontrollanlegg (signaljord/instrumentjord/egensikker jord).

Lynvernbygg

Hele systemet som brukes til å verne et område mot virkningene av lynutladninger. Det kan bestå av både utvendige bygg og bygg innenfor bygninger.

I prinsipp dreier det seg om jording av overspenningsavledere for linjer/kabler og om jording av nedledere for vern av bygninger. Det handler naturligvis også om plassering, utforming og dimensjonering av vernet. Lynvern av bygning krever en egen separat tilknyttet jordelektrode.

Separat jording

Egne jordledere og eventuelt elektroder som er galvanisk tilknyttet større jordingsanlegg, f.eks. jording av tele- og kontrollanlegg eller lynvernbygg.

Adskilt jording

Egne jordelektroder for forskjellige bygg eller deler av bygg som er anordnet slik at jordingsanleggene ikke påvirker hverandre vesentlig via jord, f.eks. ved fordelingstransformatorer i mastearrangement.

Signalreferansejord

Spesielle isolerte jordledere som benyttes som referansejord for følsomme elektroniske apparater, ofte tilkople et sentralt punkt av PE-jord/hovedjord eller sentralt punkt av kontroll-/elektronikkutstyr.

TYPER AV ELEKTRODER**Horisontal elektrode (horizontal earth electrode)**

Nedgravd elektrode f.eks. wire, tråd eller bånd (normalt i 0,3-2 m dybde). Den kan være utformet som ring rundt fundament, radialer, kråkefot, maskenett eller kombinasjoner av disse.

Jordspyd (earth rod)

Elektrode av stang eller rørform som normalt drives ned til større dybder.

Jordkabel som elektrode (cable with earth electrode effect)

En kabel med ledende uisolert skjerm eller armering. Kan ha ytre korrosjonsvern med minst samme ledningsevne som omgivende jord.

Fundamentjord elektrode (foundation earth electrode)

Leder som er støpt inn i eller under betongfundament. Kan være armeringsjern eller koppertråd.

Potensialstyringselektrode (potential grading earth electrode)

Elektrode som er spesielt utformet for å endre forløp av overflatepotensial og redusere berøringspenning, (se Spenninger ved jordfeil).

VIKTIGE ELEKTRISKE PARAMETRE FOR JORD OG ELEKTRODER**Jordresistivitet (earth resistivity)**

Jordens spesifikke resistivitet omkring en elektrode, ρ , [Ωm].

Jordmotstand (resistance to earth)

Elektrodens resistans mot fjern/sann jord, R_j , [Ω], dvs. forholdet mellom potensialet på elektroden og den strøm den leder til jord. Ren resistans fås bare for relativt små elektroder eller likestrøm.

Impedans til jord (impedance to earth)

Driftsfrekvent impedans mellom et jordingsanlegg eller deler av dette og fjern jord.

Langs impedans for jordline

Driftsfrekvent impedans med jord som retur, [Ω/km].

Avledningsmotstand for jordline

Driftsfrekvent jordmotstand pr. lengdeenhet [Ωkm].

Overføringsimpedans (transfer impedance)

Generelt uttrykk for forholdet mellom spenning som oppstår i en leder/sløyfe/krets som følge av strøm i en annen. Det kan være galvanisk og/eller induktiv kopling mellom sløyfer der jord er returvei for strøm.

Permittivitet

Forholdet mellom elektrisk flukstetthet og feltstyrke, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, hvor $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$, ϵ_r har normalt verdier i området ca 5-20.

Impulsmotstand

Forholdet mellom toppverdi av en impulsspenning og toppverdien av strømmen i et valgt punkt for en jordleder.

HENSIKTER MED JORDING**Beskyttelsesjording (protective earthing)**

Jording av ledende anlegg-/apparatdel som kan bli spenningssatt ved jordfeil i det elektriske anlegget for å unngå farlig berøringsspenning.

Systemjording (system earthing)

Driftsmessig jording av et punkt i en spenningsførende krets enten direkte eller via en impedans.

Sikkerhetsjording

Midlertidig jording, f.eks. arbeidsjording, markeringsjording eller endepunktsjording, av elektriske anleggsdeler som er utkoplet under bygging/vedlikehold/repasasjon for å hindre farlig berøringsspenning pga. innkopling eller påvirkning fra andre anlegg som er i drift.

EMC-jording

Jording for å oppnå elektromagnetisk sameksistens mellom forskjellige typer elektriske apparater og anlegg.

SYSTEMJORDING AV NØYTRALPUNKT**System med isolert nøytralpunkt**

Nøytralpunktet er helt isolert fra jord eller forbundet til jord via en høy impedans av hensyn til signaloverføring eller relévern/overvåking.

System med resonansjordet/spolejordet nøytralpunkt

System der minst ett nøytralpunkt er jordet via slokkespole/Petersenspole.

System med lavohmig jordet nøytralpunkt

Et system der minst ett nøytralpunkt er jordet direkte eller via en impedans som er dimensjonert slik at det oppnås pålitelig automatisk utkopling av alle mulige feilsteder. (Jording kan også skje automatisk når feil inntreffer.)

System med forsinket jording ved feil

System med isolert eller resonansjordet nøytralpunkt hvor det i tilfelle av at en lysbuefeil ikke slokker av seg selv, blir foretatt en direkte eller lavohmig jording av nøytralpunktet etter få sekunder.

Jordfeilstrom/jordslutningsstrom i feilstedet ved enpolet jordslutning er :

- ved isolert nøytralpunkt lik nettets kapasitive feilstrom,
- ved resonansjordet nøytralpunkt (spole) lik ukompensert reststrom,
- ved lavohmig jordet nøytralpunkt lik enpolet kortslutningsstrom.

SPENNINGER VED JORDFEIL**Jordpotensial (earth potential rise)**

Spenningen (U_J) mellom jordingsanlegg/elektrode og fjern jord.

Overflatepotensial (earth surface potential)

Spenningen (U_0) mellom et punkt på jordoverflaten og fjern jord.

Beröringsspenning (touch voltage)

Spenningen ($U_B = U_J - U_0$) som en person kan bli utsatt for ved å berøre en jordet anleggsdel og som står i en horisontal avstand på 1 m fra beröringspunktet.

Skrittspenning (step voltage)

Spenningen ($S_S = \Delta U_0$) som en person kan bli utsatt for ved å stå med føttene 1 m fra hverandre nær jordingsanlegget.

Overført spenning (transferred voltage)

Differens mellom jordpotensial (U_J) overført via isolerte ledere (kabelskjerm, rør, skinner, nøytralleder) til et mer fjerntliggende sted og overflatepotensialet (U_0) på dette stedet. Det samme gjelder for ledere som fører et lavt potensial inn til jordingsanlegget fra et sted utenfor jordingsanlegget.

FEILSTRØMBEGREP

Jordfeil (enpolet) (earth fault)

En ledende forbindelse pga. isolasjonsfeil eller overslag mellom en faseleder og jord eller jordet anleggsdel.

Dobbel jordfeil (double earth fault)

Ledende forbindelse til jord på to faseledere på to forskjellige steder.

Multippel jordfeil

Jordfeil på mer enn to steder.

JORDSLUTNINGSSTRØM

Jordslutningsstrøm/jordfeilstrøm (earth fault current)

Den strøm (I_F) som flyter gjennom feilstedet ved feil på bare en faseleder, dvs. 3 ganger nullsystemstrøm i feilstedet; $3I_0$.

Nullsystemstrøm (zero sequence current)

Er lik $1/3$ jordfeilstrøm (også ved feil på flere faser på samme sted).

Strøm til jord (current to earth)

Den strøm ($r \cdot I_F$) som flyter til jord via alle jordelektroder inklusive jordliner/toppliner og kabelskjermer og dermed medfører jordpotensial $U_J = r \cdot I_F \cdot Z_J$.

Reduksjonsfaktor, r , (reduction factor)

Forholdet mellom strøm til jord og jordfeilstrøm. Forholdet er mindre eller lik 1 pga. kompenserende indusert strøm i toppliner, jordliner eller kabelskjermer.

REFERANSER

1. Elektrisitetstilsynet: Forskrifter for elektriske anlegg - Forsyningsanlegg
Oslo: 1994. (ET-1995-FEA-F)
2. Norges Vassdrags- og Energiverk (NVE): Forskrifter for elektriske bygningsinstallasjoner m.m. (FEB) av 20. desember 1989
Oslo: 1990.

3. Norges Vassdrags- og Energiverk (NVE): Driftsforskrifter for høyspenningsanlegg med utfyllende orientering av 20. november 1987 (DH)
Oslo: 1988.
4. EFI A/S: Jording av tekniske installasjoner i bygninger. Retningslinjer
Trondheim: EFI, 1993.
5. Norsk Brannvern Forening: Lynvernanlegg for bygninger
Oslo: 1992.

SINTEF Energiforskning AS
Adresse: 7465 Trondheim
Telefon: 73 59 72 00

SINTEF Energy Research
Address: NO 7465 Trondheim
Phone: + 47 73 59 72 00