

4. TÖÖSTUSLIKUD ELEKTRIVÕRGUD

4.1 Põhimõisted

Elektrivõrguks nimetatakse rajatiste ja seadmete kogumit elektrienergia ülekandeks energiaallikast tarbijateni. Elektrivõrguks nimetatakse ka suur võrgu osa, arvestades näiteks nimipinget, tarbijate iseloomu või mõnda muud tunnust.

Nimipinge alusel jagunevad võrgud:

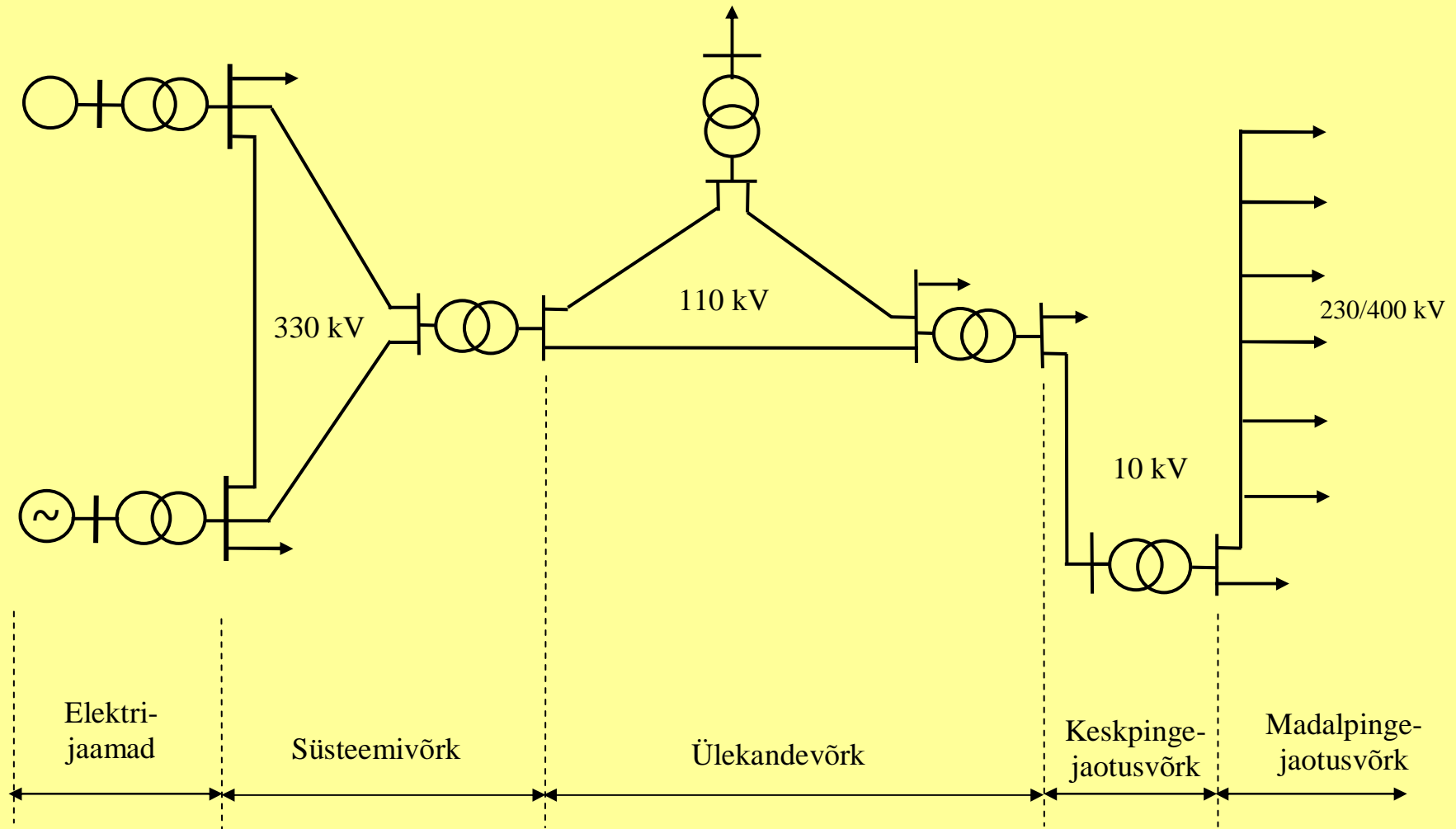
- *madalpingevõrgud*,
- *keskpingevõrgud*,
- *kõrgepingevõrgud*,
- *ülikõrgepingevõrgud*.

Eestis on nimipinged 0,4, 6, 10, 15, 20, 35, 110, 220 ja 330 kV. Ülikõrgepingevõrkudes kasutatakse pinget 400 ... 760 kV. Ehitatud on ka *ultrakõrgepingevõrke* nimipingega üle 1000 kV.

Otstarbe järgi jagunevad võrgud:

- *süsteemivõrgud* ($U_n > 220$ kV), mis ühendavad elektrisüsteeme ja suuri elektri jaamu;
- *ülekandevõrgud* ($U_n = 110..220$ kV), mis kannavad suuri elektrienergia koguseid üle elektri jaamadest tarbimispiirkondade suurtesse alajaamadesse;
- *jaotusvõrgud* ($U_n \leq 35$ kV), mille ülesanne on jaotada ja edastada elektrienergia tarbimispiirkonnas tarbijatele.

Kasutatakse veel väljendit **põhivõrk**, mis haarab süsteemivõrgu ja ülekandevõrgu.



Joonis 4.1. Elektrisüsteemi skeem

Jaotusvõrgud jagunevad:

- tööstusvõrgud,
- linnavõrgud,
- maavõrgud.

Tööstusvõrgud jagunevad:

- **tsehhi võrgud**, mis toidavad tsehhide jõu- ja valgustusseadmeid,
- **ettevõtete jaotusvõrgud**, mis toidavad tsehhide alajaamu või muid muundusseadmeid.

Energiasüsteemi võrku ja teisi ettevõttest väljaspool paiknevaid võrke nimetatakse **välisvõrkudeks**.

Iga võrk võib omada üht või mitut **toiteseadet**.

Elektrivõrgu olulise osa moodustavad **liinid**.

Liini põhielemendiks on **juhid**.

Juhid on kas **juhtmed, kaablid, latid, siinid** jt.

Hoonesiseseid (tsehhi) liine nimetatakse ka **juhistikeks**.

Liinid ja juhid jagunevad:

- **tööliinid** (tööjuhid),
- **kaitseliinid** (maandusjuhid),
- **abiliinid** (juht-, kontroll- ja signaaljuhid).

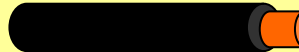
Tähistused:

- tööjuhid vahelduvvoolul

paljasjuhid

L1- kollane**L2 - roheline****L3 – punane**

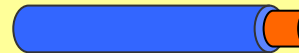
isoleeritud juhid

L1- pruun**L2 - must****L3 - hall**

- tööjuhid alalisvoolul

L -, L+ pruun, must või hall

- neutraaljuht vahelduvvoolul

N – helesinine

- neutraaljuht alalisvoolul

M - helesinine

- maandatud kaitsejuht

PE – kolla-roheline suhtega 0,5:0,5

- ühildatud kaitse-neutraaljuht

PEN - kolla-roheline helesinise lisatähistusega otsal

Pinge valik

Võrgu pingeks loetakse tarbijatele lülitatud nimipinget.

Madalpingevõrkudes kasutatakse 3-faasilises süsteemis reeglina pinget 400 V. Väiksema võimsusega ja ühefaasiliste tarbijate korral (näiteks valgustus) kasutatakse pinget 230 V, ning suure võimsusega tarbijatel 690 V. Pinge 400 V sobib paljude jõutarbijate toiteks ning seda kasutatakse kõige sagedamini.

Tabelis on toodud liinide piirpikkused ja soovitavad võimsused erinevate pingete kasutamisel

Võrgu pinge, V	Liini piirpikkus, m	Soovitav tarbija võimsus, kW
36	30	0,01 ... 2
230	100	0,01 ... 50
400	200	0,2 ... 200
690	400	0,5 ... 700

Tehaste jaotusvõrkudes kasutatakse sageli ka pinget 10 kV, aga väga suurtes ettevõtetes 20, 30, 110 ja 220 kV.

Nimipinge valik sõltub tarbijate **võimsusest** ja **liini pikkusest**.

Ligikaudne **võimsuse ja pinge suhe** peab jääma vahemikku 0,1 ... 1 MW/kV.

Liini **pikkuse ja pinge suhe**: 0,3 km/kV,

Optimaalse nimipinge leidmiseks võib kasutada järgmisi valemedi (need on erinevatelt autoritelt!)

$$\begin{cases} U_{op} = 3 \cdot \sqrt{S} + 0,5 \cdot l & \text{kus } S - \text{näivvõimsus (kVA)} \\ U_{op} = 4,34 \cdot \sqrt{l + 16 \cdot P} & P - \text{aktiivvõimsus (kW)} \\ U_{op} = 16^4 \cdot \sqrt{P \cdot l} & l - \text{liinipikkus (m)} \end{cases}$$

4.2 Avatud võrgud

Avatud võrgud on võrgud, mis ei moodusta suletud kontuure.

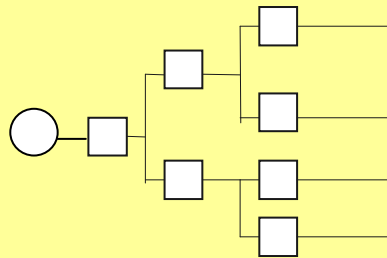
Sellises võrgus on üks põhitoiteallikas ühendatud ühe võrgu sõlmega. Toiteallikast tarbijani on vaid üks tee energia ülekandmiseks. Koormuste määratlus võimaldab liine, jaotus- ja kaitseaparatuuri valida suhteliselt lihtsalt. Paralleelharude puudumise tõttu on lühisvoolud väiksemad ja ka kergemini reguleeritavad.

Tüübid:

- radiaalvõrgud,
- magistraalvõrgud.

Radiaalvõrgud.

Radiaalvõrk koosneb **radiaalliinidest**, mis ei oma hargnemisi.

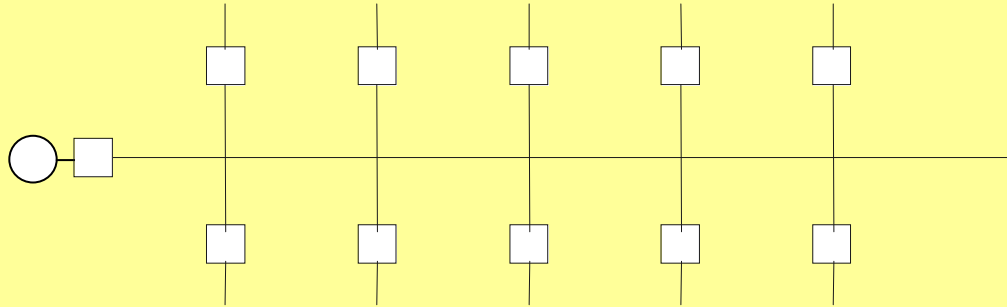


Joonis 4.2 Radiaalvõrk

Puuduvad harud ja enamasti teostatakse juhtmete ja kaablitega. Võrgu astmete arv on järjestikuste kaitseadmete maksimaalne arv. See on tavaliselt ei ületa 3...4. Mida väiksem on astmete arv, seda suurem on töökindlus.

Magistraalvõrgud.

Magistraalvõrk on võrk, mis koosneb magistraalliinidest.

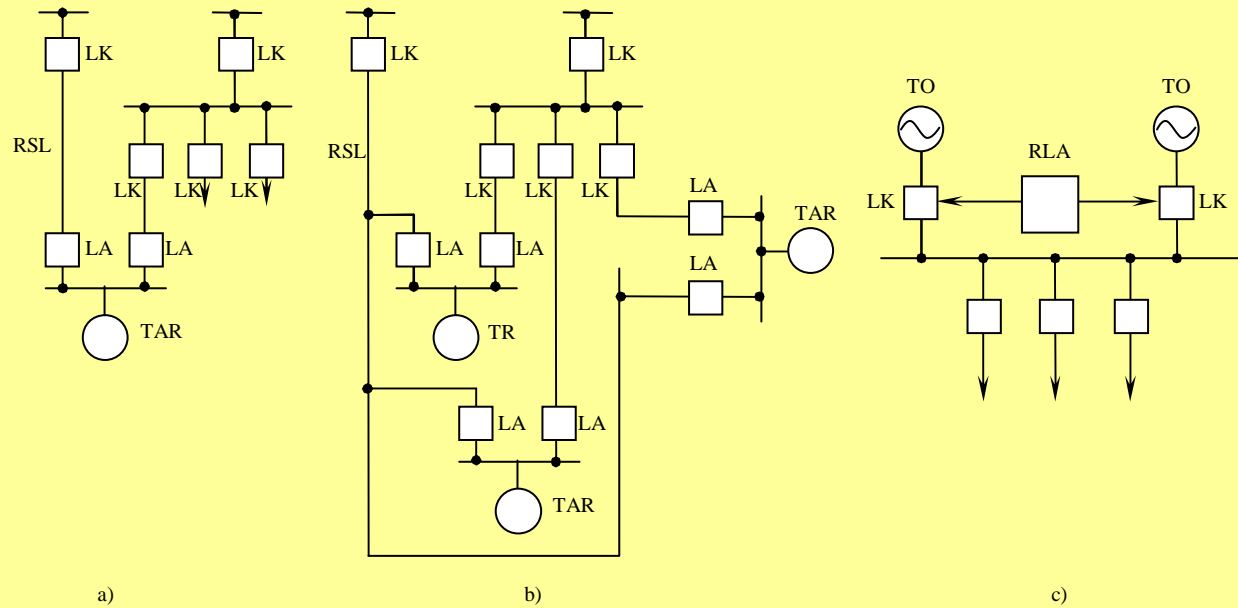


Joonis 4.3. Magistraalvõrk

Nad võivad olla ühe või kaheastmelised. Nende puhul on väiksem seadmete ja materjali kulu. Töökindlus on madalam, kuid selle tõstmiseks paigaldatakse reservliinid. Teostatakse kaablite või siinidega.

Avatud võrgu eelis on lihtsus ja skeemi selgus.

Avatud võrgu puudus on madal elektrivarustuskindlus, mille tõttu võrgu rikke korral võib remondi ajaks osa tarijaid jääda ilma toiteta. Töökindluse tõstmiseks kasutatakse siin reserv radiaal- ja magistraalliine.

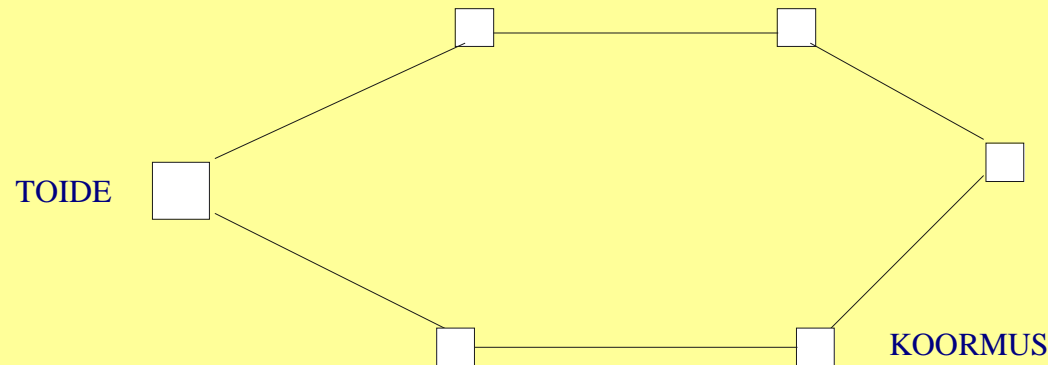


Joonis 4.4. Reservtoite teostamise näiteid avatud võrkudes
 a- reservradiaalliini kasutamisega, b – reservmagistraalliini kasutamisega,
 c – automaatselt sisselülituva reservtoiteallika kasutamisega.

LK - lülitus- ja kaitseaparaadid, RSL - reservliin; RLA - reservi lülitusautomaatika, TAR - tarbija; LA - lülitusaparaadid, mis eraldavad reserv ja tööline, TO – toiteallikas.

Suletud võrgud

Suletud võrgud on võrgud, kus liinid moodustavad ühe või mitu suletud kontuuri. Toide toimub ühest või mitmest toiteallikast. Toide tarbijani toimub mitme liini kaudu.



Joonis 4.5. Suletud võrgu näide - ringvõrk

Puudused.

Arvutused (koormuste jagunemine, pinges kaod, võimsuse kaod, lühisvoolud) on palju keerulisemad kui avatud võrgu puhul.

Kaitseaparatuur peab olema mõlemas liini otsas, mis suurendab seadmete hulka.

Kaitse selektiivsuse tagamine nõuab keerulisemat lülitus- ja kaitseaparatuuri.

Lühisvoolud on suuremad kui avatud võrgu puhul.

Eelised.

Suurem töökindlus.

Väiksemad pinges-, energia-, võimsusekaod.

Ühtlasem koormuste jaotus

Väiksem juhtmaterjali kulu samade töökindlusnäitajate puhul (arvestamata reservliine).

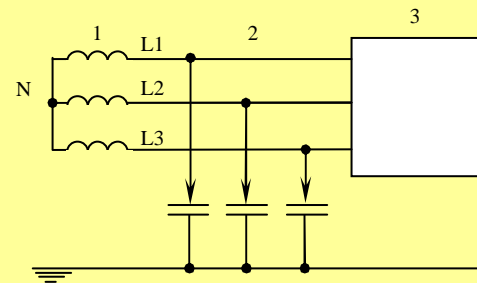
4.3 Võrgu neutraali talitlused

Võrguneutraaliks nimetatakse omavahel ühendatud toiteallikate ning tarbijate neutraalpunktide ja neutraaljuhtide kogumit.

Võrgu neutraal võib olla:

- maast isoleeritud,
- maandatud läbi suure aktiiv- või reaktiivtakistuse,
- jäigalt maandatud (otse ilma takistusega!).

Isoleeritud neutraaliga võrk on näidatud all oleval joonisel 4.6.



Joonis 4.6. Isoleeritud neutraaliga võrk
1- ekvivalentne toiteallikas, 2- ekvivalentne liin, 3- ekvivalentne tarbija

Toiteallikad on asendatud ühe tähte lülitatud ekvivalentse toiteallikaga 1, liinid ühe ekvivalentse liiniga 2 ja tarbijad ühe ekvivalentse tarbijaga 3. Eeldatakse, et kõikide faaside parameetrid on ühesugused s.t. süsteem on sümmeetriline. Ekvivalentse liini parameetritest omavad tähtsust vaid mahtuvused maa suhtes (näidatud joonisel)

Ühe faasi mahtvuslik juhtivus:

$$B = \sum_{i=1} B_{oi} \cdot l_i$$

kus

B - võrgu mahtvuslik juhtivus, S;

B_{oi} - liini erijuhtivus pikkusühiku kohta, S/m;

l_i - i -nda liini pikkus, m;

n - liinide arv võrgus.

Väljalülitatud tarbijate korral voolab liinis **mahtvuslik nn. laadimisvool** $I_m = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot B$.

Kui puuduvad andmed iga liini mahtvuslike juhtivuste kohta, siis kasutatakse mahtvusliku voolu leidmiseks valemit, mis sisaldab keskmisi tegureid:

$$I_m = U_n \cdot (c_k \cdot l_k + c_{\bar{o}} \cdot l_{\bar{o}}),$$

kus

c_k - kaabelliinide mahtvusliku juhtivuse keskmine tegur, $\frac{A}{\text{km} \cdot \text{kV}}$;

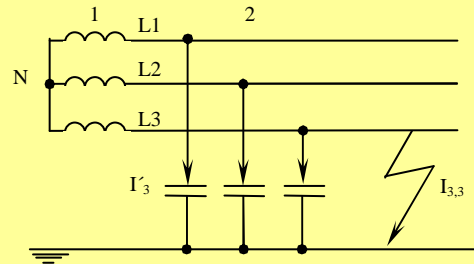
l_k - kaabelliinide üldpikkus, m;

$c_{\bar{o}}$ - õhuliinide mahtvusliku juhtivuse keskmine tegur, $\frac{A}{\text{km} \cdot \text{kV}}$;

$l_{\bar{o}}$ - õhuliinide üldpikkus.

Nimipingeni 10 kV omab valem tavaliselt kuju $I_m = \frac{U_m}{1050} \cdot (35 \cdot l_k + l_{\bar{o}})$.

Ühe faasi isolatsiooni halvenemisel võib tekkida **ühefaasiline maaühendus**.



Joonis 4.7. Ühefaasiline maaühendus isoleeritud neutraaliga võrgus

Sel juhul selle faasi pinge maa suhtes muutub nulliks. Teiste faaside mahtvuslikud voolud suurenevad $\sqrt{3}$ korda. Mahtvuslikke voolude summa ühefaasilise maaühenduse ühenduse korral

$$I_{mü} = \sqrt{3} \cdot I_m' = 3 \cdot I_m,$$

kus

I_m – ühe faasi mahtvuslik vool normaaltalitluse korral,

I_m' - sama ühefaasilise maaühenduse korral,

See vool ei mõjuta faasidevahelist pinget ega võrgu töörežiimi ning seetõttu ei loeta isoleeritud neutraaliga võrgu faasi ühendust maaga avariirežiimiks (vool $I_{mü} \approx 10 \dots 30$ A). Isoleeritud neutraaliga võrk on odavam, sest pole maandusjuhet.

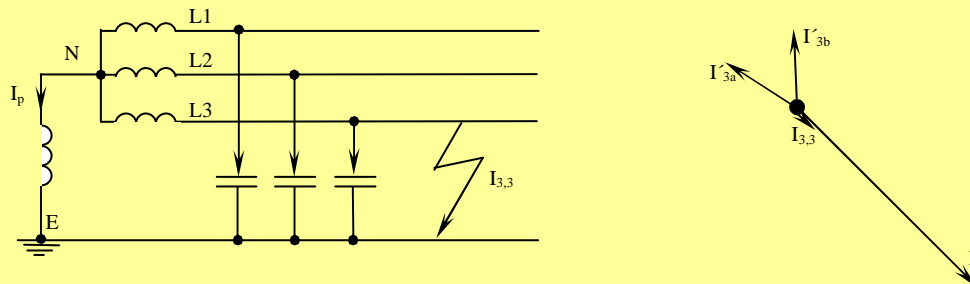
Isoleeritud neutraaliga võrke **kasutatakse**:

- 1) kolmefaasilistes võrkudes pingega 6 ... 35 kV, kus maahendusvoolud ei ületa lubatud suurusi,
- 2) ühefaasilistes kolmejuhtmelistes võrkudes pingeni 1 kV (näiteks võrgud 230 ja 690 V),
- 3) kahejuhtmelistes alalisvooluvõrkudes,
- 4) kõikides madalpingevõrkudes, kus inimeste ohutuse tagamiseks ei kasutata maandamist (näiteks kaitseisolatsioon, eraldustrafod jt.)

Isoleeritud neutraaliga võrkude **puuduseks** on:

- 1) elektrikaare tekkimise võimalus maaühenduse kohas, mis võib põhjustada kommutatsiooni liigpingeid ($4 \dots 6 U_n$), mis võivad häirida tarbijate tööd ning rikkuda isolatsiooni,
- 2) elektrikaare toimel võib tekkida mitmefaasiline maaühendus,
- 3) maaühenduse korral võivad tekkida vastujärgnevusvoolud, mis indutseerivad sünkroongeneraatorite rootorites kahekordse sagedusega voolud, mis põhjustavad rootorite täiendavat kuumenemist.

Kui lühisvoolud faasi ja maa vahel ületavad lubatud piiri, siis **maandatakse neutraal läbi maandusreaktori** (suur induktiivtakistus).



Joonis 4.8. Maaühendusvoolu kompenseerimine maandusreaktoriga

Seda meetodit kasutatakse võrkudes pingetega 3 ... 35 kV.

Vool läbi reaktori maaihenduse korral:

$$I_p = \frac{E_c}{j(x_p + x_k + x_c)}$$

E_c - maaihenduses oleva toiteallika faasi elektromotoorjõud,

x_p - reaktori induktiivtakistus,

x_n - toiteallika ühe faasi induktiivtakistus,

x_c - liini induktiivtakistus kuni maaihenduskohani.

Vektordiagrammilt:

$$I_{3a} + I_{3b} + I_p + I_{mü} = 0$$

Valemist, millega arvutatakse reaktori vool I_p ja $I_{mü} = \sqrt{3} \cdot I_m = 3 \cdot I_m$ tuleb **maaihendusvool**:

$$I_{mü} = 3 \cdot I_m - I_p.$$

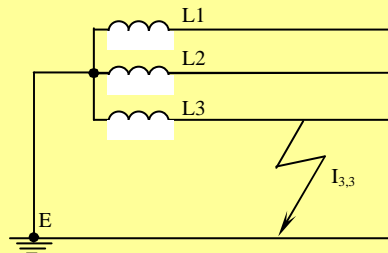
Kui reaktori takistus on reguleeritud selliselt, et $I_p = 3 \cdot I_m$, siis $3 \cdot I_m - 3 \cdot I_m = 0$ on **maaihendusvool võrdne 0-ga**.

Sellist võrku nimetatakse **kompenseeritud** võrguks. Sellises võrgus neutraali ühendatud induktiivtakistus kompenseerib liinide mahtuvuslikud takistused.

Sellise võrgu **eelised**:

- 1) lühisvool muutub väga väikeseks, ning maaihenduse kohas elektrikaart ei tekki või kustub see ruttu;
- 2) pärast kaare kustumist taastub pinge aeglaselt, mistõttu kaare taassüttimine ja liigpinged on vähe tõenäolised;
- 3) väga väike võimalus kolmefaasiliseks lühiseks;
- 4) väikesed vastujärgnevusvoolud.

Neutraali **jäigal maandamisel** (läbi väga väikese takistuse $R \approx 0$) ühe faasi ühendust maaga nim. ühefaasiliseks lühiseks ning see peab viima kaitseaparaatuuri rakendumiseni.



Joonis 4.9. Jäigalt maandatud neutraaliga süsteem

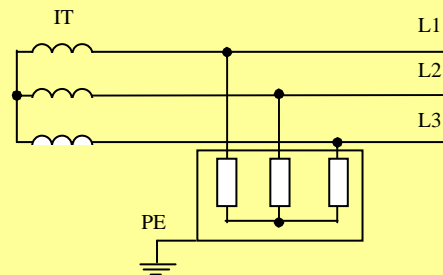
Jäigalt maandatud neutraaliga süsteeme kasutatakse:

- 1) pingetel 110 kV ja rohkem,
- 2) nelja ja viiejuhtmelistes madalpingevõrkudes,
- 3) kolmejuhtmelistes alalispingevõrkudes.

Madalpingevõrkudes kasutatakse neutraali jäika maandamist elektriseadmete korpuste kaitsemaanduse parandamiseks.

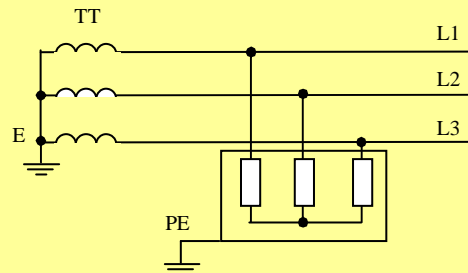
Euroopa standardite kohaselt eristatakse 5 tüüpi 3-faasilisi madalpingevõrke.

1. Kolmejuhiline isoleeritud neutraaliga võrk. Tähis **IT**. Kaitsena elektrilöögi eest kasutatakse seadmete korpuste kohapealset maandamist.



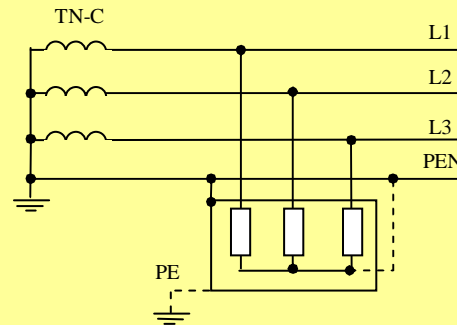
Joonis 4.10. IT-süsteem

2. Kolmejuhiline jäigalt maandatud neutraaliga võrk. Tähis **TT**. Kaitsena kasutatakse elektriseadmete korpuste kohapealset maandamist.



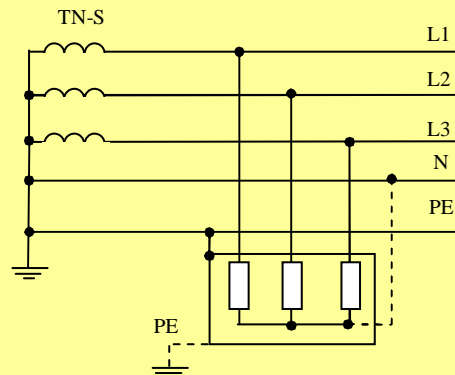
Joonis 4.11. TT-süsteem

3. Neljajuhiline jäigalt maandatud neutraaliga süsteem ühitatud neutraal- ja kaitsejuhiga PEN . Tähis **TN-C**.
Elektriseadmete korpused ühendatakse PENiga.



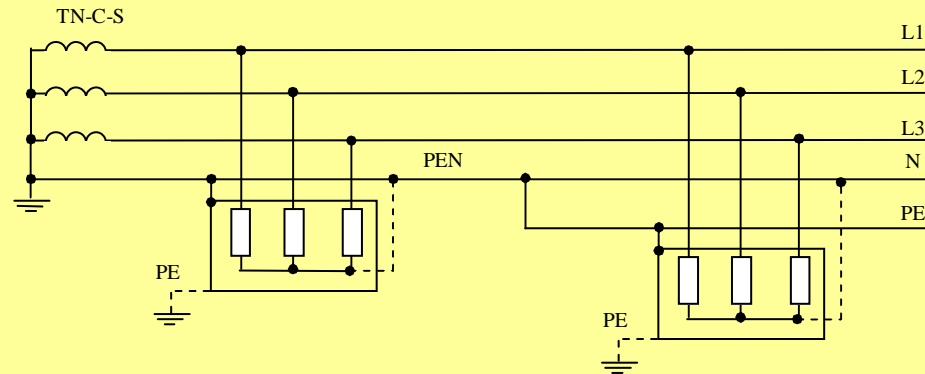
Joonis 4.12. TN-C süsteem

4. Viiejuhiline jäigalt maandatud neutraaliga süsteem eraldatud neutraal (N-) - ja kaitsejuhiga (PE). Tähis **TN-S**.
Elektriseadmete korpused ühendatakse PEga.



Joonis 4.13. TN-S süsteem

5. Osaliselt nelja- ja osaliselt viiejuhiline järgalt maandatud neutraaliga süsteem. Tähis TN-C-S.



Joonis 4.14. TN-C-S süsteem

Kolmejuhilisi võrke kasutatakse tavaliselt pingete 230 ja 690 V korral. Tänapäeval kõigelevinum on 4juhtiline TN-C võrk, mis võimaldab realiseerida 3 faasilist süsteemi 230/400 V. Ohutustehnika nõuetest lähtudes on hakatud laialdaselt kasutama viiejuhilisi võrke TN-S ja TN-C-S. TN-S võrgu kasutamine võimaldab vähendada ka häireid arvutustehnika töös.

4.4 Elektrivõrgu juhtide materjalid

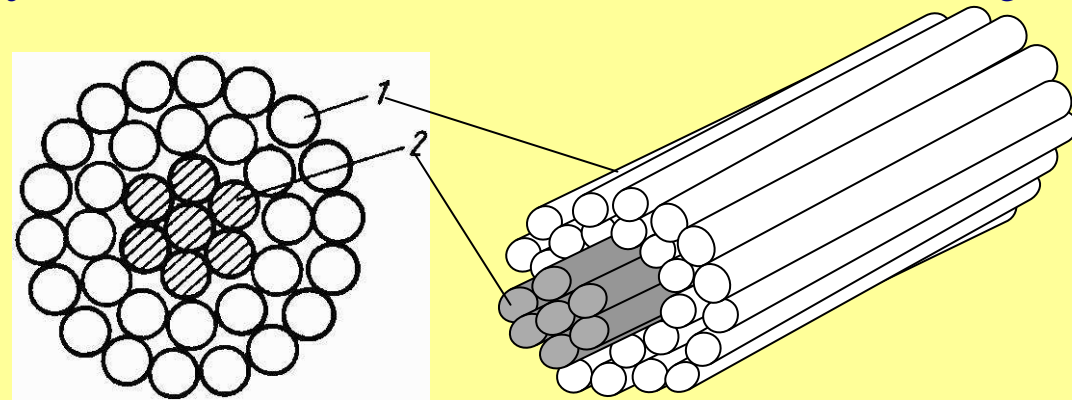
Elektrivõrgu volujuhtide materjalidena kasutatakse *alumiiniumi, tema sulameid, vaske ja terast*.

Erijuhtudel kasutatakse ka *magneesiumi* (lattide materjalis), *naatriumi* (kaablites), *pronksi* (paljasjuhtmetes) jt. materjale.

Suhteliselt madala maksumuse ja massi tõttu kasutatakse kõige rohkem **alumiiniumi**.

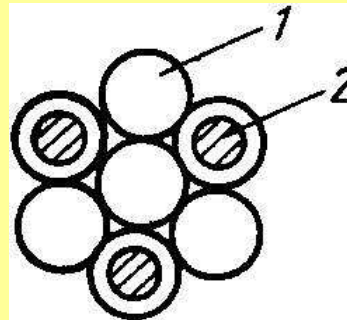
Alumiiniumi **puuduseks** on väike mehaaniline tugevus ja püsiva hea elektrilise kontakti tagamise keerukus. Suurt mehaanilist tugevust nõutakse aga õhuliinidelt (töötamine tõmbele) ja volulattides ja teistes lattjuhtides (töötavad paindele).

Alumiiniumõhuliinide mehaanilise tugevuse suurendamiseks valmistatakse õhuliinide juhid mitmejuhtmelistena, mille koosseisu kuulub teraskandetross. Selliseid kombineeritud juhtmeid nimetatakse *teras-alumiiniumjuhtmeteks*. Alumiiniumi ja terase ristlõigete suhe sellistes juhtmetes on 4...8 : 1, sõltuvalt nõutavast mehaanilisest tugevusest.



Joonis 4.15. Õhuliini teras-alumiiniumjuhtme ristlõige
1 – alumiiniumjuht, 2 – terassüdamik-kandetross

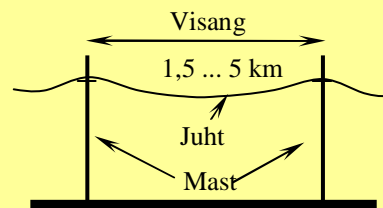
Alumiiniumist õhuliinijuhtmetes võidakse kasutada ka bimetalltugevdustraate:



Joonis 4.16. Bimetalltugevdustraatidega alumiiniumõhuliinijuhtme ristlõige
1 – alumiinium, 2 – teras

Vaske õhuliinide materjalidena ei asutata tema kõrge hinna tõttu.

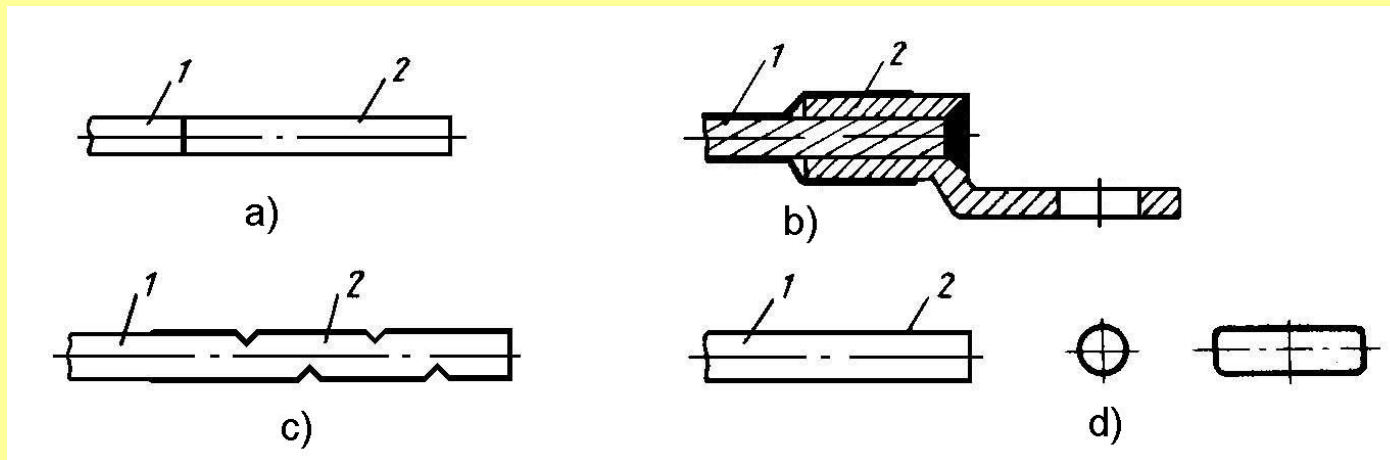
Terasõhuliinijuhte kasutatakse ja nad õigustavad end ainult väga suurtemehaaniliste koormuste korral, näiteks visangutel 1,5 ... 5 km.



Joonis 4.17. Õhuliini visang

Lattliinides kasutatakse suurema mehaanilise tugevuse saavutamiseks *alumiiniumi sulameid*, millede mehaaniline tugevus võib olla kuni kolm korda kõrgem kui puhtal alumiiniumil, elektritakistus aga ainult 10% madalam.

Alumiiniumi korral halveneb kontaktühendus plastiliste deformatsioonide ja elektrokeemilise korrosiooni tõttu. Selle ära hoidmiseks kasutatakse alumiiniumjuhtidel vasest kingi, kingade paigaldamiseks kasutatakse keevitamist või pressimist.



Joonis 4.19. Alumiiniumjuhtmete varustamine vaskkontaktlementidega

- a) ühesoonelise alumiiniumjuhi otsa keevitatud vaskotsik, b) mitmesoonelise alumiiniumjuhi otsa keevitatud vaskotsik, c) ühesoonelise alumiiniumjuhi otsa pressitud hülss, d) bimetallluhe või -latt
1- alumiinium, 2 - vask

4.5 Isoleerjuhtmed

Isoleerjuhtmeid kasutatakse laialdaselt madalpingevõrkudes. Elektrienergia edastamiseks kasutatakse peaaesjalikult juhtmeid ja kaableid. Mõnel juhul saab kasutada ka muid juhte, nt. latiline. Et tagada vajalikku töökindlust, on kasutusel peaaegu eranditult vaskjuhtmed ja -kaablid. **Alumiiniumjuhtmed**, mida meil mitukümmend aastat vasa defitsiitsuse tõttu eelistatult kasutati, on väikestel ristlõigetel (*alla 16 mm²*) liiga ebatöökindlad, mistõttu Eestis kehtivad *standardid nende kasutamist ei luba*.

Juhtmes või kaablis võib olla üks või mitu isolatsiooniga (enamasti polümeermaterjaliga) kaetud massiivset või kiulist elektrijuhti, mida nimetatakse *sooneks*. Kohtkindlas juhistikus on soonte juhtiv osa enamasti massiivne või jämedakiuline, teisaldatavates juhtmetes ja kaablites (paindujuhtmetes ja -kaablites) on sooned peenekiulised. Kaabli erinevus juhtmest seisneb selles, et kaabli sooned on ümbritsetud neid välismõjude eest kaitsva hermeetilise kestaga (*mantliga*). Tuleb aga öelda, et ka mõned juhtmed (manteljuhtmed) võivad olla varustatud mantliga, mis peab tugevdama juhtme soonte kaitset üksnes väliste mehaaniliste toimete eest.

Juhtmete ja kaablite eri soonte isolatsioon on vastavalt soonte otstarbele eri värvi.

Aastal 1976 kehtestas Euroopa Elektrotehnilise Standardimise Komitee (*Comité Européen de Normalisation Électrotechnique, CENELEC*) oma harmoneerimisdokumendiga HD 308 S1:1976 kogu Euroopa jaoks paindkaablite soonte ühtse värvisüsteemi. Kohtkindlate kaablite osas ühtseid kokkuleppeid ei olnud ja iga maa kasutas soonte tunnusvärve vastavalt oma standarditele. Näiteks oli Suurbritannias maandatud kaitsesoone tunnusvärv must, mida Euroopa mandriosas enamasti kasutati faasisoonte eristamiseks.

Hiljuti jõuti ka selles osas ühtsetele seisukohtadele ja kehtestati uus harmoneerimisdokument HD 308 S2:2001, mis määratleb nii paindkaablite kui ka kohtkindlate kaablite soonte värvid. Suuri muudatusi uus normdokument endaga kaasa ei toonud.

Kolla-roheline jäi ikka nii omaette **kaitsejuhi** (PE) kui ka **ühitatud kaitse- ning neutraaljuhi** (PEN) tunnusvärviks.

Neutraaljuhi (N) värvina tuli kasutusele **sinine**, faasisoonte märgistamiseks kehtestati **pruun, must ja hall**, kusjuures pruun on esimese faasisoone värv. Üleminek uuele värvisüsteemile pidi lõppema 1. aprillil 2006.

Tähtis on silmas pidada, et **kolla-rohelist** soont tohib kasutada üksnes kaitse- (PE-) või PEN-juhina!

Sinist soont kasutatakse eelkõige **neutraaljuhina** (N), võib aga mõnikord erandina kasutada ka teistel eesmärkidel, nt. lülitijuhtmetes.

Pruuni, musta ja halli soont kasutatakse faasijuhtidena (alalisvoolujuhistikes poolusejuhtidena).

Kuue või enama soonega juhtmetes ja kaablites võidakse värvtähistuse asemel kasutada **pealetriikitud numbritega** musti sooni, kuid kaitsejuht (kui see on olemas) on alati kolla-roheline. Juhtmete soonte värvide kohta on joonised eespool p.4.1.

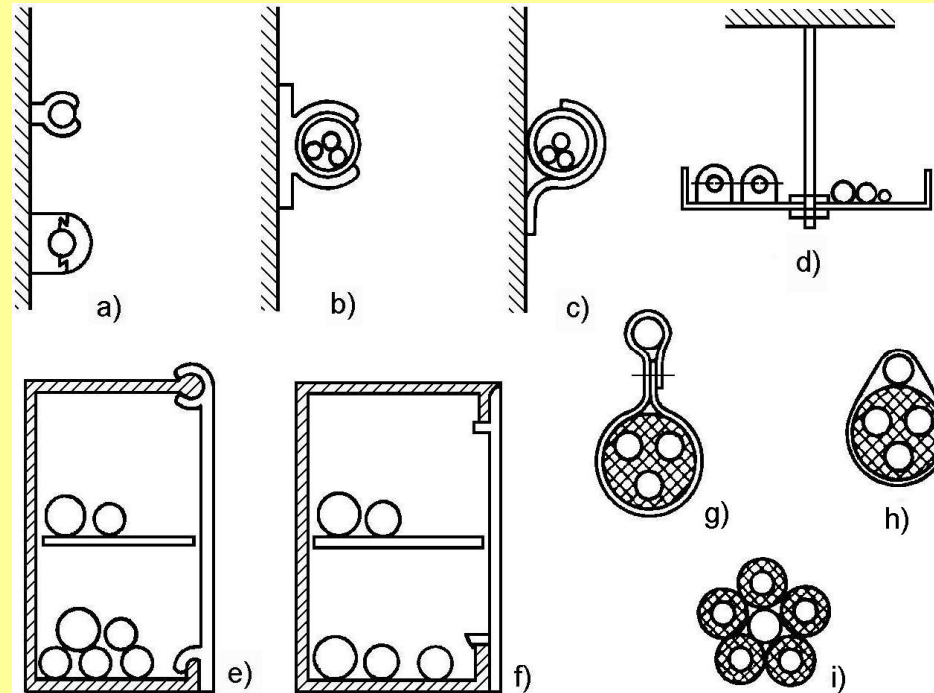
Soonte isolatsioonimaterjalina polüvinüülkloriidi, polüetüleen, tuleohutuse tagamiseks ka sünteetilist silikoonkautšukki ning kõrgendatud nõute puhul paindlikkusele ka kummi. Kaitseks mehaaniliste vigastuste eest võidakse juhtmetel kasutada tekstiilist, polümmerist või metallilist kaitseümbriseid.

Soone ristlõike kuju järgi kasutatakse **ümar-** ja **lamesooni**, sh segmetsooni.

Isoleeritud juhtmeid kasutatakse madalpingevõrkudes pingega kuni 1 kV.

Sõltuvalt keskkonnatingimustest, elektri- ja tuleohutuse nõuetest, mehaaniliste vigastuste võimalusest jm. teguritest kasutatakse erinevaid juhtmete *pinnapealse ja süvistatud* paigaldus viise.

Pinnapealse paigalduse korral paigaldatakse juhtmed ehituskonstruktsioonide pindadele või nende vahele.

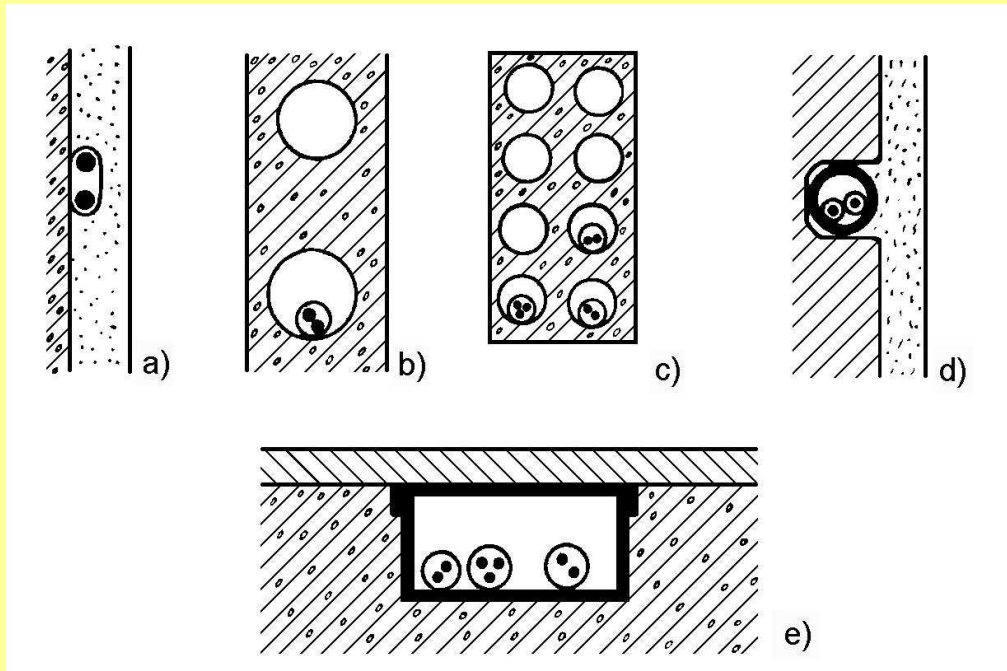


Joonis 4.20. Juhtmete pinnapealse paigalduse näiteid

- a) isoleerklambritel, b) isoleertorus, c) metalltorus, d) metallrennis e) plastkarbis
f) metallkarbis, g) kandetrossil, h) kandetraadil, i) isekandev trossjuhe

Kui pinnapealne juhtmete paigaldus ei vasta keskkonna ega ohutusnõuetele, kasutatakse süvistatud paigaldust.

Süvistatud paigalduseviisi korral paigutatakse juhtmed konstruktionipinna alla, selle õõsustesse, torudesse või kanalitesse.



Joonis 4.20. Juhtmete süvistatud paigalduse näiteid

a) krohvikihhi all (nn. krohvialane), b) ehituskonstruktsiooni õõnsuses, c) kergetes betoonblokkides, d) süvistatud paigaldustorudes, e) süvistatud karpides

Tegelikud paigaldusviisid võivad eeltoodutest ühel või teisel määral erineda. Näiteks kaablite paigaldamisel riiulile võib viimane olla kas augustatud (perforeeritud) või avadeta (laus); esimesel juhtumil on kaablite jahutustingimused paremad. Riiul loetakse aga augustatuks alles siis, kui selle avad moodustavad vähemalt 30 % riiuli kogupindalast. Kui avade suhteline kogupindala on väiksem, loetakse riiul lausaks. Redelpaigaldusel on õhu konvektsioon kaablite ümbruses tunduvalt vabam kui riiulpaigaldusel, sest redeli metallosad varjavad vähem kui 10 % paigaldustasandist. Konsool-, konks-, distantspell- jms. paigaldusel võib kaabli lugeda paiknevaks vabas õhus. Enamuse tegelikest paigaldusviisidest saab taandada tüüpsetele standardis IEC 60364-5-52:2001 esitatud tabeli abil. Olulisemad sellest tabelist võetud näited on esitatud alljärgnevas tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Juhtmete ja kaablite paigaldusviiside taandamine tüüpsetele.

Paigaldusviisi kirjeldus	Vastav tüüp- paigaldusviis
Isoleerjuhtmed või ühesoonelised kaablid puit- või kiviseinal paiknevas rõhtsas või püstses karbikus	B1
Isoleerjuhtmed või ühesoonelised kaablid ülesriputatud rõhtsas karbikus	B1
Mitmesooneline kaabel ülesriputatud rõhtsas karbikus	B2
Isoleerjuhtmed või kaabel põrandaliistus, uksepiidas või aknaraamis	A1
Ühe- või mitmesoonelised kaablid laepinnal	C
Ühe- või mitmesoonelised kaablid lausriiulil	C
Ühe- või mitmesoonelised kaablid aukriiulil, redelil, võrgul või trossil	E või F
Paljas- või isoleerjuhtmed isolaatoreil	G
Ühe- või mitmesooneline kaabel ehitustarindi õõnes (vt. joonis 3.1.23):	

$1,5 D_e \leq V < 20 D_e$ $V \geq 20 D_e$	B2 B1
Isoleerjuhtmed karbikus, mis paikneb ehitustarindi õõnes (vt. Joonis 3.1.24): $1,5 D_e \leq V < 20 D_e$ $V \geq 20 D_e$	B2 B1
Isoleerjuhtmed karbikus, mis paikneb kiviseinas soojusliku eritakistusega mitte üle 2 K m/W (vt. Joonis 3.1.25): $1,5 D_e \leq V < 5 D_e$ $5 D_e \leq V < 50 D_e$	B2 B1
Ühe- või mitmesooneline kaabel ripplae või topeltpõranda vaheruumis (vt. Joonis 3.1.26): $1,5 D_e \leq V < 5 D_e$ $5 D_e \leq V < 50 D_e$	B2 B1
Isoleerjuhtmed või ühesoonelised kaablid kaanetatud põrandakanalis; samad, kiviseinas paiknevas torus	B1
Mitmesooneline kaabel kaanetatud põrandakanalis; sama, kiviseinas paiknevas torus	B2
Isoleerjuhtmed või ühesoonelised kaablid torus, mis paikneb ventileerimata püst- või rõhtkanalis (vt. Joonis 3.1.27): $1,5 D_e \leq V < 20 D_e$ $V \geq 20 D_e$	B2 B1





Isoleerjuhtmed torus, mis paikneb ventileeritavas (nt. restkaanega) põrandakanalis	B1
Ühe- või mitmesooneline kaabel lahtises või ventileeritavas (nt. restkaanega) rõht- või püstkanalis	B1
Ühe- või mitmesooneline kaabel kiviseinas	C
Ühe- või mitmesooneline kaabel pinnases paiknevas torus või kanalis	D

Märkus. Joonised vastavalt numeratsioonile vaata raamatust „Elamute elektripaigaldised”.

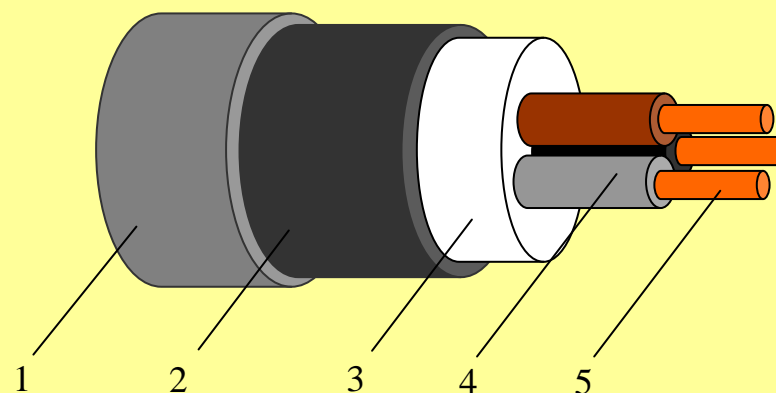
4.6 Kaabelliinid

Kaablid erinevad teistest isoleerjuhtmetest selle tõttu, et neil on isolatsiooni *hermeetiline kaablikest* (mantel), mis kaitseb sooni ja isolatsiooni välismõjude eest.

Jõukaablid koosnevad järgmistest osadest:

- 1) voolujuhtivad sooned: valmistatakse alumiiniumist või vasest, võival olla ümarad , profiilsed  ellipsi kujulised , sektorikujulised  jne.,
- 2) soonte kilekate (ainult kõrgepingekaablitel!),
- 3) sooneisolatsioon (polümeermaterjal, immutatud paber, kumm jt.),
- 4) isolatsiooni voolujuhtiv varjestus (ainult kõrgepingekaablil!),
- 5) üldisolatsioon (mitmesoonelistel kaablitel!)
- 6) kaablikest (mantel) valmistatakse polümeermaterjalist, kautšukist, kummist, alumiiniumist, seatinast vms materjalist,
- 7) lint- või võrksoomus (juhul, kui on nõutav tugev kaitse on mehaaniliste vigastuste eest, materjaliks tavaline teras),
- 8) soomuse korrosioonikaitse.

Valmistatakse nii kõrge- kui madalapingekaableid.



Joonis 4.21. Kaabli ristlõige

1 – soomuskaitse, 2 – kaablikest, 3- üldisolatsioon, 4 - soone isolatsioon, 5 – kaabli soon

Peale eelnimetatud osade võivad kaablites olla veel juhtimissooned, riputustrossid jt. osad.

Kaablite paigaldusviisid

Hoonesisesel paigaldusel kasutatakse järgmisi kaablite paigaldusviise:

- lahtiselt ehituskonstruktsioonidel,
- avatult või süvistatult metalltorudes,
- kaablirennides ja -kanalites,
- riputatud trossil,
- kaablikorrustel, kaablišahtides.

Ettevõtte territooriumil on järgmised paigaldusviisid:

- mittepõlevast materjalist välisseintel ja konstruktsioonidel,
- maapinnas,
- torudes maapinnas või maa peal,
- trossil,
- kaablitunnelites,
- kaablikanalites,
- kaabliestakaadidel.

4.7 Lattjuhtmed

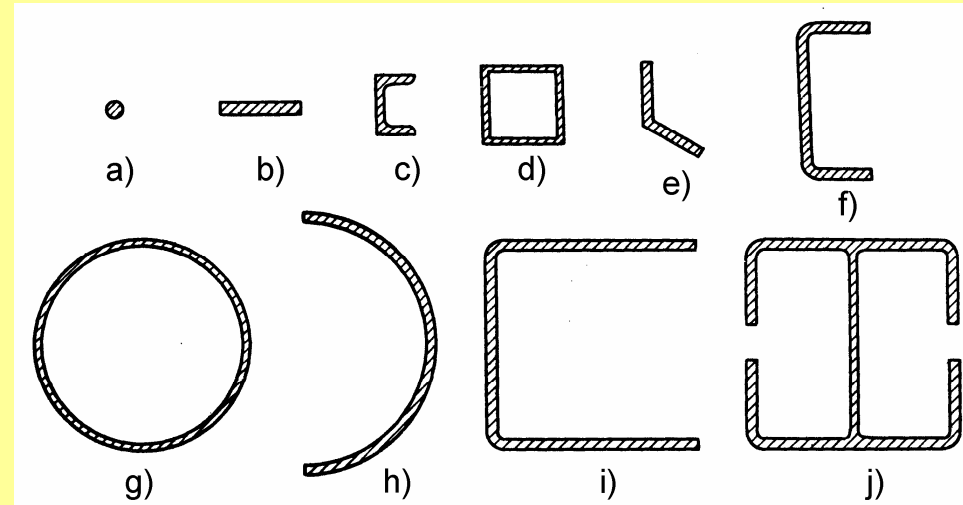
Lattjuhtmeteks nimetatakse elektrienergia ülekandeliine, milles voolujuhtidena on kasutusel *jäigad latid*.

Lattjuhtmed võivad olla **lahtised** (isoleerimata latid paigutatud tugiisolaatoritele) või **kaitstud** (metallist või isoleermaterjalist karpides).

Lattjuhtmed võidakse valmistada hargnemisteta või väiksema või suurema arvu harudega oma pikkuse kohta.

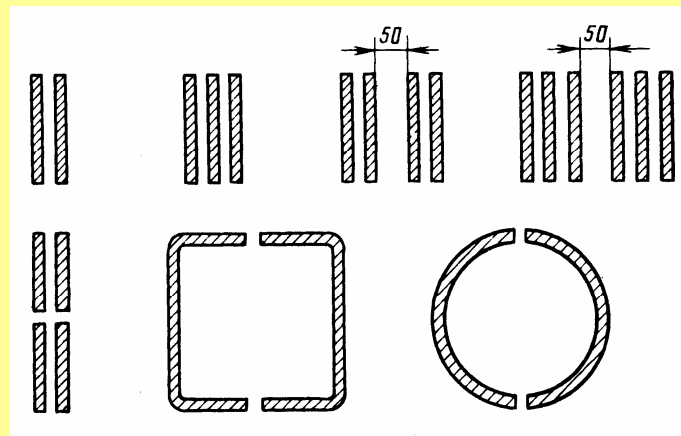
Lattide materjalina kasutatakse peamiselt **alumiiniumi ja tema sulameid**.

Lattide **ristlõike kuju** sõltub nõutavast mehaanilisest tugevusest ning lattide üldisest kujundusest. Ristlõike kuju võib olla tasapinnaline, ümar, toru- või karbikujuline jne.



Joon. 4.22. Voolulattide ristlõike kujusid

Suurte voolude korral (üle 1 kA) kasutatakse mitmekihilisi latte.



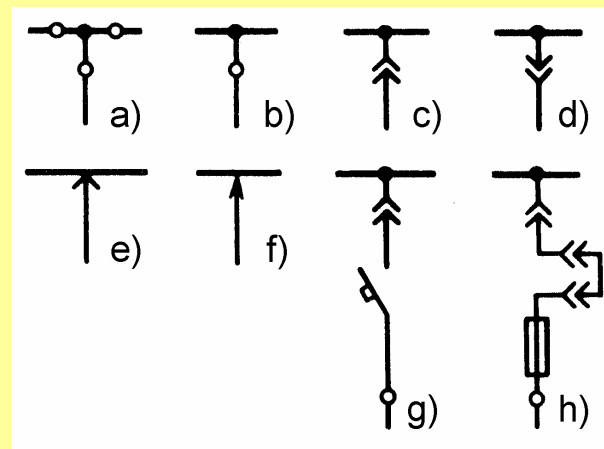
Joon. 4.23. Mitmekihiliste lattide näidised

Mõõtmete ja isoleervahemike vähendamiseks kasutatakse *isoleermaterjalidega kaetud* voolulatte. Madalpinge korral kasutatakse magistraalliinides (voolule üle 1 kA) tavaliselt kaitstud *komplektlattuhtmeid*. sektsioonide pikkusega 1,5...4 m.

Komplektlattuhtmete **eelised**:

- kerge ümberpaigutamine ja vahetumine,
- paigaldamise võimalus peale üldehitustööde lõppu,
- paigalustööge väike maht,
- kõrge töökindlus.

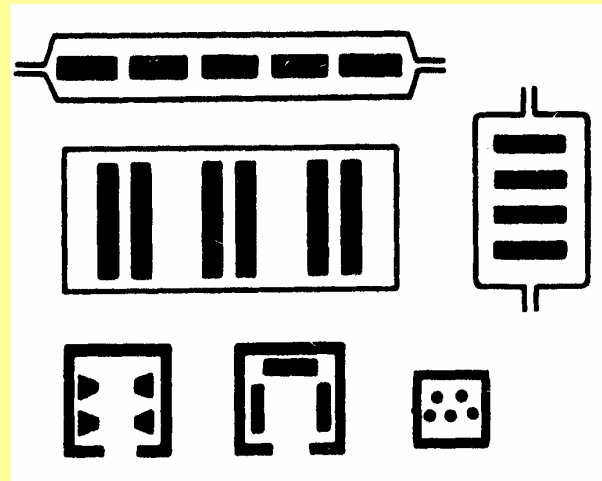
Hargnemine magistraallattliinidelt jaotuslattiinidele võidakse teostada mitmel erineval viisil



Joon. 4.24. Hargnemine madalpingelattliinidelt

a - hargnemisliidesega; b - poltühendusega, c,d,e - pistikühendusega, f- liugkontakühendusega, f - automaatlülitiga harukarbiga, h - sulavkaitsmete ja blokeerpistikute harukarbiga

Kõige sagedamini kasutatakse tsehi **madalpingevõrkudes** lameprofiiliga alumiiniumlatte. Kolmefaasilistes lattliinides on lattide arv tavaliselt 3..5. Lattide paigutus 3-faasilistes madalpinge lattliinides on näidatud joon. 4.25

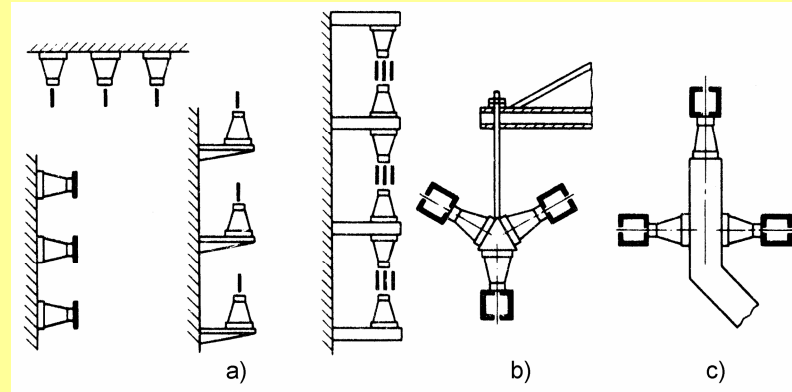


Joon. 4.25. Kolmefaasiliste voolulattide paigutus

Kaitstud voolulattide kinnitusviisid:

- vahetult lakke,
- jäigalt riputatud,
- seinal konsoolil,
- põrandal olevatel tugeudel.

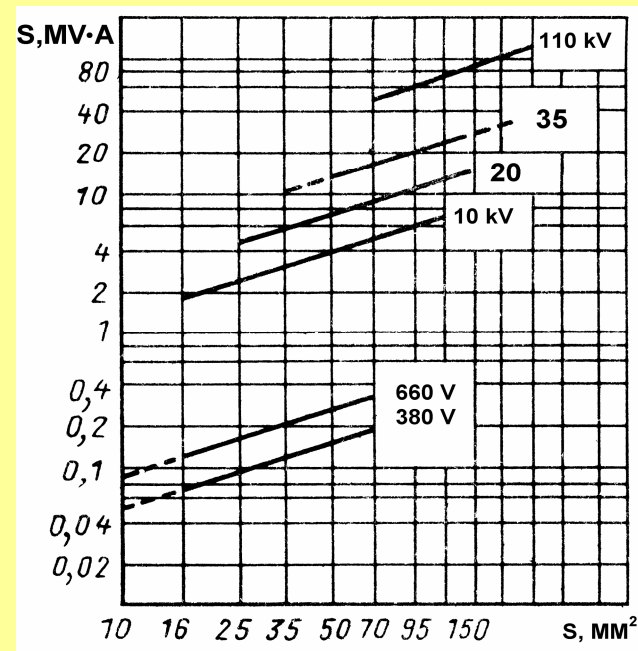
Kõrgepingevõrkudes kasutatakse reeglina lahtisi lattjuhtmeid, mis paigutatakse isolaatoritele.



Joon. 4.26. Isolaatorite paigutuse võimalused
a- paigutus ühes tasapinnas, b, c - kolmnurkpaigutus

4.8 Õhuliinid ja painduvad volujuhid

Paljasõhuline kasutatakse nii madal- kui ka kõrgepingelise (reeglina kuni 110 kV, väga suurtes tehastes kuni 220 kV). Elektrienergia jaotamiseks tehaste territooriumitel ülekantavate võimsuste ja seos kasutatavate paljasjuhtmete ristlõikepindalade vahel erinevatel nimipingetel toodud joonisel on antud joonisel 4.27.



Joon. 4.27. Ülekantavate võimsuste seos ristlõike pindalaga erinevatel nimipingetel

Peale juhtme margi ja ristlõike omavad liini elementide valikul tähtsust järgmised andmed:

1. **Liini vertikaalne gabariit** - juhtme minimaalne lubatud kaugus läbirippe madalamast kohast maani või ehitisteni, mis võivad paikneda liini all.
2. **Liini horisontaalne gabariit** - äärmise juhtme minimaalne lubatud horisontaalne kaugus puudest või hoonetest või ehitistest.
3. Mastidevaheline kaugus
4. Juhtmete mõjuda võivad lisajõud (jää, tuul), millese suurus sõltub kliimavööndist, kus asub ettevõte.

Vertikaalsed ja horisontaalsed gabariidid ja juhtmete arvutuslikud koormused määratakse elektriseadmete ehituseeskirjade järgi või näiteks Eesti Energia AS puhul ettevõttesiseste standarditega. Näiteks on madalpingevõrkude puhul minimaalne vertikaalne gabariit 6 meetrit, kuni 110 kV pinge puhul aga 7 meetrit.

Õhuliini masti kõrguse võib arvutada valemiga

$$h = h_v + f + h_{lisa},$$

kus

h - masti kõrgus, m;

h_v - nõutud masti vertikaalne gabariit, m;

f - juhtme rippe suurus, m;

h_{lisa} - kõrguse varu, m, mis arvestab pinnase ebatasasust ja planeeringu ebatäpsust ning mis võetakse ca 0,25 m.

Juhtmete riipe horisontaalse trassi ja võrdse kõrgusega mastide puhul valemiga

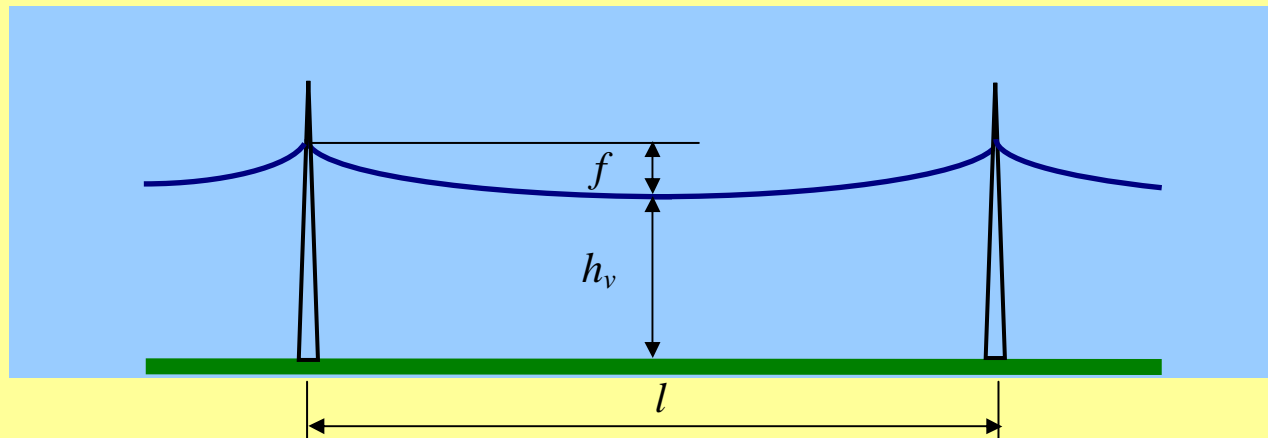
$$f = \frac{l^2 g}{8\sigma}$$

kus

l - mastidevaheline kaugus ehk visang m;

g - juhtme taandatud koormus (ühe pikkusühiku ja ristlõikepindala ühiku kohta), N/m³ ;

σ - juhtme arvutuslik mehaanilinepinge, Pa.



Joonis 4.28. Õhuliini iseloomustavad suurused

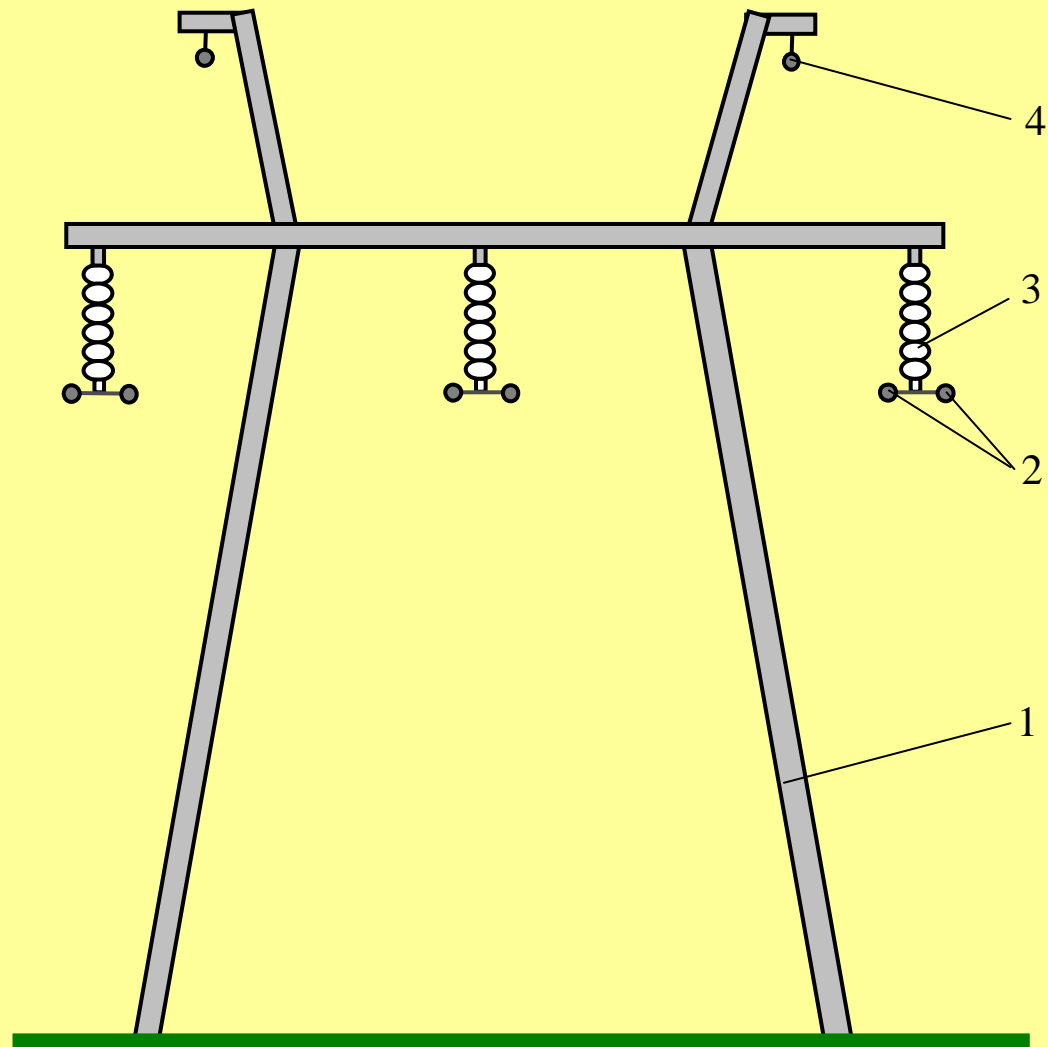
Õhuliinidel kasutatakse tavaliselt *teras- või raudbetoonmaste*. Metsarikastes kohtades võidakse kasutada ka *puitmaste*. Raskesti ligipääsetavates kohtades, kus oluline on kohaletoimetatava masti kaal, võidakse kasutada *alumiiniumsulamist maste*.

Konstruksiooniliselt jagunevad mastid:

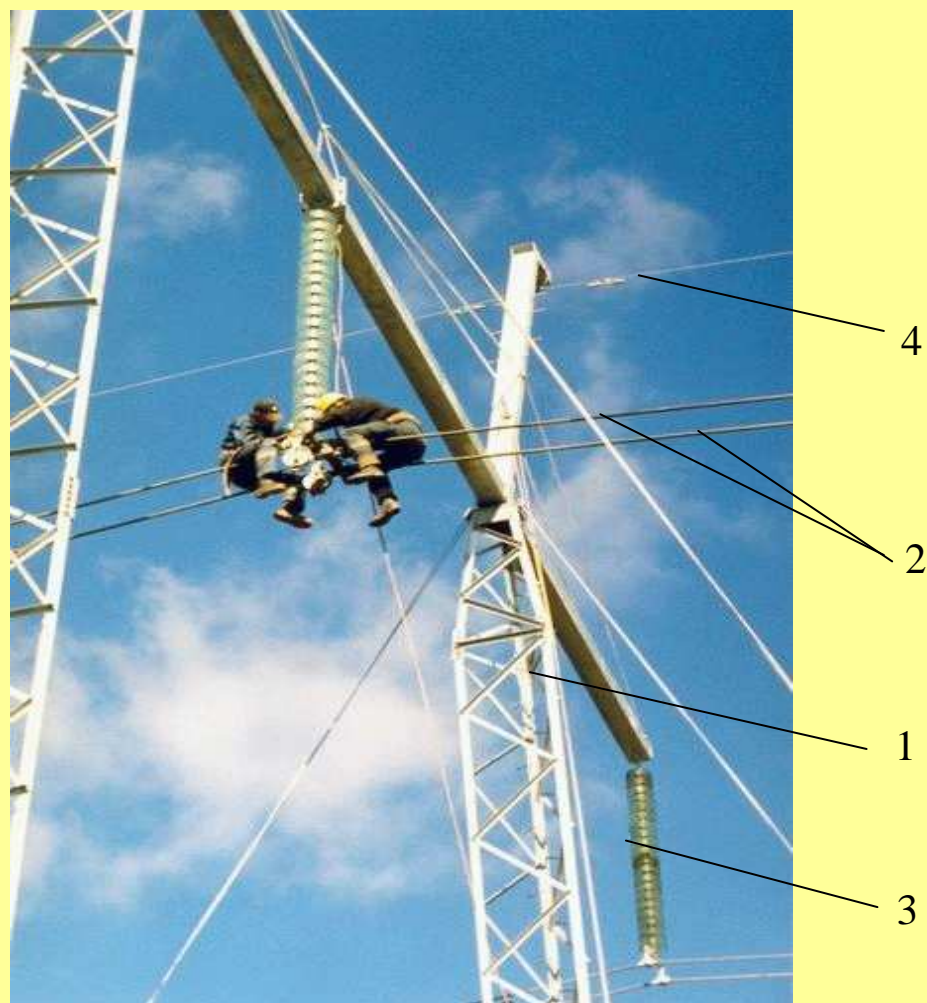
- ühetoelised mastid,
- portaalmastid.



Joonis 4.29. Ühetoeliste mastidega madalpingeõhuliinid

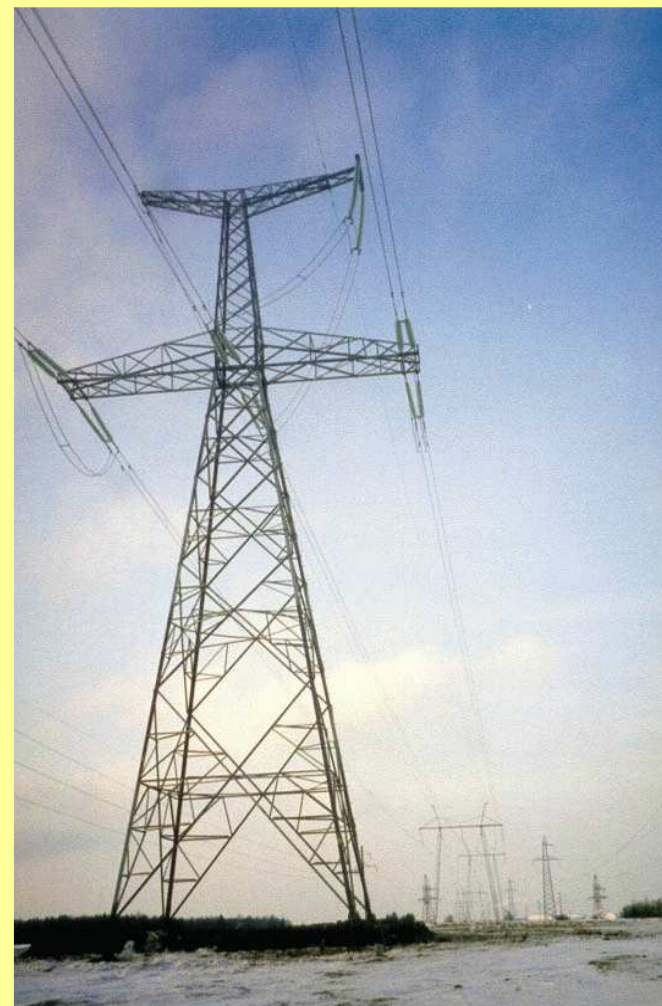


Joonis 4.30. Kõrgepingeõhuliini portaalmast
1- masti jaland, 2 – õhuliini kaksikjuhe, 3 –rippisolaator, 4 - piksekaitsetross



Joonis 4.31. Juhtme montaaž 330 kV õhuliini portaalmastil.
Firma **Empower** koduleheküljelt
1- masti jaland, 2 – õhuliini kaksikjuhe, 3 –rippisolaator, 4 - piksekaitsetross

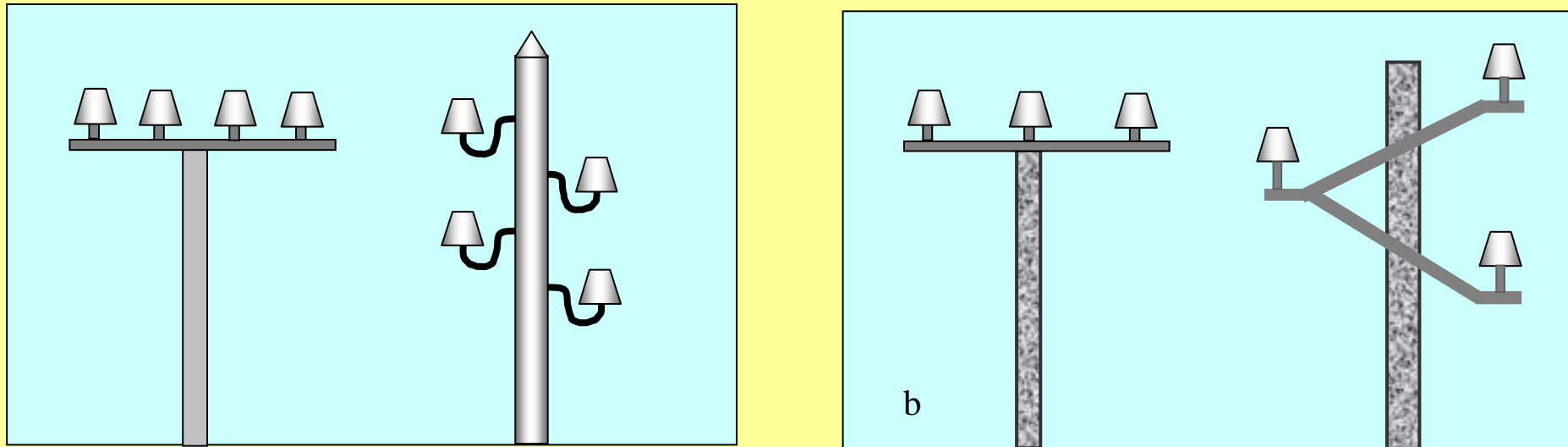
Funktsiooni järgi jaotatakse mastid: kande-, ankur-, lõpu-, hargnemis- ja nurgamastid.



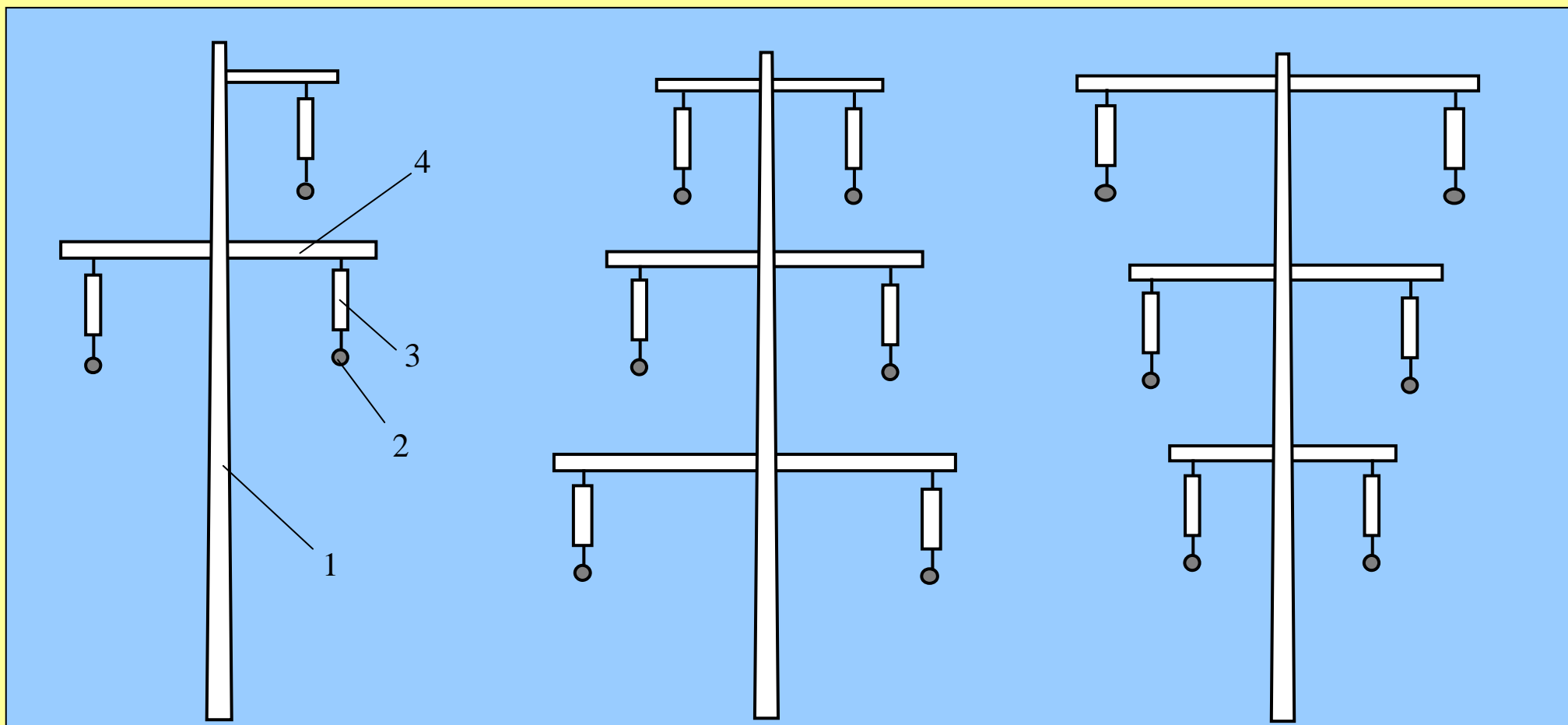
Joonis 4.32. Ankurmastide näiteid
Firma *Empower* koduleheküljelt

Juhtmete elektriliseks eraldamiseks kandekonstruktsioonidest kasutatavad isolaatorid jagunevad

- **tugiisolaatorid,**
- **rippisolaatorid,**
- **kombineeritud** tugi- ja rippisolaatorid
- **isolatsioontraaversid.**



Joonis 4.31. Õhuliini tugiisolaatorite paigaldusnäiteid
a- madalpinge puhul, b – kõrgepinge puhul



Joonis 4.32. Kõrgepingeõhuliini rippisolaatorite paigaldusnäiteid
1 – mast, 2 – õhuliini juhe, 3 – rippisolaator, 4 - traavers

Isolaatorite materjalina kasutatakse peamiselt **portselani** ja **klaasi**. Viimasel ajal on hakatud kasutama isolaatorite valmistamiseks **polümeermaterjale**(nt. klaasplast).

Isolaatorid valitakse **nimipinge, arvutusliku mehaanilise koormuse ja atmosfääri saastetaseme järgi**.

100 kV ja kõrgema pingega õhuliinid varustatakse **piksekaitsetrossidega**, madalamatel pingetel 20 ja 35 kV kasutatakse **pingelahendeid** alajaamade sisseviikude ees.

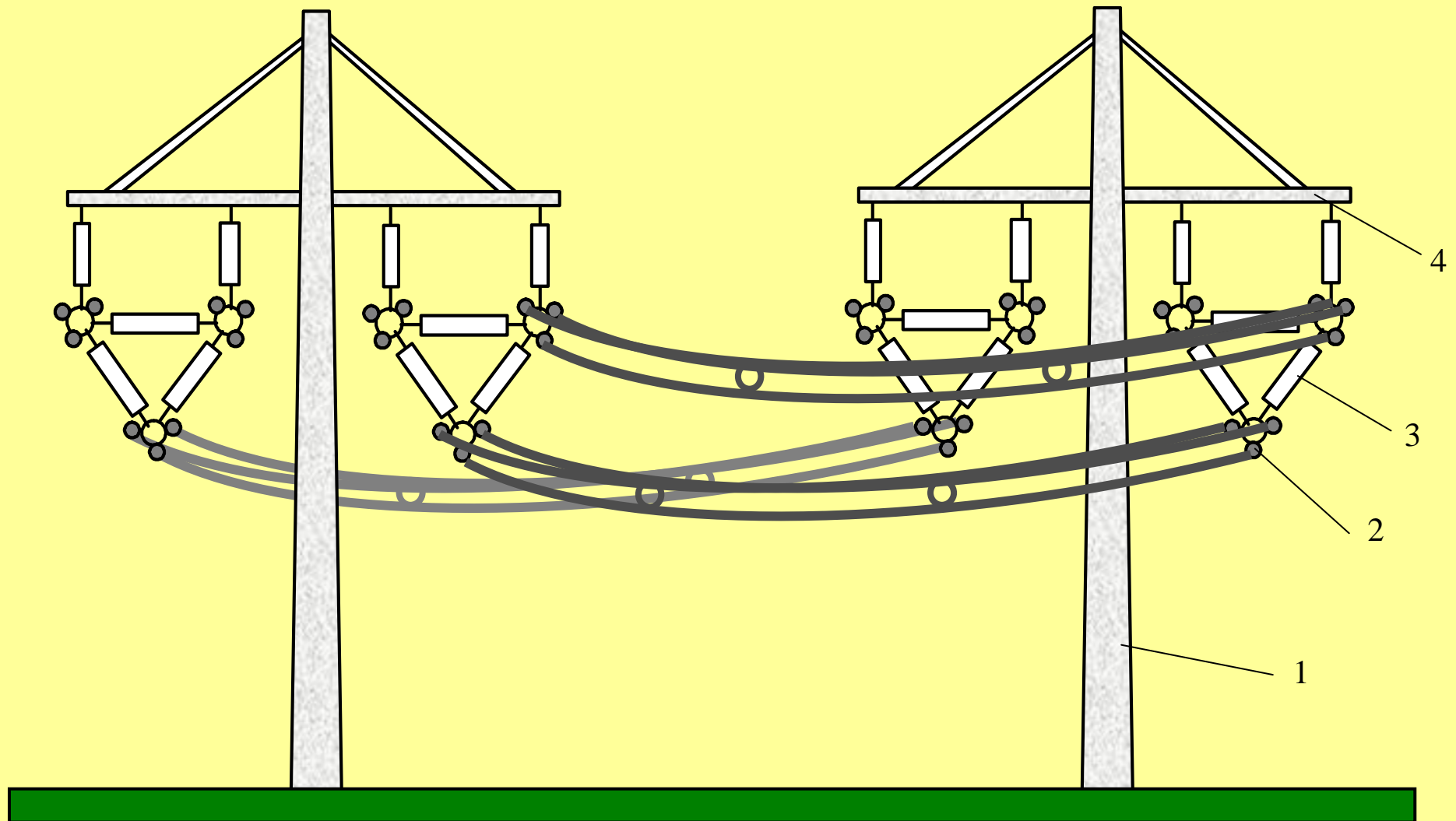
Mastidevahelised **visangute** pikkused määratakse mehaaniliste arvutuste teel või kasutatavate mastide tehniliste andmete alusel. Madalpinge puhul on visang vahemikus 50 ... 60 m, 6 .. 110 kV puhul 75 .. 400 m.

Painduvad volujuhid on ette nähtud suurte võimsuste ülekandmiseks suhteliselt lühikeste vahemaade taha pingel kuni 35 kV. Painduvad volujuhid on õhuliinide eriliigiks ning erinevad selle poolest, et neil on palju juhtmeid faasis (4...12) ja visangud on palju lühemad (umbes 20...40 m). Kogupikkus on samuti lühike ulatudes mõnekümnetest meetrist mõnesaja meetriteni. Painduva volujuhi ühe faasi juhid paiknevad mööda ringjoont, mille diameeter on 0,2...0,6 m ja nad kinnitatakse rõngas- või hulknurkkinnitile.

Kasutatakse näiteks generaatori ja pinget tõstva trafo omavaheliseks ühendamiseks ettevõtte oma elektrijaama olemasolul.

Eelisteks on tunduvalt suuremate visangute kasutamise võimalus tugede vahel, jõudude puudumine kandekonstruktsioonidele, mis tekivad soojuslikust pikenemisest ja lühenemisest, väiksemad faasidevahelised jõud lühise korral.

Puudus on painduva volujuhi suured mõõtmed.



Joonis 4.33. Kolmefaasilise painduva voolujuhi riputusnäide
1- kandemast, 2 – painduv voolujuhi juhe, 3 – isolaator, 4 - traavers

4.9 Liini tüübi valik

Elektriliinid peavad oma konstruktsioonilise lahenduse seisukohalt vastama teatud **töökindluse, ökonoomsuse, ohutuse ja käidumugavuse nõuetele**. Seetõttu arvestatakse liini tüübi, konstruktsioonilise lahenduse ja üksikelementide valikul liini **elektrilisi parameetreid, keskkonnaolusid, ehitamistingimusi, võrgu skeemi, koormuste ja võrgu dünaamikat**, aga ka **majanduslikke näitajaid**.

Lähtudes eelnevast erinevad hoonesised ja hoonevälised liinid omavahel oluliselt.

Hoonesisesel paigaldusel avaldavad juhtide ja nende paigaldusviisi valikule olulist mõju järgmised faktorid:

1. Tarvitite arv, tihedus, paigutuse iseloom ja ühikvõimsused.

Soovitus: kui on väike arv tarviteid, ebaühtlane paigutus ja suured ühikvõimsused on otstarbekas kasutada juhtmeid või kaableid, vastasel juhul – lattjuhtmeid (voolulatte).

2. Võrgu skeem, iseloom ja liinide pikkus.

Soovitus: magistraalliinide puhul kasutada lattjuhtmeid, pikkade mittehargnevate liinide puhul – kaableid, lühikeste liinide puhul – isoleerjuhte.

3. Tarvitite ja võrgu skeemi arengu dünaamika

Soovitus: kui koormused ei muutu ja juhistikuga loetakse võrdseks ehituskonstruktsioonide omaga, pole vaja ette näha juhistikuga vahetust, vastasel juhul tuleb paigaldusviis valida selline, mis võimaldab juhtmeid ja kaableid vahetada ning vastavalt võimsuse lisandumisele ka täiendavalt juurde paigaldada.

4. **Niiskus.** Ruumi loetakse kuivaks, kui suhteline niiskus on alla 60 %, niiskeks 60 .. 75 % puhul, märjaks üle 75 % puhul ja eriti märjaks kui see on ca 100 %.

5. Keskkonna **temperatuur** ja **soojusallikate olemasolu** ruumis. Ruumi loetakse kuumaks, kui temperatuur seal ületab pidevalt 30°C . Kuumkeskkond nõueb kuumakindlaid juhtmeid ja kaableid.
6. **Tolmusisaldus** ruumis määrab ära seadmete kinnisuse astme. Kui on tegemist voolujuhtiva tolmuaga, ei tohi kasutada lahtisi isoleerimata juhtmeid või latte.
7. Keskkonna **keemiline aktiivsus** nõuab sellisele mõjule vastu pidavat juhistikku või selle kaitset keskkonna toime eest.
8. Ruumi **tuleohtlikkus** võib olla seal kasutatavatest või hoitavates tuleohtlikestainetest. Tuleoht nõuab meetmete võtmist juhtmete või kaablite kaitsmiseks tule eest.
9. Ruumi **plahvatusohtlikkuse** võib tingida tuleohtlike gaaside või aurude õhku imbumine. Plahvatusohu korral peab kasutama kas tugevdatud kaitsekestaga kaableid või kaitsta kaablit sellise keskkonnamõju eest.
10. Juhistiku **mehaanilise kahjustamise võimalikkus** nõuab metalltorude, karpide või rennide kasutamist või süvistatud juhistiku kasutamist.
11. Tarvitite **mobiilsuse aste** võib nõuda trollide või painduvate toitekaablite kasutamist.
12. **Tsehhisese transpordi** olemasolu piirab oluliselt juhistiku paigaldamisvõimalusi.
13. **Arhitektuurilised nõuded** võivad tingida süvistatud paigaldise ehitamist.
14. **Majanduslikud kaalutlused** võivad osutada määravaks teiste võrdsete tingimuste puhul.

Hoonevälise liinitüübi valik sõltub järgmistest põhilistest asjaoludest:

1. **Liini pinge.** Sõltuvalt kasutatavast nimipingest võib osutada ühesuguse voolukoormuse juures, et alates teatavast pingest on õhuliini ehitamine kaabelliini ehitamisest odavam.
2. **Ülekantav võimsus.** Sõltuvalt ülekantavast võimsusest võib ühesuguse nimipinge juures osutada, et alates teatavast võimsusest on õhuliini ehitamine kaabelliini ehitamisest odavam.
3. **Territooriumi hõivatus** hoonete, ehitiste, transporditeede, maapealsete ja maa-aluste kommunikatsioonidega.
4. **Liinide arv** ühel trassil. Suure liinide arvu korral võib osutada võimalikuks nende paigutamine tunnelitesse või etakaadidele.
5. Ühtede ja samade **rajatiste kasutamise võimalus** liinide paigaldamisel
6. Antud paikkonna **kliimatingimused.**
7. **Pinnase koostise ja olukord.**
8. Territooriumi eri tsoonide tule- ja plahvatusohtlikkuse tase.
9. Kõrgete **liikuvate tõste-transpordiseadmete või muude liikuvate masinate olemasolu**, mis või vigastada õhuliine.
10. **Maakaabli vigastuste võimalus** kaevamistöodel.
11. **Koormuste muutumise dünaamika, alajaamade arv, võrgu skeem.**

4.10 Juhtide ristlõigete valik

Elektrivõrkudes juhtide ristlõike valikul arvestatakse nii **töö-** kui ka võimalike **avariolukordadega**.

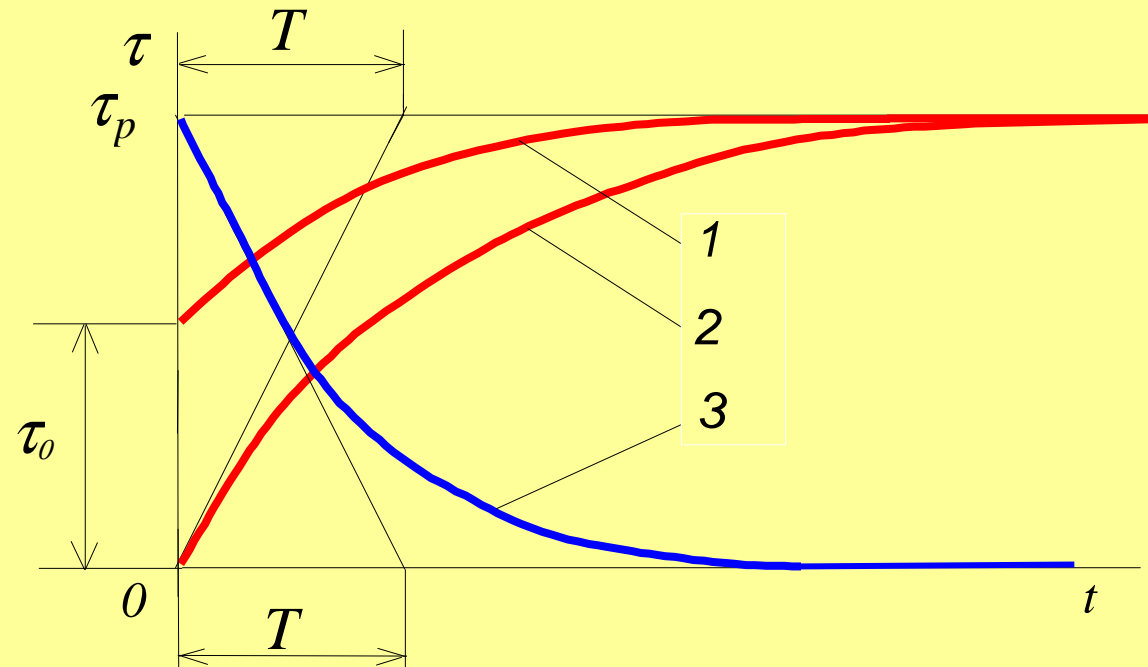
Liini **tööolukorra ehk normaaltalitluse** põhiliseks iseloomustavaks näitajaks on **arvutuslik koormusvool**. Koormusvoolu arvutust käsitleti 2. peatükis. Juhtide ristlõige **püsitalituse** korral valitakse vastavalt võrratusele:

$$I_{lub} \geq I_a,$$

kus

I_{lub} – juhile kestvalt lubatud vool;

I_a – juhi arvutuslik koormusvool.



Joonis 4.34. Juhi kuumenemise (1,2) ja jahtumise (3) siirdeprotsess püsikaovõimsusel püsitalitluses

Juhtide ristlõike valikul **vaheajalise talituse** korral kasutatakse kestvalt lubatud voolu asemel vaheajalise talitluse lubatud voolu I_{la}

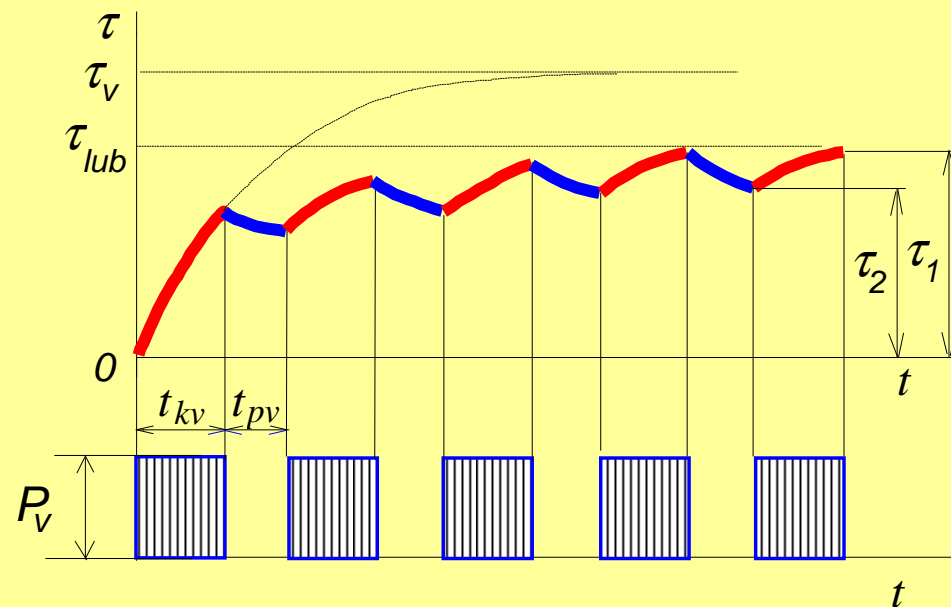
$$I_{la} = \frac{0,875I_{lub}}{\sqrt{\varepsilon}},$$

kus

ε - suhteline lülituskestus

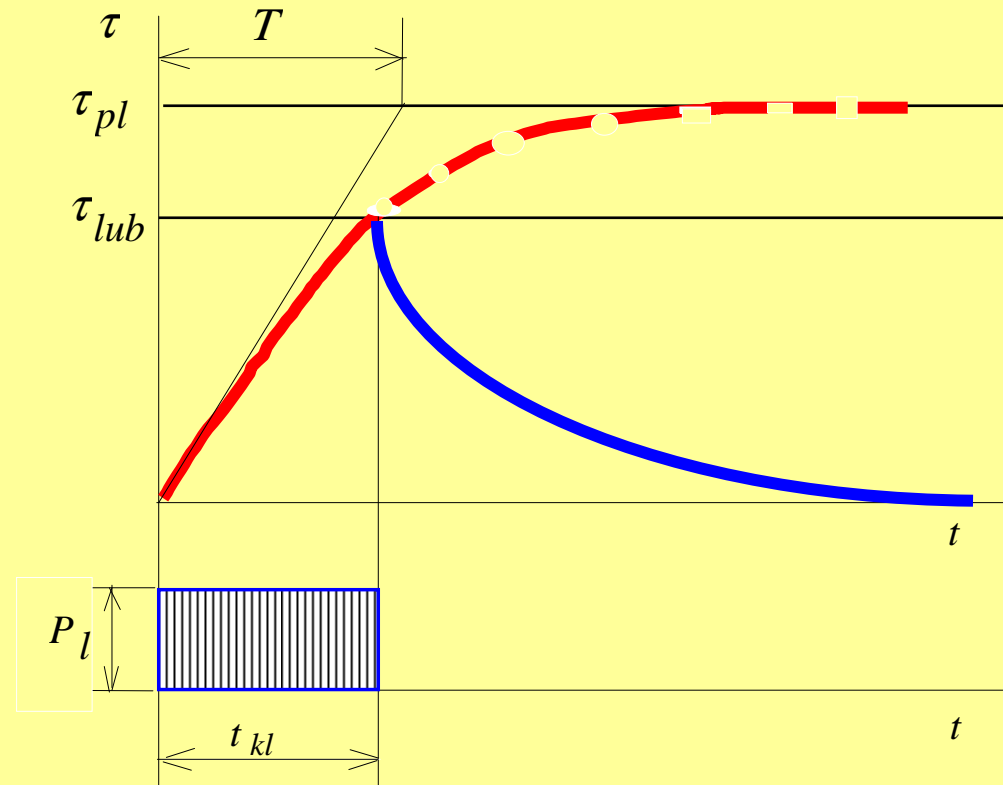
$$\varepsilon = \frac{t_{kv}}{t_{kv} + t_{pv}},$$

t_{kv} - koormuse all töötamise aeg, t_{pv} - pausi aeg.



Joonis 4.35. Juhi kuumenemine vaheajalises talitluses

Juhtide lubatud voolud **lühiajalise talitluse** korral võib leida lähtudes nende soojuslikest ajakonstantidest ja lubatud piirtemperatuurist.



Joonis 4.36. Juhi kuumenemine lühiajalises talitluses

Peale arvutusliku voolu mõjutavad juhtide ristlõike valikut veel **järgmised tegurid**:

1. Nõutav mehaaniline tugevus (sõltub paigaldusest!)
2. Lubatud pingekadu (vaadeldud peatükis 2!)
3. Minimaalsed aastakulutused (suurendavad ristlõiget, kuna ristlõike suurenemisega vähenevad elektrienergia kaod!)

Lihtsustatud käsitluses kasutatakse **majandusliku voolutiheduse** mõistet.

Ristlõige valitakse järgmiselt:

$$S \approx \frac{I_a}{\delta_m},$$

kus

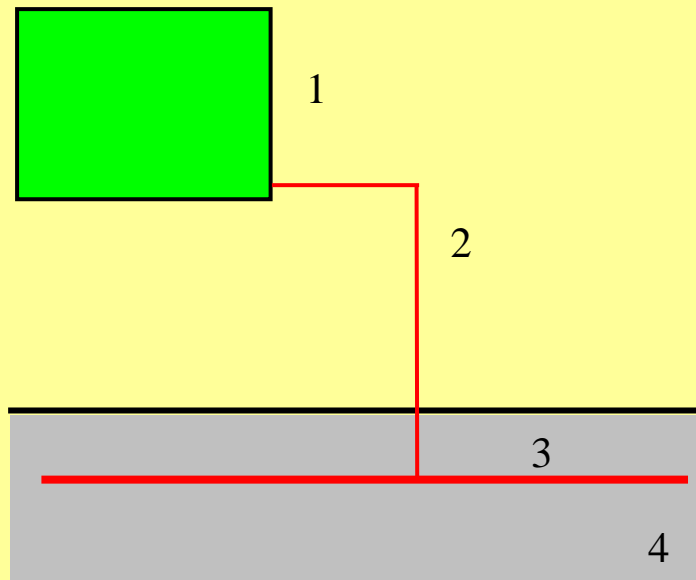
δ_m - majanduslik voolutihedus (antud normatiivides $\left[\frac{A}{mm^2} \right]$).

4. Koroonalahenduste ärahoidmine paljasjuhtmete pinnal (kõrgepingevõrkudes)

4.11 Maandusjuhtide ja maandusseadmete valik

Üldmõisted

Maandamise all mõeldakse elektriseadme, -paigaldise või võrgu mingi osa elektrilist ühendamist maa lähedaloleva osaga (**kohaliku maaga**), kusjuures see ühendamine võib olla tahtlik, tahtmatu või juhuslik ning kas püsiv või ajutine. Maandamiseks on lihtsaimal juhtumil vaja maaga kontaktis olevat juhtivat osa e. **maanduselektroodi**, üht või mitut juhti e. **maandusjuhti**, mis loovad juhtiva ühenduse võrgu, paigaldise või seadme mingi punkti ja maanduselektroodi vahel.



Joonis 4.37. Maandamise põhimõte

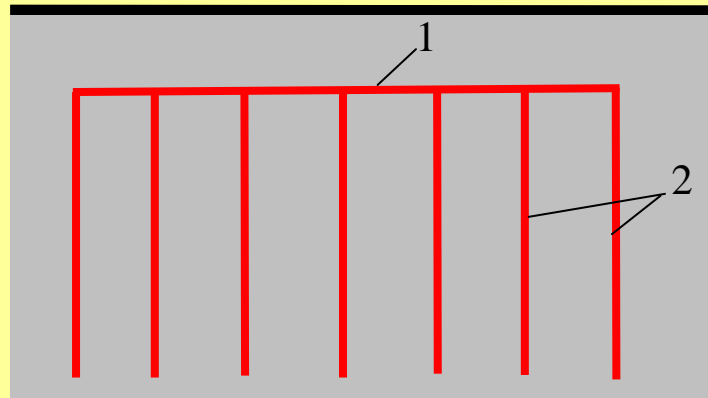
1- seadme maandatav osa, 2 –maandusjuht, 3 – maanduselektrood, 4 – kohalik maa

Maandamise põhimõtted on hästi kirjeldatud EETELi poolt välja antud teaberaamatus „Maandamine ja potentsiaaliühtlustus”, mille autor professor Endel Risthein.

Maanduselektroode võib olla üks või mitu, mis omavahel ühendatakse kokku. Eesti keeles kasutatakse nii ühest kui ka mitmest elektroodist koosneva süsteemi kohta terminit **maandur**.

Maanduselektroodid ei pruugi paikneda ainult pinnases, vaid ka nt betoonis või muus materjalis, mis pinnasega kokku puutub. Eriline koht selliste maandurite seas on **vundamendimaanduritel**, mis painevad ehitiste vundamentides.

Maanduselektroodid võivad olla **rõhtsad**, nagu joonisel 4.37 või **vertikaalsed** nagu joonisel 4.38.

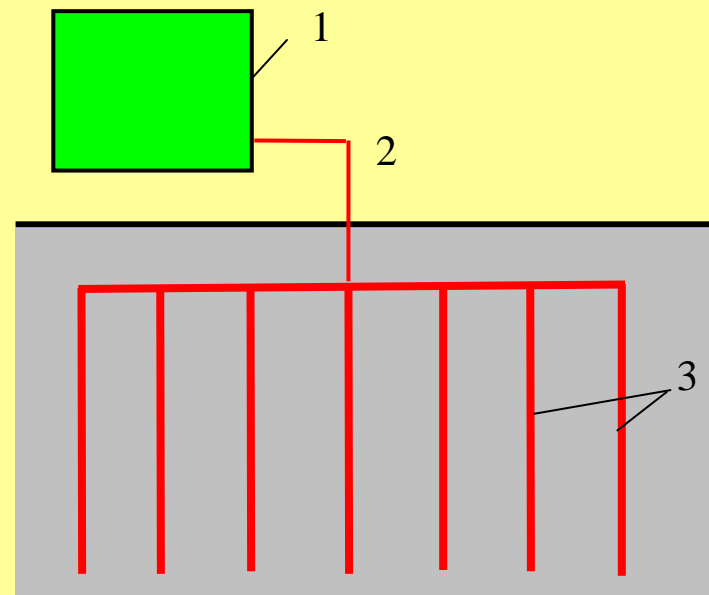


Joonis 4.38. Vertikaalsete maanduselektroodidega maandur
1- ühendusjuht, 2 - maanduselektroodid

Maanduselektroodid valmistatakse enamasti **tsingitud terasest**, harvem vasetatud või roostevabast terasest, sest nad peavad olema korrosioonikindlad.

Peale eelkirjeldatud **tehismaandurite** võidakse kasutada ka **loomulikke maandureid** - puurkaevutorusid, ehitiste pinnases paiknevaid metalltarindeid, õhuliinimastide vundamente jms. Kasutamist leiavad ka tehis- ja loomulike maandurite kombinatsioonid. Loomulike maandurite kasutamiseks ei soovitata kasutada veetorusid, sest need võivad sisaldada isoleervahemikke ja kujutada endast sel juhul elektrilöögiohu allikat.

Maandusjuhist (või –juhtidest) ja maandurist koosnevat süsteemi nimetatakse **maanduspaigaldiseks**.



Joonis 4.39. Maanduspaigaldis

1- seadme maandatav osa, 2 –maandusjuht, 3 – maanduselektroodid

Oma **otstarbelt** jaotatakse maandusseadmed järgmiselt:

1. **Kaitsemaandus**, mis seisneb võrgu, paigaldise või seadme ühe või mitme punkti maandamises elektriohutuse eesmärgil,
2. **Talitusmaandus**, mis seisneb võrgu ühe või mitme punkti maandamises nii elektriohutuse kui ka normaaltalitluse tagamise eesmärgil,
3. **Võrgumaandus**, mis seisneb võrgu, paigaldise või seadme ühe või mitme punkti maandamises elektriohutuse eesmärgil.
4. **Töömaandus**, mis seisneb normaaltalitusel pinge all olevate, kuid pinge alt vabastatud osade maandamises selliselt, et tööd saab sooritada ilma elektrilöögi ohuta.
5. **Piksekaitsemaandus**, mis kuulub põhimõtteliselt küll kaitsemaanduste hulka, kuid mida tavaliselt vaadeldakse omaette maandusliigina ja mis on vajalikvälguvoolu hajutamiseks maasse.

Kui elektripaigaldise mingi pingestatud osa ja maandatud pingealti osa vahel toimub isolatsioonirike, tekib rikkekohas **maaühendusvool**, mis on määratud vooluahela kogutakistusega e. **maandustakistusega**.

Maandustakistus oleneb

- maanduri enda takistusest maa suhtes ehk **valgumistakistusest**, mis sõltub ehitusviisist ja mõõtmest ning pinnase eritakistusest,
- mmanduspaigaldisega ühenduses olevate ja enamasti maanduri osaks loetavate maanduritoimega kaablite ja kaabelliinide pikimaandurite olemasolust.

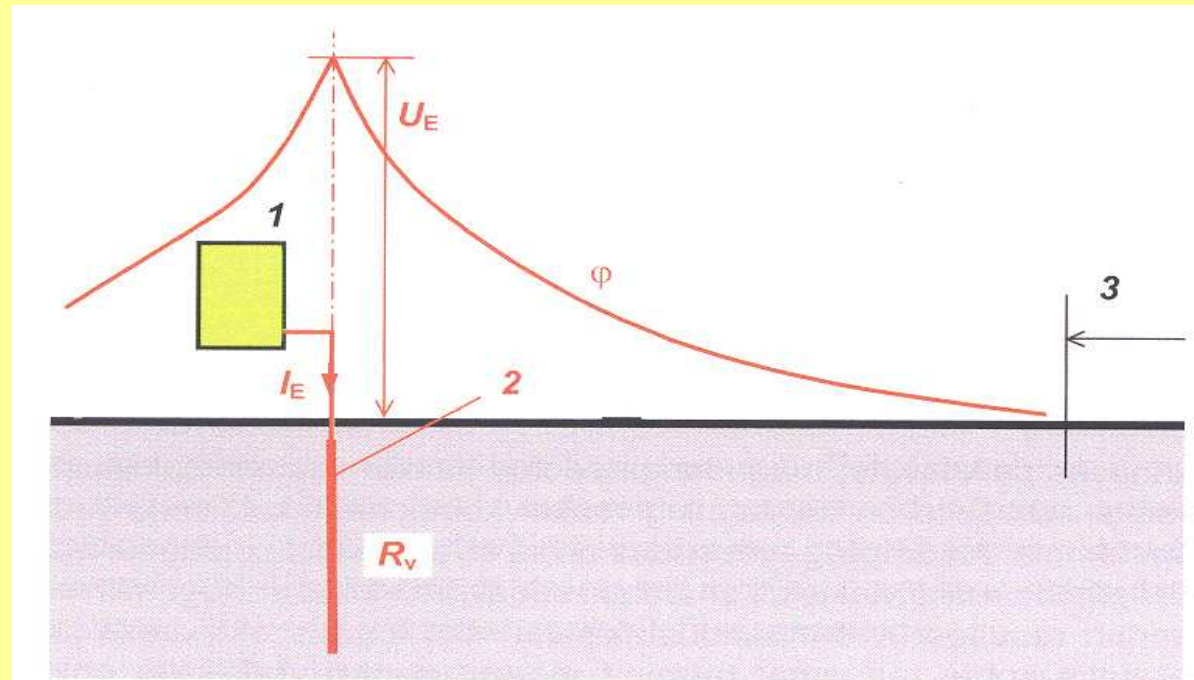
Madalpingevõrkudes võib mitme kokkuühendatud maanduri resulteerivat takistust lugeda **aktiivseks** ja seepärast kasutatakse sel juhul terminit **maandus-aktiivtakistus** ehk **maandusresistents**.

Kõrgepingevõrkudes võib takistuse reaktiivkomponent olla samas suurusjärgus aktiivkomponendiga või olla sellest isegi suurem ning seda peab arvestama. Seepärast kasutatakse terminit **maandus-näivtakistus** ehk **maandusimpedants**.

Maandusvool I_E ja maandustakistus Z_E määravad maandatava seadme maanduspinge U_E

$$U_E = I_E Z_E .$$

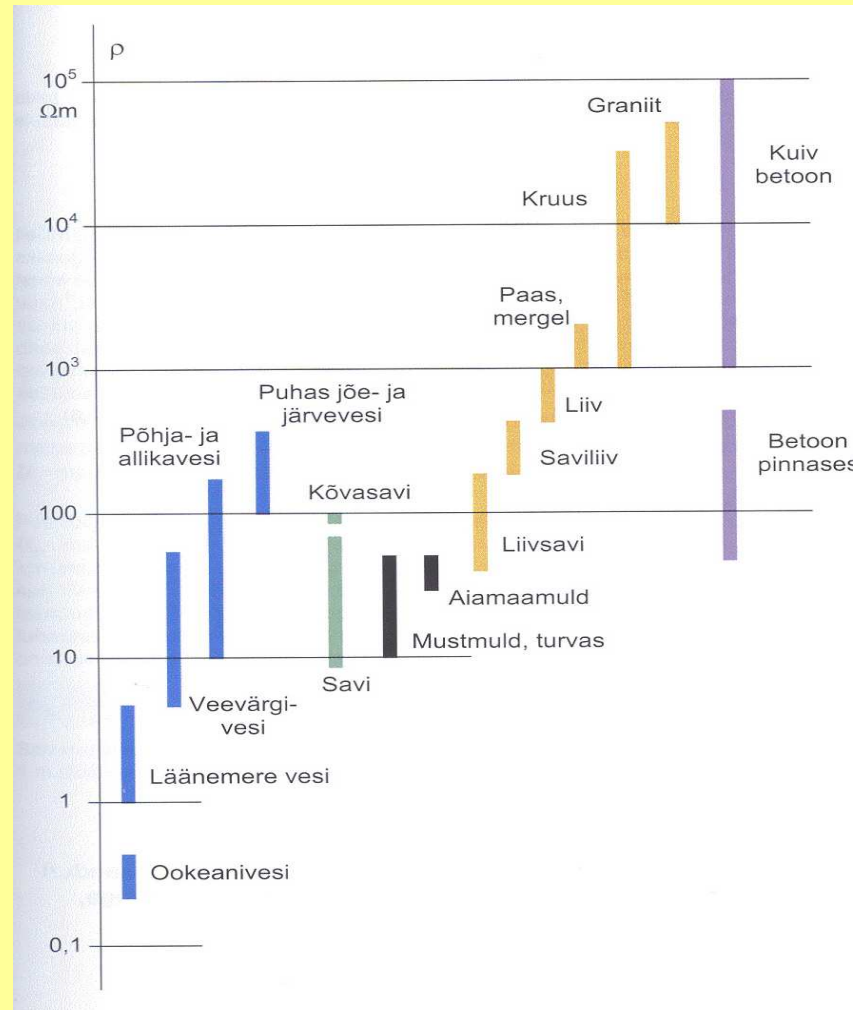
Märkus: indeks E tuleneb ingliskeelsest sõnast *earth, maa*.



Joonis 4.40. Potentsiaaljaotus maapinnal ühest varraselektroodist koosneva maanduri korral
 1- maandatud osa, 2 – maanduselektrood, 3 – nullpotentsiaaliala, I_E - maandusvool, U_E – maanduspinge,
 2- R_v - valgumistakistus, ϕ – maapinna potentsiaal

Voolu valgumisel maasse tekib maapinnal elektriline potentsiaal, mis maandurist kaugenemisel (voolu *valgumisalal*) hüperpoolitaoliselt väheneb. Maa-ala, millel potentsiaali saab lugeda nulliks, nimetatakse **nullpotentsiaalialaks**.

Valgumisala ulatus ja potentsiaalijaotuse iseloom olenevad maanduri ehitusest, paigaldamissugavusest, pinnase eritakistusest ja maanduspinge väärtusest. Ligikaudselt võib öelda, et tavaliste maaühendusvoolude korral ulatub valgumisala maanduri äärmisest elektroodist umbes 20 m kaugusele.



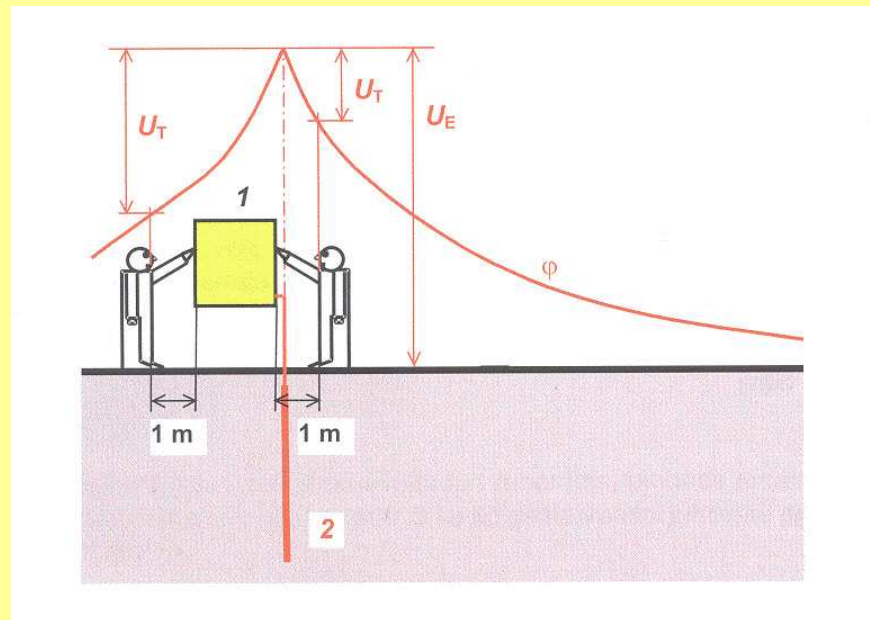
Joonis 4.41. Pinnase, vee ja betooni eritakistuse väärtusi

Puute- ja sammupinge

Kui elektripaigaldise maandatud osa satub nt. isolatsioonirikke tõttu pingele alla, tekib selle osa ja maapinna eri punktide vahel vastavalt maapinna potentsiaali φ jaotusele pinge

$$U = U_E - \varphi .$$

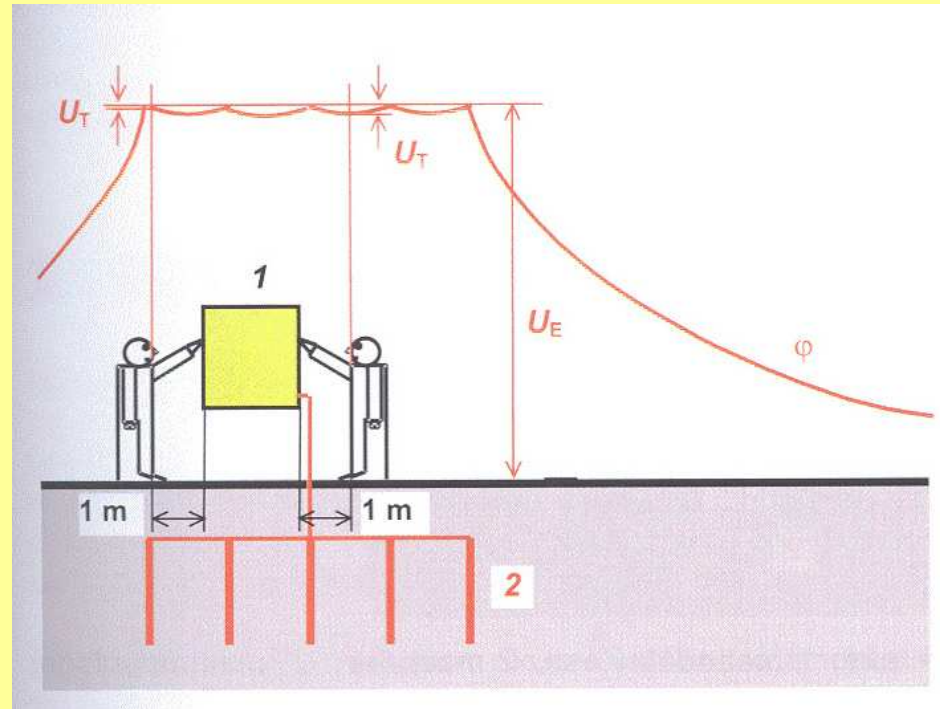
Pinget, mille alla võib sattuda inimene, kes asub maandatud seadmest kaugusel, milleslt ta saab seda seadet puutada, nimetatakse **puutepingeks**. Avutuslikuks rõhtkauguseks võetakse puutepinge määramisel 1 m ning eeldatakse, et vool läbib inimese keha käest jalgadesse.



Joonis 4.42 Puutepinge ühest maanduselektroodist koosneva maanduri korral

1- maandatud osa, 2 –maanduselektrood, U_E - maanduspinge, U_T – puutepinge, φ – maapinna potentsiaal

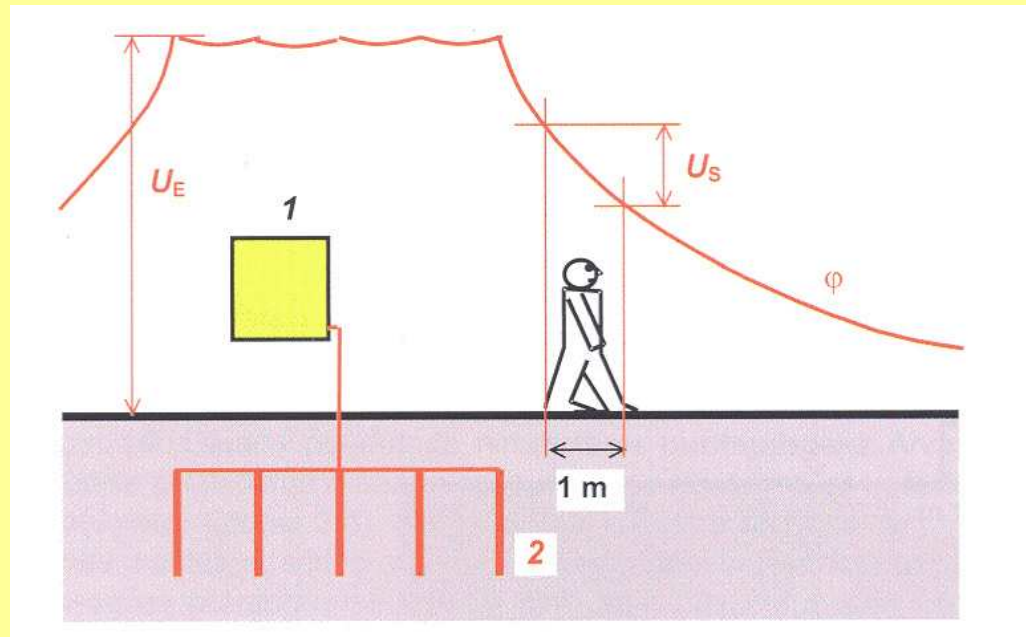
Üheelektroodilise maanduri korral võib puutepinge olla suhteliselt kõrge. Puutepinget saab vähendada mitmest elektroodist koosneva maanduri kasutamisega, mis tasandab maapinna potentsiaali maanduri kohal. Samal põhimõttel võidakse kasutada spetsiaalseid rõhtsaid potentsiaalitasanduselektroode.



Joonis 4.43 Puutepinge mitmest maanduselektroodist koosneva maanduri korral
1- maandatud osa, 2 –maanduselektrood, U_E - maanduspinge, U_T – puutepinge, φ – maapinna potentsiaal

Puutepinge määramisel eristatakse **arvutuslikku puutepinget** (ehk puute-eelset pinget) U_{ST} , mis tekib maandatud osa ja maapinna arvutusliku punkti vahel, kui inimene nendega kontaktis ei ole, ja **tegelikku puutepinget** U_T , mis rakendub inimesele puutumise ajal. Viimane on mõnevõrra väiksem arvutuslikust puutepingest ja sõltub inimese elektrilisest takistusest. Arvutusliku puutepinge enamalt kestvalt lubatavat väärtust nimetatakse **lubatavaks puutepingeks** (tähis U_{Tp} või U_L). Madalpingelistes vahelduvvoolupaigaldistes on enamasti $U_{Tp} = 50 \text{ V}$.

Sammupingeks U_S loetakse maanduspinge osa, mille alla võib sattuda inimene 1 m pikkuse sammu korral, eeldades, et vool läbib inimese keha jalast jalga.



Joonis 4.44. Sammupinge teke.

1- maandatud osa, 2 –maanduselektrood, U_E - maanduspinge, U_S – sammupinge, φ – maapinna potentsiaal

Maandurite ehitus

Üldnõuded

Maandurite ehitusviisi ja maanduselektroodide valikul on vaja silmas pidada, et

- maanduri maandustakistus (valgumistakistus) alati vastaks elektripaigaldise kaitse- ja talitlusnõuetele või mõlematele,
- maandurit läbiv maaühendusvool ei kutsuks esile ohtlikku pinget maandusjuhtidelega maandatud pingeldistel osadel,
- maanduri elemendid ei kuumeneks maaühendusvoolu toimel üle teatava lubatava piiri,
- maanduri materjal oleks mehaaniliselt piisavalt tugev ja peaks vastu kõigile ettenähtavatele välistoimetele, kaasaarvatud korrosioonile,
- maandur ei mõjutaks kahjulikult teisi maa-aluseid metalltarindeid, torustikke jms.

Mehaanilise tugevuse, korrosioonikindluse ja korrodeeriva toime vältimise nõudeid rahuldavad kõige paremini tsingitud terasest valmisvatatud maanduselektroodidtsingikihi keskmise paksusega vähemalt 70 µm. Tugevasti korrodeeriva pinnase korral võidakse kasutada roostevabast terasest elektroode, vajadusel ka vasest või vasetatud elektroode.

Rõhtelektroodidega maandurid

Rõhtelektroodid on **otstarbekad**, kui

- piisavalt väikese maandustakistuse saamine sel viisil on suhteliselt lihtne,
- pinnase sügavamate kihtide eritakistus on tunduvalt suurem kui ülemistel kihtidel,
- pinnas on sügavamal kaljune või sedavõrd kivine, et maanduselektroodide paigaldamine sellesse on liigselt kulukas, raske või võimatu.

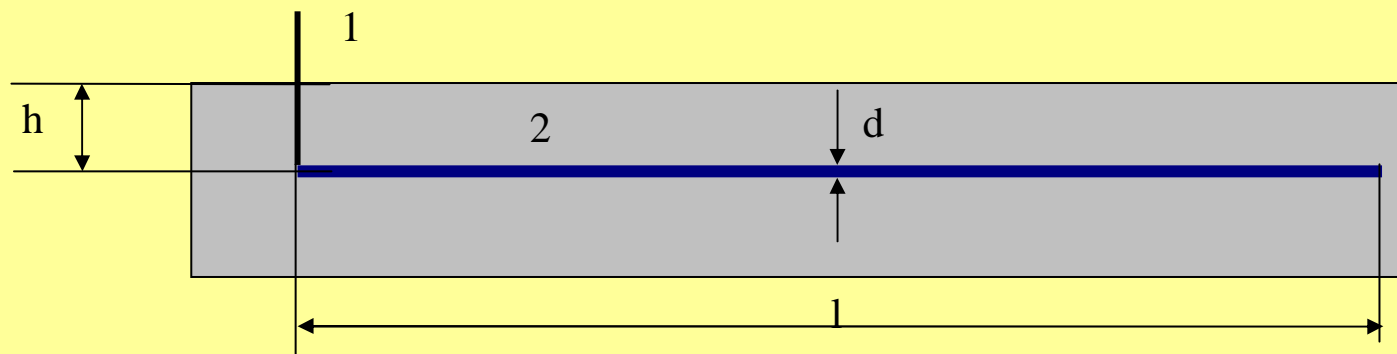
Vältimaks maandustakistuse liiga suuri muutusi olenevalt ilmast või aastaajast, asetatakse rõhtsad maanduselektroodid maapinnast enamasti 0,5 kuni 1 m sügavusele.

Kujunduselt võivad rõhtmaandurid olla

- ühe- või mitmekiirelised,
- ringi- või mõne muu suletud kontuuri kujulised,
- võrgutaolised.

Kui paigaldussügavus on kuni 0,5 m, nimetatakse rõhtsaid maanduselektroode **pindelektroodideks**.

Materjal: levinum on tsingitud ribateras ristlõikega vähemalt 90 mm^2 ja paksusega vähemalt 3 mm. Kasutatakse ka tsingitud ümarterast läbimõõduga vähemalt 10 mm, ümarvaske ristlõike pindalaga vähemalt 25 mm^2 ja mitmekiulist vaskjuhet ristlõikega vähemalt 25 mm^2 ja kiu läbimõõduga vähemalt 1,8 mm. Soovitav paigaldada **serviti**, sest siis on kontakt pinnasega parem ja valgumistakistus väiksem. Maanduselektroodid ümbritsetakse kive mittesisaldava ja tihendatud pehme pinnasega (muld, liiv, sav).



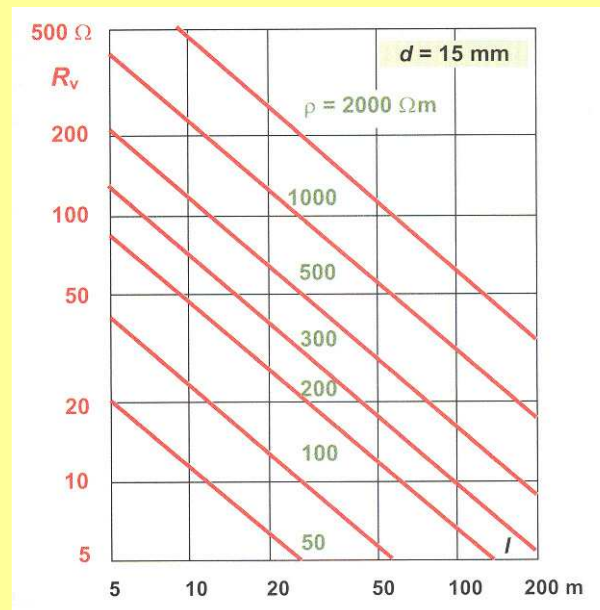
Joonis 4.45. Ühest maanduselektroodist koosneva rõhtmaanduri paigalduspõhimõte
1- maandusjuht, 2 - maanduselektrood

Lihtsaim rõhtmaandur koosneb ühestainsast sirgest rõhtsast maanduselektroodist. Maapinna potentsiaali tasandamise eesmärgil paigaldatakse maanduselektroodid hoonete seintest vähemalt 0,5 m kaugusele. Homogeense pinnase ja nullpaigaldussügavuse ($h=0$) puhul saab sellise maanduri valgumistakistust arvutada valemiga

$$R_v = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d},$$

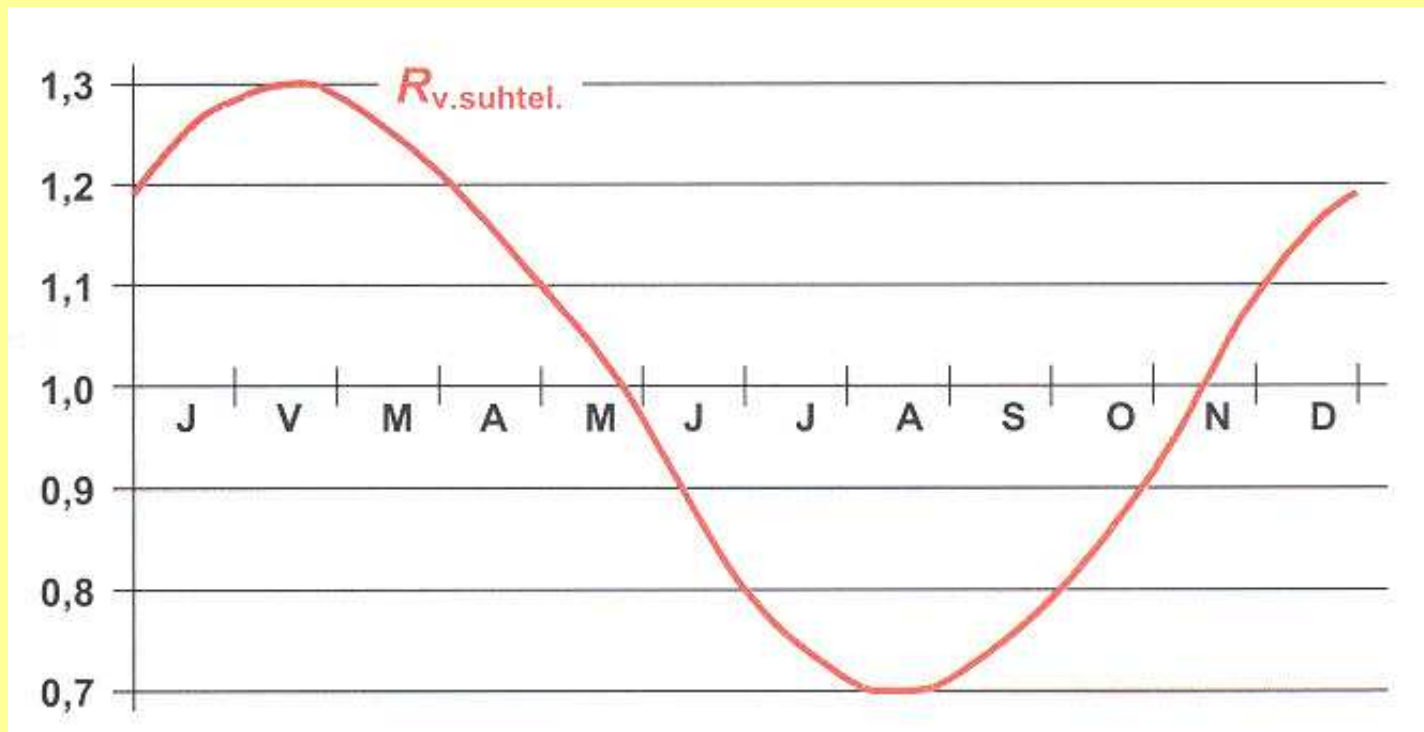
milles ρ – pinnase eritakistus Ωm ,
 l – elektroodi pikkus m,
 d – ümarelektroodi läbimõõt või ribaelektroodi pool laiust m.

Valgumistakistuse leidmiseks kasutada joonisel 4.47 toodud graafikuid, mis põhinevad eeltoodud valemil.



Joonis 4.47. Rõhtsa sirge maanduselektroodi valgumistakistus R_v homogeenses pinnases sõltuvalt elektroodi pikkusest l ja pinnase eritakistusest ρ

Tegelik valgumistakistus erineb eeltoodud ideaalsest, kuna pinnas ei ole kunagi homogeenne ja pinnase eritakistus võib kõikuda ca 30 % üles- või allapoole sõltuvalt aastajast tingitud pinnase niiskusest. Pealegi ei ole tegelik paigaldussügavus kunagi 0.



Joonis 4.48. Rõhtmaandurite valgumistakistuse muutumine aasta jooksul

Peale eritakistuse ajalise ebahütluse tuleb arvestada ka seda, et vool jaguneb pikkade rõhtelektroodide korral ebahütlaselt. Kõige selle tõttu on eeltoodud valemil põhinevate arvutuste viga 10 ..20 %. Seetõttu pakutakse rõhtmaanduse valgumistakistuse arvutamiseks lihtsustatud valemit

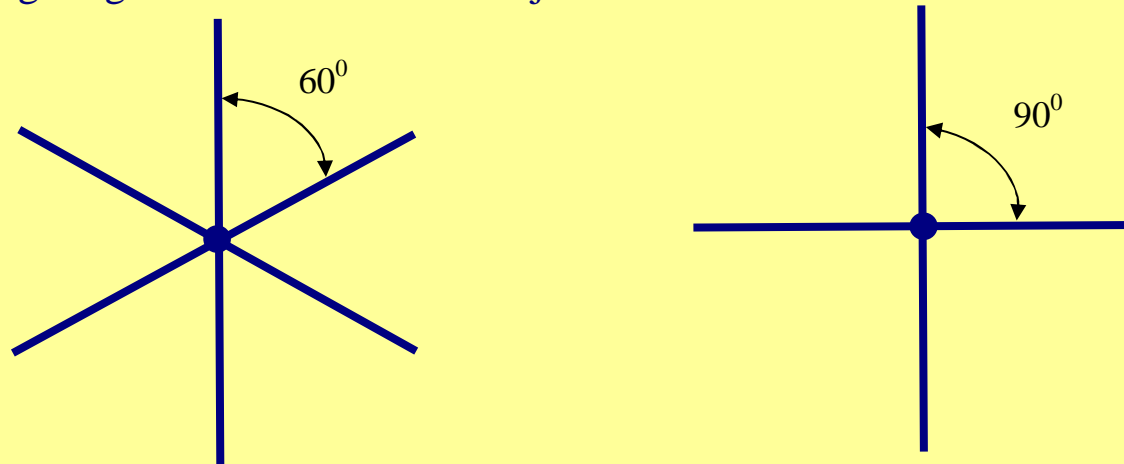
$$R_v = \frac{k\rho}{l},$$

milles tegur oleneb elektroodi pikkusest l :

$k = 2$, kui $l \leq 10$ m,

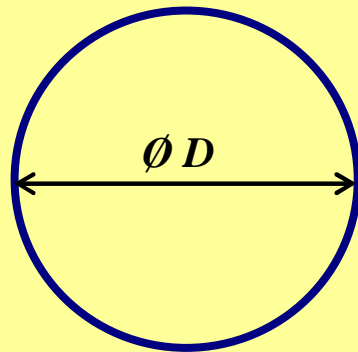
$k = 3$, kui $l > 10$ m.

Liiga pika elektroodi kasutamine pole efektiivne ja seepärast ei kasutata omaette elektroode pikkusega üle 50 m. Kui elektroodid on paralleelselt, siis peab nende vahekaugus olema vähemalt 5 m, et nad ei segaks voolude valgumist maasse. Rõhtelektroode võib paigutada ka **kiirtena**. Nurk kahe naaberkiire vahel peab olema vähemalt 60° . Kiirte arv saab seega olla 2...6, kõige sagedamini kasutatakse neljakiirelist maandurit.

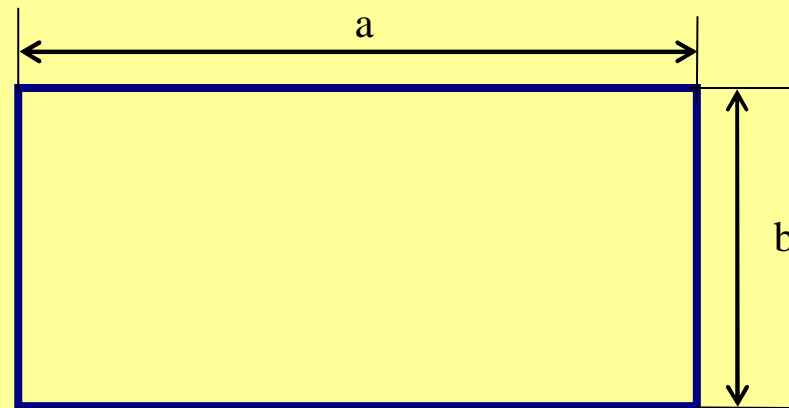


Joonis 4.49. Mitmest kiirest koosneva rõhtmaanduri pealtvaade

Ringi või muu kinnise kontuuri taolise rõhtmaanduri valgumistakistust võib arvutada samade valemite järgi, lugedes elektroodi arvutuslikuks pikkuseks kontuuri ümbermõõdu



$$l = \pi D$$



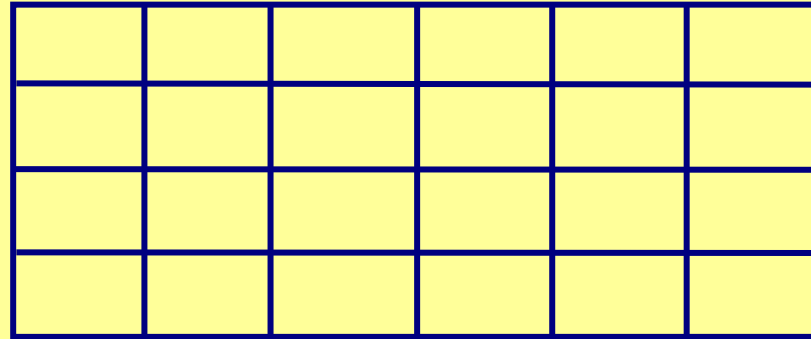
$$l = 2(a + b)$$

Joonis 4.50. Kontuur-rõhtmaandurite näiteid

Lisanõuded: $D \geq 2$ m, $b \geq 2$ m.

Kontuurmaandureid kasutatakse sageli **potentsiaalitasanduse** eesmärgil.

Võrkmaandurid on kasutusel suure pindalaga välispaigaldistes (kõrgepingelistes välisalajaamades, -jaotlates jm). Nad võimaldavad kergesti külge ühendada hajutatud seadmete maandusjuhte ja tasandavad suures ulatuse maapinna potentsiaali. Võrhu silma laius ühes suunas ei tohi olla üle 20 m.



Joonis 4.51. Võrkrõhtmaanduri pealtvaade

Võrkmaanduri maandustakistuse võib arvutada näiteks valemiga

$$R_m = \frac{\rho}{2\sqrt{A}},$$

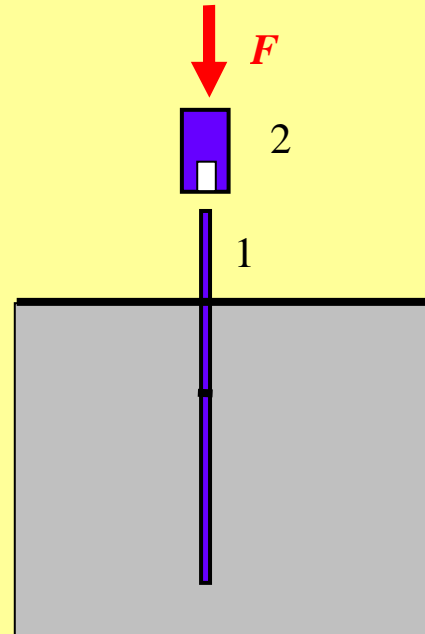
milles A on võrkmaanduri pindala m^2

Püstelektroodidega maandurid

Püstmaanduselektroodid on otstarbekad, kui

- pinnase sügavamate kihtide eritakistus on tunduvalt väiksem kui ülemistel kihtidel,
- pinnas on küllalt suure sügavuseveni sedavõrd pehme ega sisalda kive vms takistusi, et maanduselektroodide sisselöömine või -puurimine ei tekita raskusi.

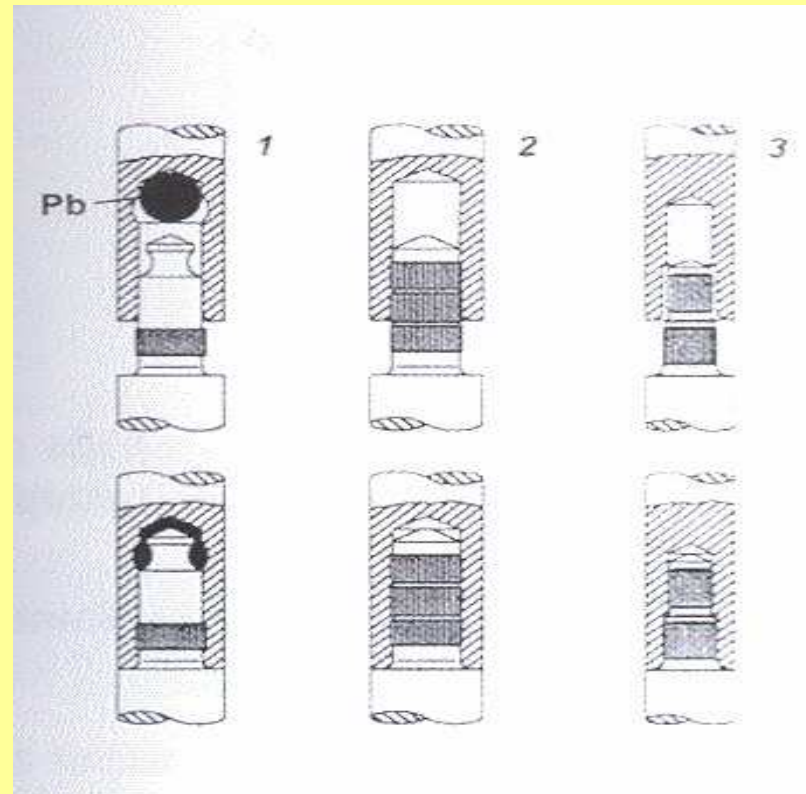
Kuna sügavamate pinnasekihtide eritakistus peaaegu üldse ei olene ilmast ega aastaajast (muutus mitte üle $\pm 5\%$), võib sellise maanduri valgumistakistust lugeda praktiliselt muutumatuks ja arvutustulemusi tunduvalt usaldusväärsemateks.



Joonis 4.52. Püstise varraselektroodi koostamine lülidest maasselöömise käigus.
1 – elektroodilüli, 2 – karastatud terasest kaitsepea (vasara või rammi kasutamisel), F – toimiv jõud

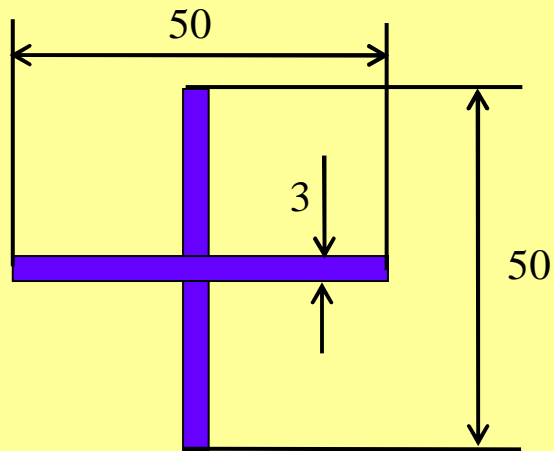
Püstelektroodid koostatakse enamasti tehastootelistest jätkatavatest ümarvarrastest läbimõõduga 20...25 mm ja pikkusega 1...2 m, mis lüüakse maasse vasara, rammi või vibraatori abil. Teoreetiline elektroodi pikkus võiks olla kuni paarkümmend meetrit, tegelikult aga kuni 15 m, ca 10 üksikelektroodi.

Varda materjalina kasutatakse tugevat **eriterast**, mis on enamasti **tsingitud**, mõnel juhul ka **vasetatud**. Keemiliselt aktiivses pinnases kasutatakse roostevabast terasest elektroode.

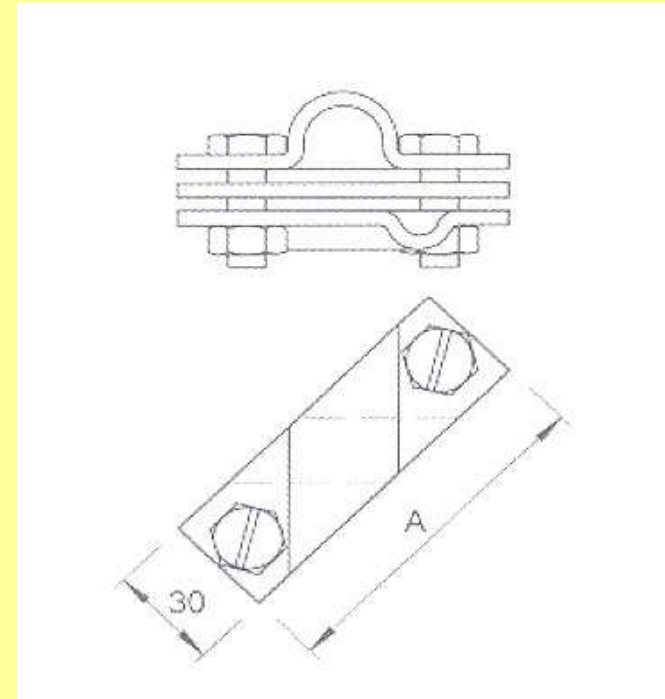


Joonis 4.53. Varrasmaandurite lülid ühendamise põhimõtted. Ülal liitekoht ühendamise käigus, all valmis liide
1 – pliitihendiga liide, 2 – rihvelpressliide, 3 – roostevabast terasest rihvelpressliide

Väga pehme pinnase korral võidakse kasutada terviklikke kuni 10 m pikkusi varraselektroode, mis varustatakse puurotsikuga ja mis puuritakse maasse. Võidakse kasutada ka ristikujulise ristlõikega kuni 3 m pikkusi elektroode.



Joonis 4.54. Maandusvarda tüüpne ristikujuline ristlõige



Joonis 4.55. Varraselektroodi ja elektroodidevahelise ribaterase ühenduslüli (OBO Bettermann)

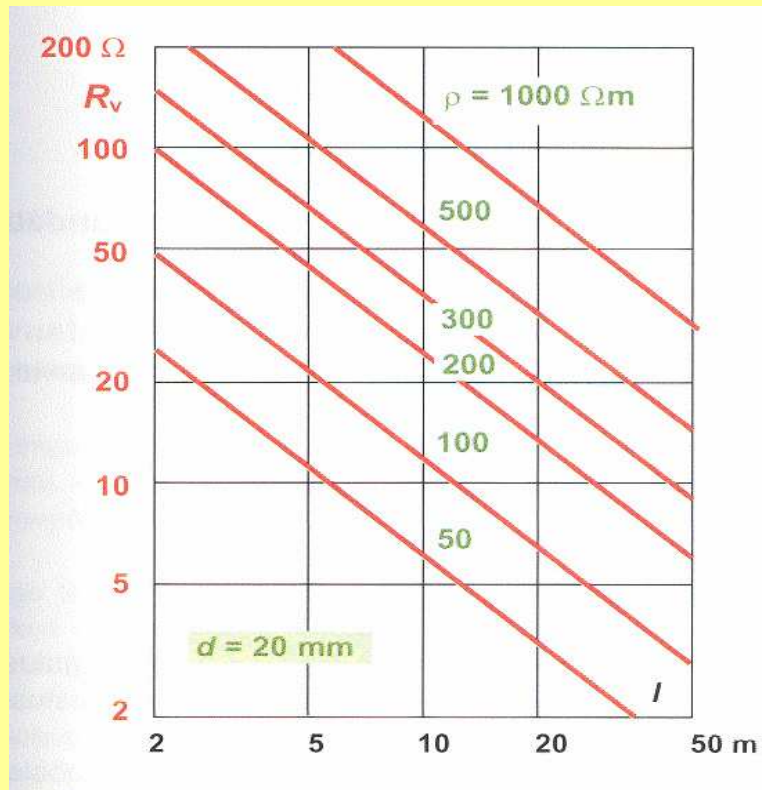
Mitme varraselektroodi ühendamiseks kasutatakse samast materjalist ja sama pinnakattega ühendusjuhti, mis kulgeb elektroodide ülemise otsa kõrgusel, tavaliselt 0,7...1 m sügavusel. Elektroodi ja ühendusjuhi omavaheliseks ühendamiseks aksutatakse spetsiaalseid standardklamberliiteid, mis tagavad kõrge töökindluse.

Varraselektroodi valgumistakistust homogeense pinnase puhul saab arvutada valemiga

$$R_v = \frac{\rho}{\pi d} \ln \frac{2l}{d},$$

milles ρ – pinnase eritakistus Ωm ,
 l – elektroodi tegev pikkus m,
 d – elektroodi läbimõõt m.

NB! Elektroodi tegev pikkuse all mõistetakse pikkuse seda osa, mis paikneb hästijuhtivas pinnasekihis.



Joonis 4.56. Püstise varraselektroodi valgumistakistuse R_v sõltuvus homogeenses pinnases elektroodi tegev pikkusest l ja pinnase eritakistusest ρ

Ka sin võidakse valgumistakistuse arvutamiseks kasutada ligikaudset valemit

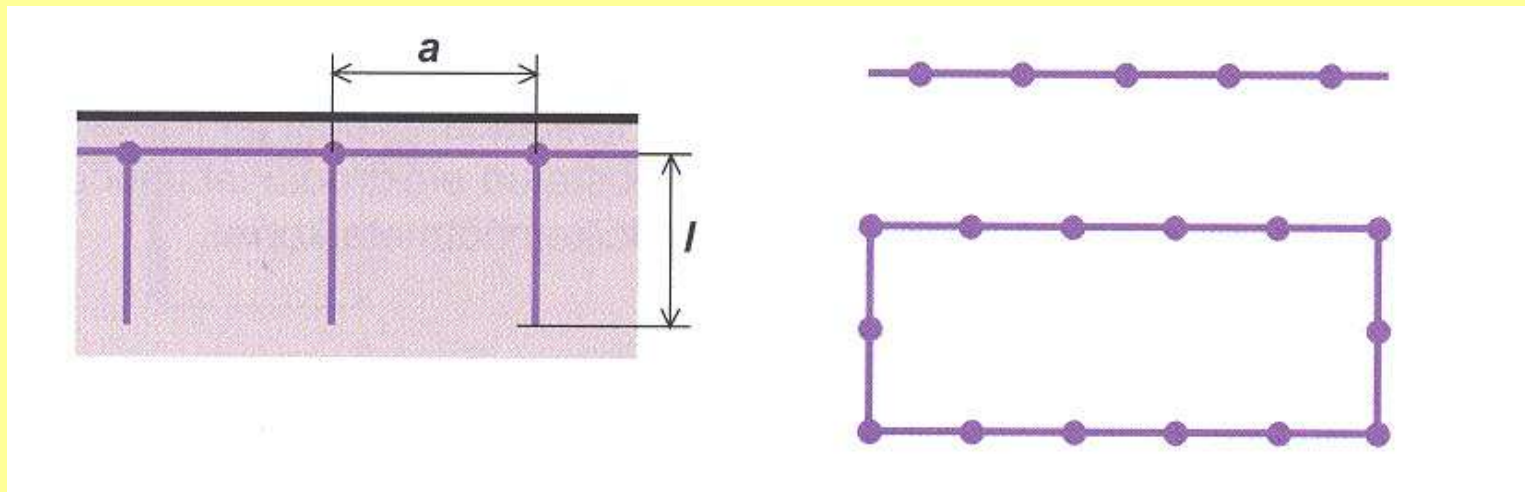
$$R_v = \frac{k\rho}{l},$$

milles tegur oleneb elektroodi tegev pikkusest l :

$k = 1$, kui $l \leq 10$ m,

$k = 1,5$, kui $l > 10$ m.

Maanduri **valgumistakistuse vähendamiseks** kasutatakse mitut omavahel ühendatud varraselektroodi.



Joonis 4.57. Mitmest varraselektroodist koosnevad maandurid
Vasakul lõige, paremal pealtvaade

□

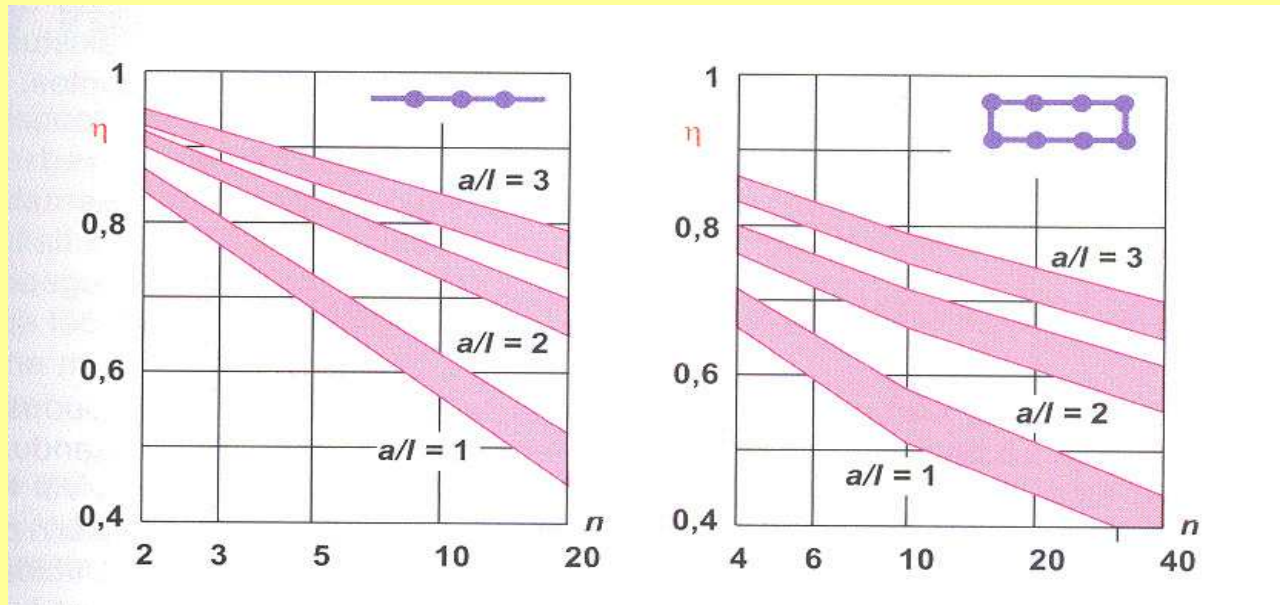
Mitmevõrdalise maanduri valgumistakistus

$$R_{v.res} = \frac{R_v}{\eta n},$$

kus R_v – ühe elektroodi valgumistakistus,

n – elektroodide arv,

η – elektroodide kasutegur, mis sõltub elektroodide arvust, nende paigutusest, elektroodide vahekaugusest ja pinnase eritakistusest.



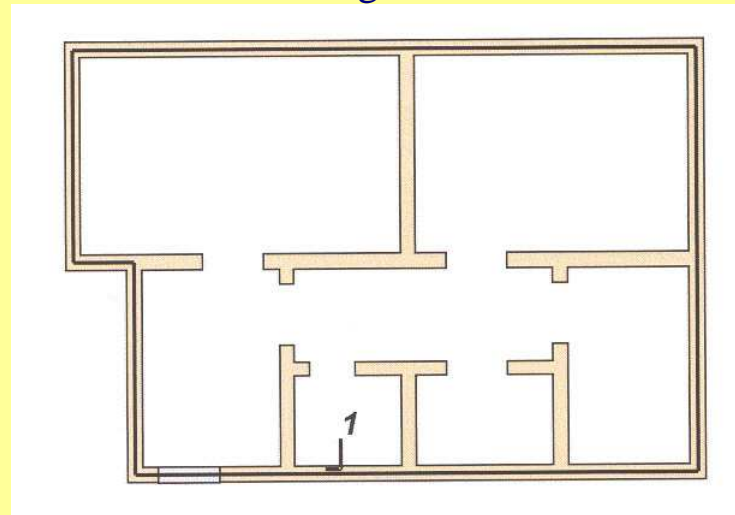
Joonis 4.58. Varraselektroodide kasuteguri sõltuvus elektroodide arvust, elektroodide suhtelisest vahekaugusest ja pinnase eritakistusest.

Vundamendimaandurid

Väljaspool ehitisi paiknevate rõht-, püst- või kaldmaandurite asemel on tunduvalt otstarbekam kasutada **vundamendimaandurit**, mis nõuetekohasel paigaldamisel on

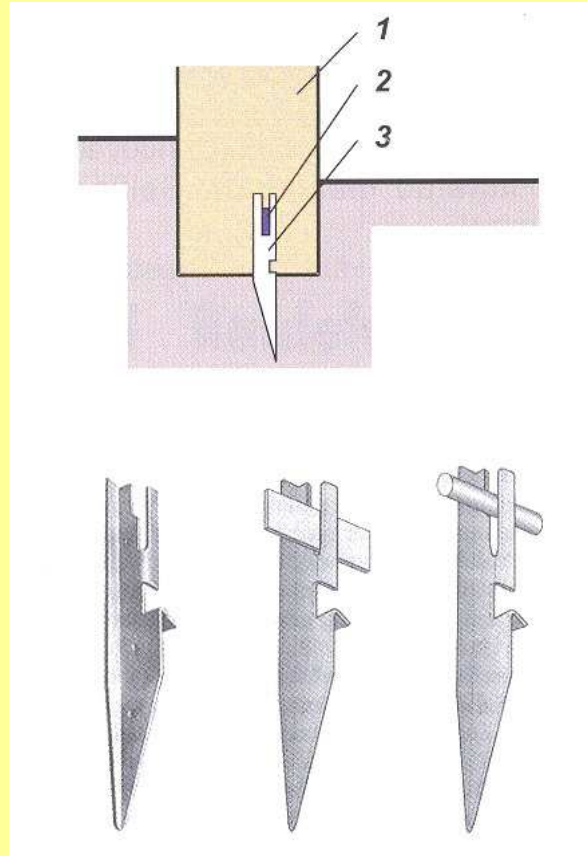
- kindlalt kaitstud välistoimete eest,
- peaaegu muutumatu valgumistakistusega,
- väga töökindel,
- lihtne paigaldada, odav.

Vundamendimaandur kujutab endast rõhtsat lattelektroodi, mis paigaldatakse suletud kontuurina betoon- või terasbetoonvundamendi sisse hüdroisolatsioonist allapoole ja varustatakse sisestuskilbi asukohas maandus-allaviiguga ja vajadusel ühenduskohtadega piksekaitseallaviikude külgeühendamiseks.



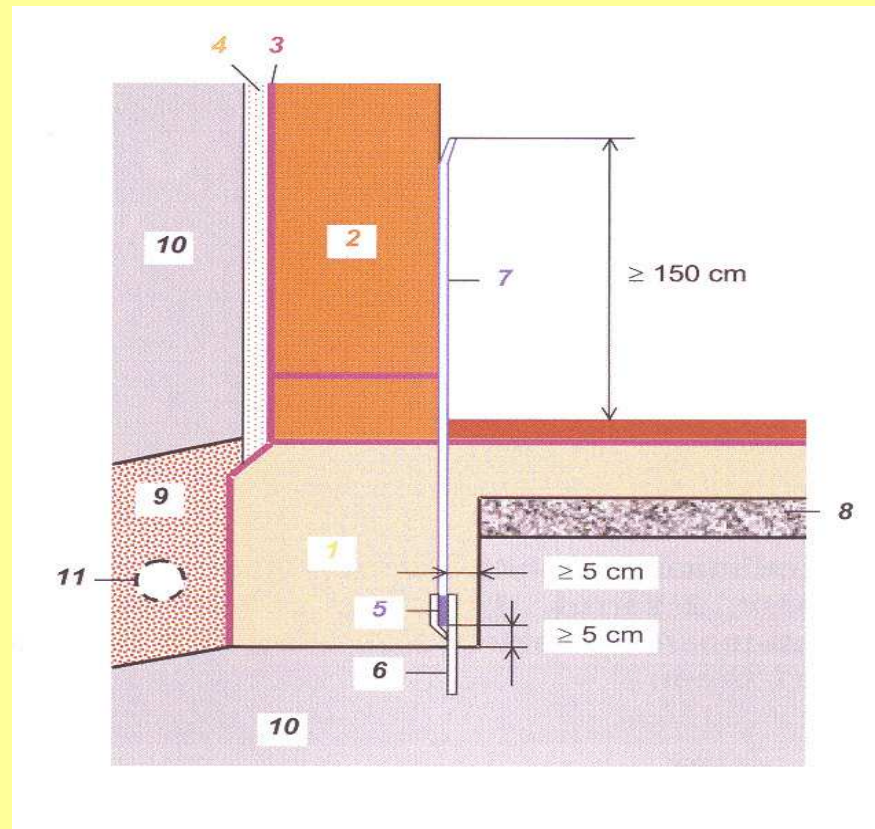
Joonis 4.59. Maanduskontuur vundamendimaanduri kasutamisel
1 - allaviigulatt

Maanduselektroodi paigalduspõhimõte betoonvundamendis on esitatud joonisel 4.60



Joonis 4.60. Rõhtsa latt-maanduselektroodi paigalduspõhimõte betonelemendis
1- vundament, 2 – maanduselektrood, 3 - kandevai

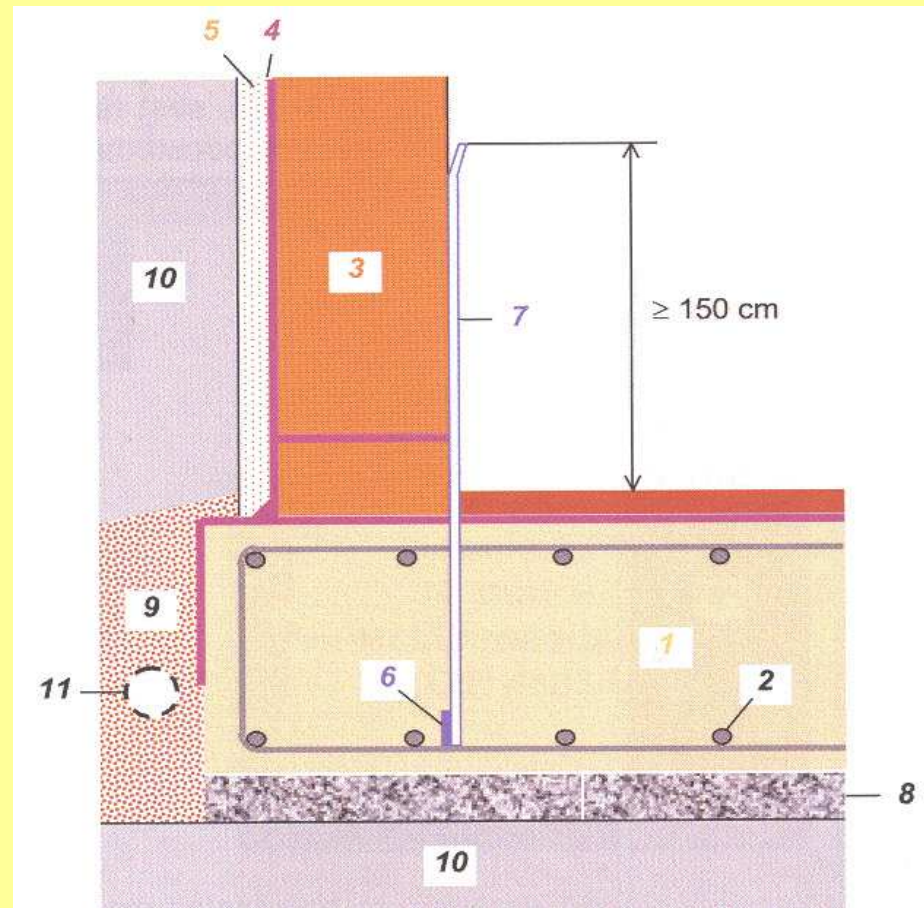
Maanduse teraslatt (vähemalt 30 mm x 3,5 mm) kinnitatakse serviti standardsetele kandevaiadele pikkusega 25 või 40 cm . Kaugus vundamendi tallast ja äärest peab olema vähemalt 5 cm. Vundamendi valamisel peab elektrood saama täielikult ümbritsetud betoonist. Suurete põhipinnaga hoonete (tööstushoonete) puhul tuleb kasutada potentsiaalide ühtlustamise eesmärgil lisa-rõhtelektroode. Tekkiva võrkmaanduse silma laius ei tohi ületada 20 m.



Joonis 4.62. Vundamendimaanduri ehitus sarrustamata betoonvundamendis

1- vundament, 2 –müüritis, 3 – hüdroisolatsioon, 4 –soojustusplaat, 5 – latt-maanduselektrood, 6 – kandevai, 7 – allaviik, 8 – tasanduskiht, 9 – kruus, 10 – pinnas, 11 – dreen

Sarrustatud vundamendis soovitatakse kasutada tsinkimata terast, sest kokkupuutekohtades tsinkimata sarrusega võivad mooduda galvaanilised paarid tsink-teras, mis kutsuvad esile aeglase keemilise korrosiooni.



Joonis 4.63. Vundamendimaanduri ehitus sarrustatud betoonvundamendis

1- vundament, 2- sarrus, 3 –müüritis, 4 – hüdroisolatsioon, 5 –soojustusplaat, 6 – latt-maanduselektrood,
7 – allaviik, 8 – tasanduskiht, 9 – kruus, 10 – pinnas, 11 - dren

Vundamendimanduri ligikaudne takistus arvutatakse valemiga:

$$R_v = 0,59 \frac{\rho}{\sqrt{A}},$$

kus

ρ - pinnase eritakistus Ωm

A – vundamendimaanduri kontuurisisene pindala m^2 .

Suurhoone võrk-vundamendimaanduri valgumistakistus on väiksem ja avaldub ligikaudse valemiga

$$R_v = 0,44 \frac{\rho}{\sqrt{A}}.$$

Vundamendimaanduri valgumistakistus on enamasti vahemikus 1..10 Ω .

Maandusjuhid

Maandusjuhid on **ette nähtud** maandatavate pingeldiste osade ja maandurite omavaheliseks ühendamiseks ja neil nõutakse neilt elektriohutuse ja töökindluse tagamiseks

- suurt töökindlust,
- piisavat mehaanilist tugevust,
- vastupidavust välistoimetele (korrosioon!),
- vastupidavust maandusvoolu elektrodünaamilisele ja soojuslikule toimele,
- selget äratuntavust.

Maandusjuht **võib olla ühendatud**

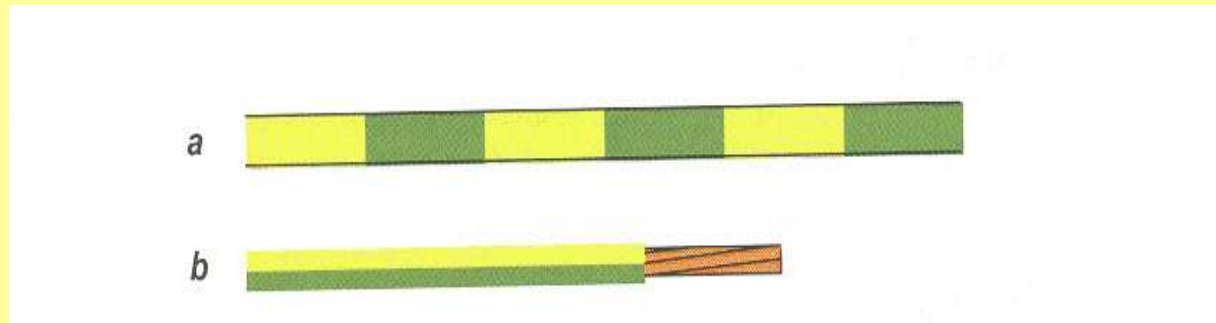
- elektriseadme neutraal- või muu klemmiga,
- vahetult maandatava pingelti osaga,
- ehitise peamaanduslatiga,
- piksekaitse-allaviiguga,
- teise maanduriga või teiste maanduselektroodidega.

Korrosiooniohu vähendamiseks peavad maandusjuhid olema samast matejalist nagu maandurid. Üleminekukohast õhust pinnasesse kuni maandurini tuleb maandusjuht katta **isoleerkattega** (nt termokahaneva isoleertoruga). Maandusjuhi isoleerimine võimaldab lisaks vähendada puute- ja sammupinget tema lähedal.

Maandusjuht tuleb elektriohutuse nõuete kohaselt tähistada **kolla-rohelise tunnusvärviga**.

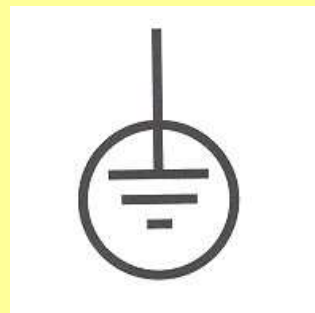
Paljasjuhtidele kantakse tunnusvärv ühepikkuste üksteisega külgnevate kollaste ja roheliste lõikudena.

Isoleerjuhtide isolatsioon peab olema kollase-rohelise-triibuline.



Joonis 4.64. Kaitsemaandusjuhtide värvitähistus paljasjuhtidele (a) ja isoleerjuhtidele (b)

Kui kaitsejuhti saab kergesti ära tunda, siis pole teda vaja kogu pikkuses tunnusvärviga tähistada. Tingimata tuleb ta aga otstes ja juurdepääsukohtades tähistada kas kolla-rohelise värvikombinatsiooniga või kaitsemaanduse tingmärgiga.



Joonis 4.65. Kaitsemaanduse tingmärk

Talitusmaandusjuhi tunnusvärvid ei ole satndarditud. Kui ta ei ole ühitatud kaitsemaandusjuhiga, ei tohi kasutada tähistamiseks kolla-rohelist värvikombinatsiooni ega ka kollast või rohelist üksinda. Neutraalpunkti talitusjuhi tähistamiseks on mõistlik kasutada neutraali tunnusvärvi – **helesinist**.



Joonis 4.66. Talitluskaitsemaandusjuhi tingmärgid
Vasakul – tavaline maandus, paremal – härevaba maandus

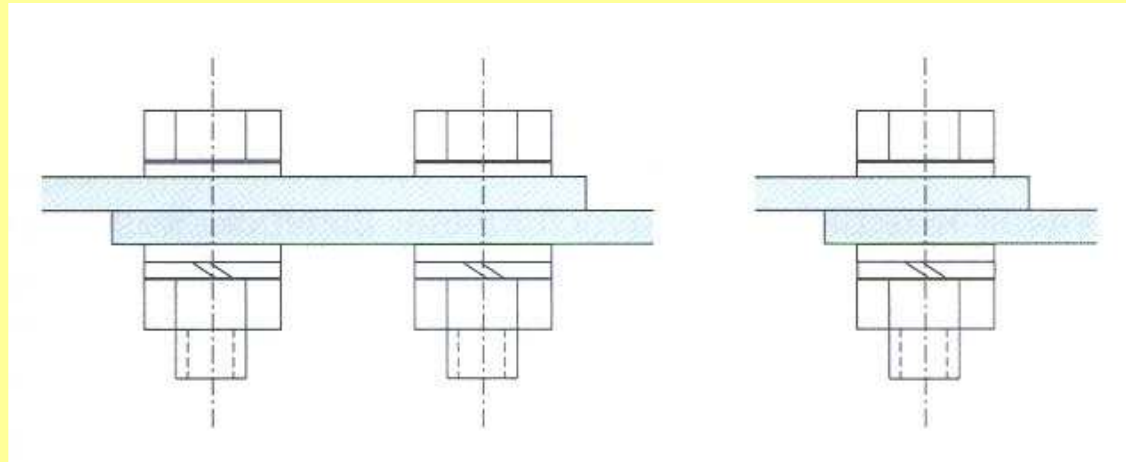
Maandusjuhtide vähimalt lubatud mehaaniline tugevus sõltub sellest, kas nad paiknevad õhus või pinnases.

Madalpingepaigaldise maandusjuhi mehaanilise tugevuse nõude kohane minimaalne lubatav ristlõige

Kaitse korrosiooni eest	Vähimalt nõutav ristlõige mm ²			
	Vask		Teras	
	Mehaaniliselt kaitstud	Mehaaniliselt kaitsmata	Mehaaniliselt kaitstud	Mehaaniliselt kaitsmata
Kaitstud	2,5	16	10	16
Kaitsmata	25		50	

Kõrgpingepaigaldistes nõutakse, et maandusjuhtide ristlõige terase puhul oleks vähemalt 16, alumiiniumi puhul vähemalt 35 ja terase puhul vähemalt 50 mm².

Maandusjuhtide **ühendamiseks** maanduritega kasutatakse enim poltklamberliiteid. Kui ei kasutata kaitsekatteid, võib ühendused teha keevitusega. Jätkamiseks kasutatakse standardsei poltliiteid, kusjuures ühe poldi korral peab see olema vähemalt M10, kahe poldi korral aga vähemalt M8.



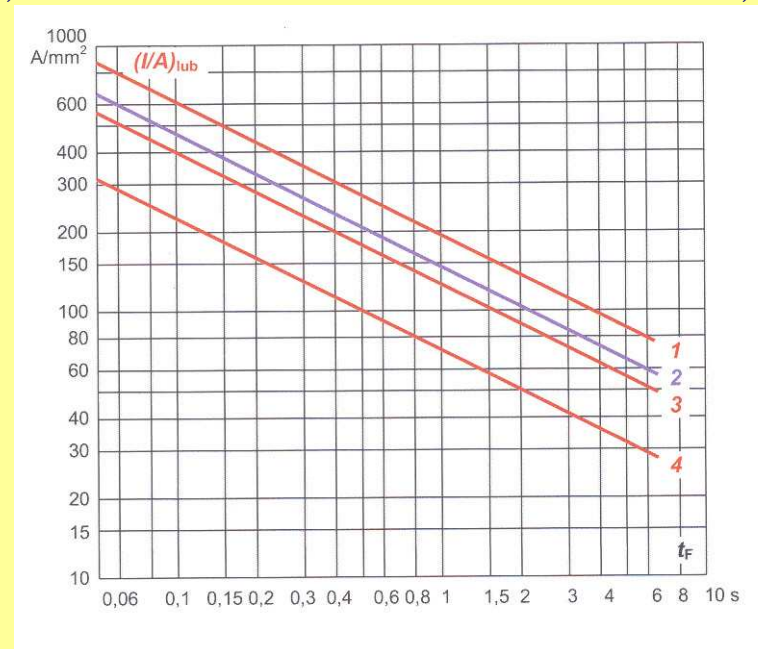
Joonis 4.67. Maandusjuhi jätkamine.

Vasakul kahe poldiga M8 või suuremaga, paremal ühe poldiga M10 või suuremaga

Lubata vool

Maandusjuhtide lubata vool **on määratud** nende kuumenemisega elektrivoolu toimel. Suur maahendusvool võib lisaks maandusjuhtidele esile kutsuda ka maanduselektroodide kuumenemise. Sellise **maalühise** puhul peab kiiresti rakenduma liigvoolukaitse. **Liigvoolu kestus** ei tohi madalpingepaigaldiste ületada 5 sekundit, kõrgepingepaigaldistes aga 1 sekundit. Sel juhul on tegu adiabaatilise protsessiga.

Tavaoludes, mil maandusjuht algab õhus ja lõpeb maanduri juures pinnases ning arvutuslik algtemperatuur on $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, lubata lõpptemperatuur aga $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, saadakse maalühisel lubata voolutihedus, mis on esitatud joonisel 4.68.

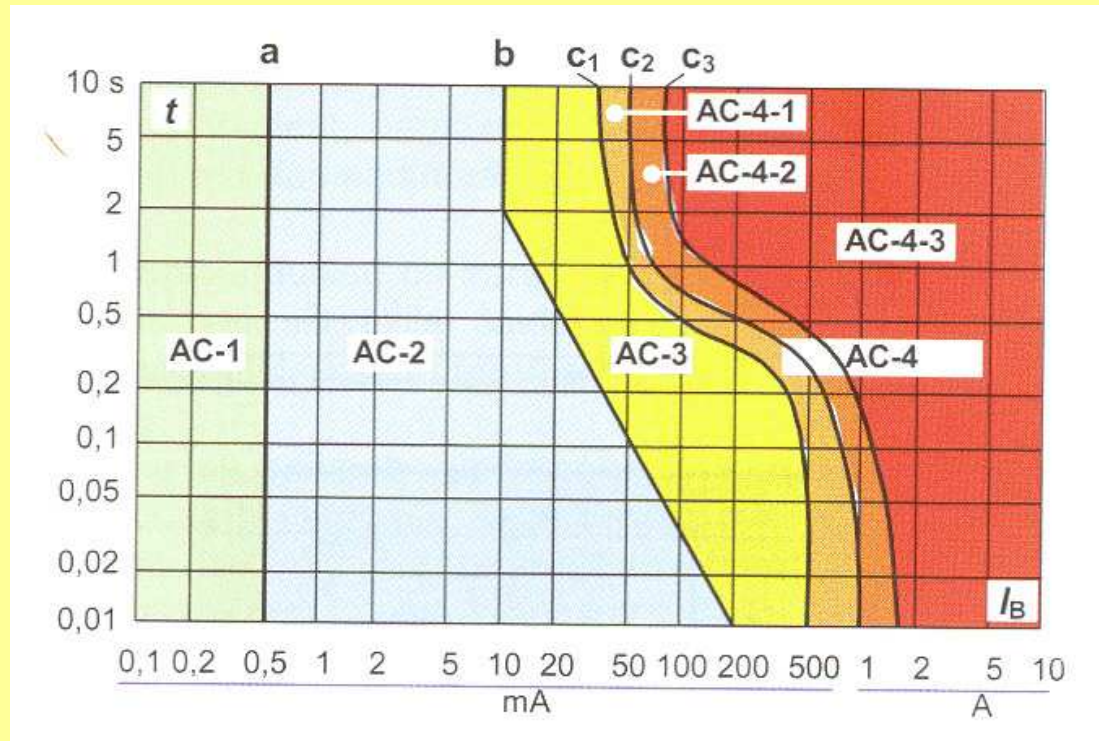


Joonis 4.68. Maandusjuhtide ja maandurite lubata voolutihedus olenevalt maahendusvoolu kestusest.

- 1 – paljas või tsingitud vask, 2 – tinatatud või pliikattega vask, 3 – alumiinium (lubatud ainult maandusjuhtides),
 4 – galvaanilise kattega teras; sirged 1, 3 ja 4 kehtivad lubata lõpptemperatuuri $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ korral,
 sirge 2 – lubata lõpptemperatuuri $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ korral

Enimalt lubatud puutepinge

Enimalt lubatud puutepinge on määratud inimkeha läbiva voolu I_B sellise väärtusega, mis võib esile kutsuda **südamevatsakeste virvenduse** ja selle tagajärjel vereringe peatumise. Joonisel 4.69 on kujutatud vahelduvvoolu toime inimesele olenevalt voolu efektiivväärtusest ja kestusest IEC satndardi kohaselt.



Joonis 4.69. Võrgusagedusliku vahelduvvoolu toime täiskasvanud inimesele IEC 60479:1994 järgi

I_B - inimkeha läbiva voolu efektiivväärtus, t – voolu toime kestus,
 AC-1, AC-2, AC-3, AC-4-1, AC-4-2 ja AC-4-3 – voolu toime piirkonnad,
 a, b, c_1 , c_2 ja c_3 – piirkondadevahelised lävikõverad

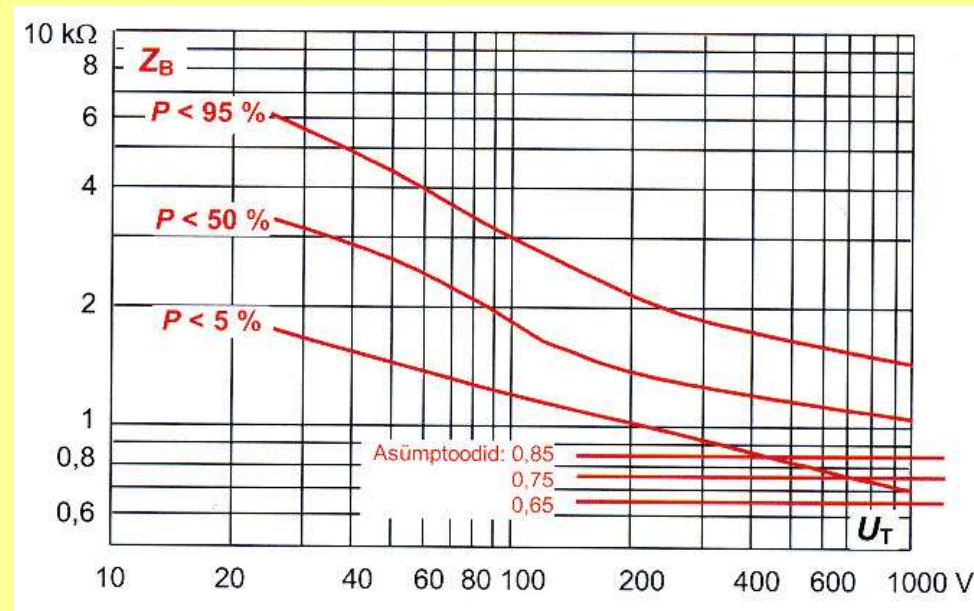
Piirkond AC-1: vool ei põhjusta tavaliselt mingeid reaktsioone.

Piirkond AC-2: vool ei põhjusta tavaliselt mingeid ohtlikke füsioloogilisi nähtusi.

Piirkond AC-3: vool ei põhjusta tavaliselt organismi kahjustusi, kuid võib esile kutsuda lihaste krampe, hingamisraskusi ja südametegevuse rütmihäireid, kuid mitte südamevatsakeste virvendust.

Piirkond AC-4: vool võib põhjustada südamevatsakeste virvendust jaa selle tagajärjel vereringe peatumist.

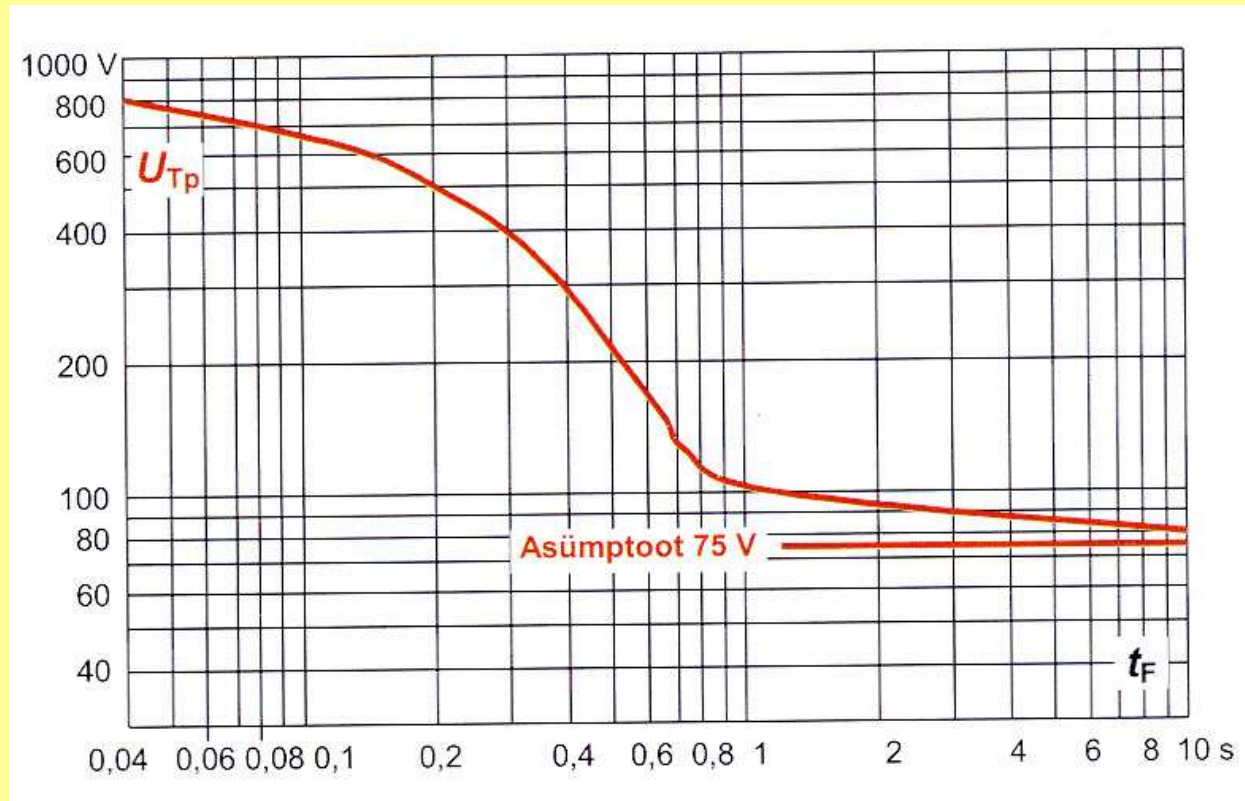
Arvestades inimkeha takistust Z_B ja selle olenevust pingest on lubatav puutepinge U_{Tp} saadav valemiga $U_{Tp} = I_B Z_B$



Joonis 4.70. Inimkeha näitakistus Z_B vahelduvvoolul olenevalt puutepingest U_T voolutee käsi-käsi või käsi-jalg puhul suurepinnalisel (50...100 cm²) puutel ja kuiva naha korral. P – elanikkonna suhteline osa, mille piirides takistus ei ületa vastava kõveraga esitatud väärtusi.

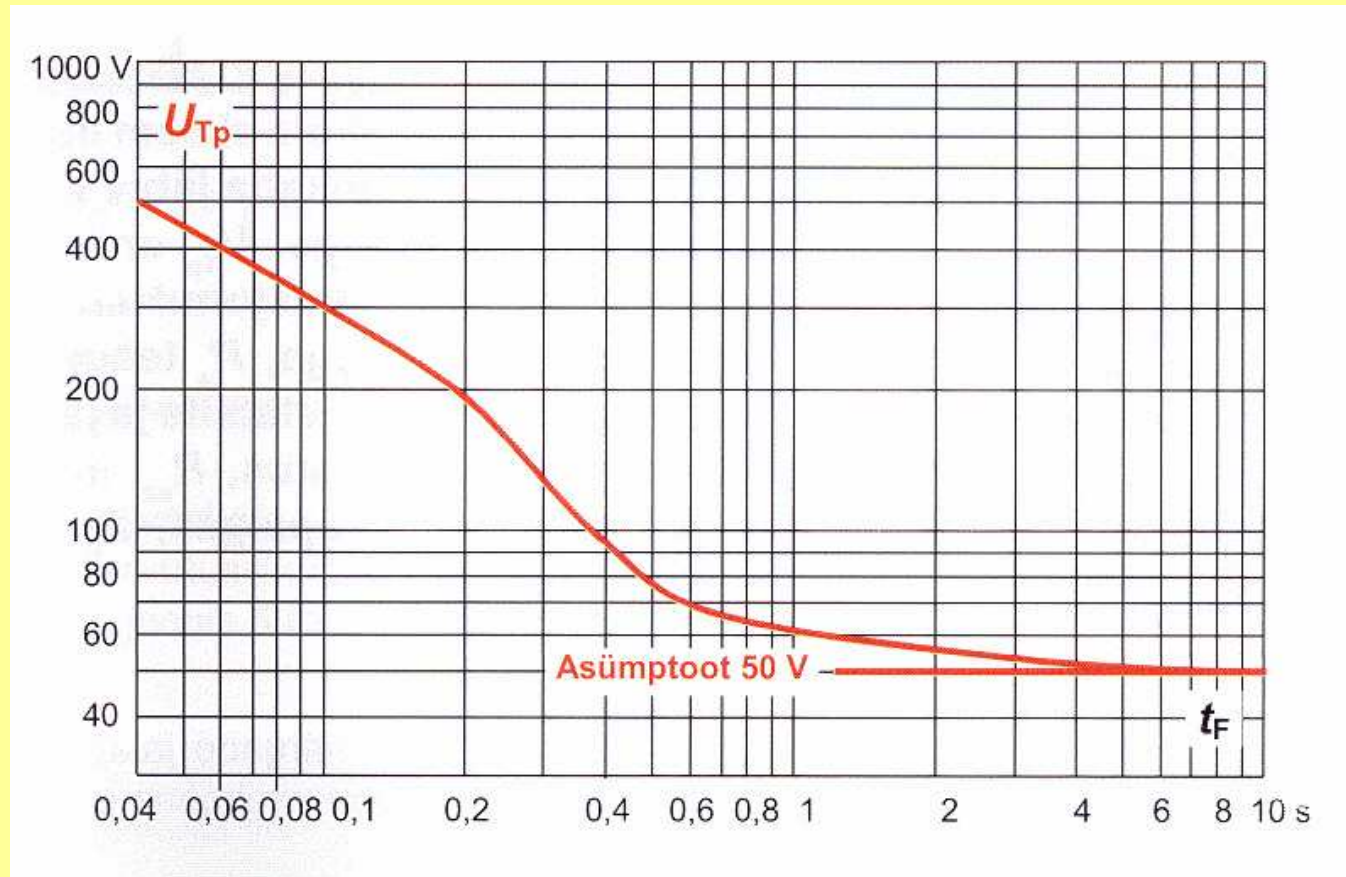
Lihtsuse mõttes võib inimkeha näivtakistuse Z_B lugeda aktiivseks.

Kõrgepingepaigaldistes enimalt lubatud puutepinge sõltuvalt selle toime kestusest on toodud joonisel 4.71, millest nähtub, et puutepinge kestevväärtus ei tohi ületada 75 V, väga lühiajalisel toimel võidakse lubada kuni 800 V.



Joonis 4.71. Enimalt lubatud puutepinge U_{Tp} olenevus rikke kestusest t_F kõrgepingepaigaldistes

Madalpingepaigaldistes enimalt lubatud puutepinge sõltuvalt selle toime kestusest on toodud joonisel 4.72, millest nähtub, et puutepinge kestevväärtus ei tohi ületada 50 V, väga lühiajalisel toimel võidakse lubada kuni 500 V.



Joonis 4.72. Enimalt lubatud puutepinge U_{Tp} olenevus rikke kestusest t_F madalpingepaigaldistes

Maandustakistuse lubatavuse kontroll

Enimalt lubatud maandustakistuse võib arvutada lihtsustatud valemiga

$$R_{Ep} = \frac{U_{Ep}}{I_E},$$

kus U_{Ep} - lubatav maanduspinge,
 I_E - arvutatud maandusvool.

Lubatav maanduspinge on võrdeline lubatava puutepingega

$$U_{Tp} = cU_{Ep}.$$

Võrdeteguri c kohta võib öelda ainult seda, et see on väiksem kui 1, sest selle arvutamine on väga keeruline ja töömahukas. Seepärast püütakse maanduspaigaldiste projekteerimisel ette näha sellised potentsiaaliühtlustus- või -tasandusmeetmed, mille puhul jääb puutepinge kindlasti allapoole enimalt lubatavat väärtust.

Puutepinge **kontrollarvutus ei ole vajalik**, kui

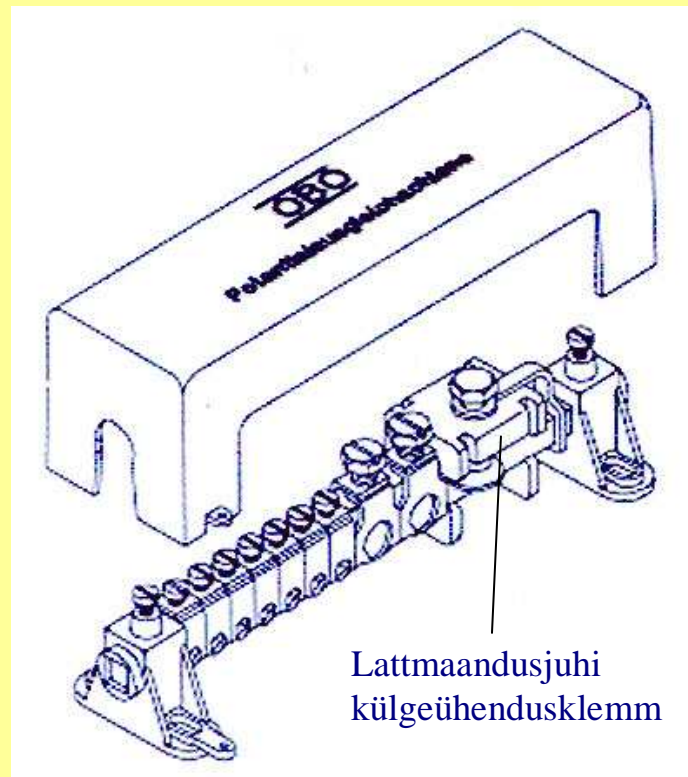
- maanduspaigaldis kujutab endast teatud osa laiast maandussüsteemist või kui ta paikneb tihedalt hoonestatud alal või mitmest hoonest koosneva tööstusettevõtte territooriumil,
- maanduspinge ei ole kõrgem kui kahekordne enimalt lubatud puutepinge.

Ehitiste madalpingepaigaldistes on ohtliku puutepinge teke välistatud, kui

- ehitises kasutatakse vundamendimaandust ja nõuetekohast potentsiaaliühtlustust,
- kaitsemaandus kujutab endast osa laiast maandussüsteemist,
- maandustakistus ei ole suurem kui 1Ω .

Peamaanduslatt

Elamutes, väiksemates äri- ja tööstushoonetes ja muude väiksemate ehitiste madalpingepaigaldistes ühendatakse maandusjuht standardse **peamaanduslatiga**, mis paikneb ehitise sisetuskilbi vahetus läheduses.



Joonis 4.73. Peamaanduslatt (OBO Bettermanni toode)

Kui sellele latile ühendatakse ka kõikide läheduses paiknevate kõrvaliste juhtivate osade potentsiaaliühtlustuslatid, siis nimetatakse seda ka **peapotentsiaaliühtlustuslatiks**. Üks selle lati klemmidest on tavaliselt ette nähtud lattmaandusjuhi (nt vundamendimaanduse allaviigu) külgeühendamiseks. Standardne peamaanduslatt on varustatud plommitava kaanega. Kaane siseküljel on tavaliselt kleebis või muu silt ühendusskeemiga.

4.12. Potentsiaaliühtlustus

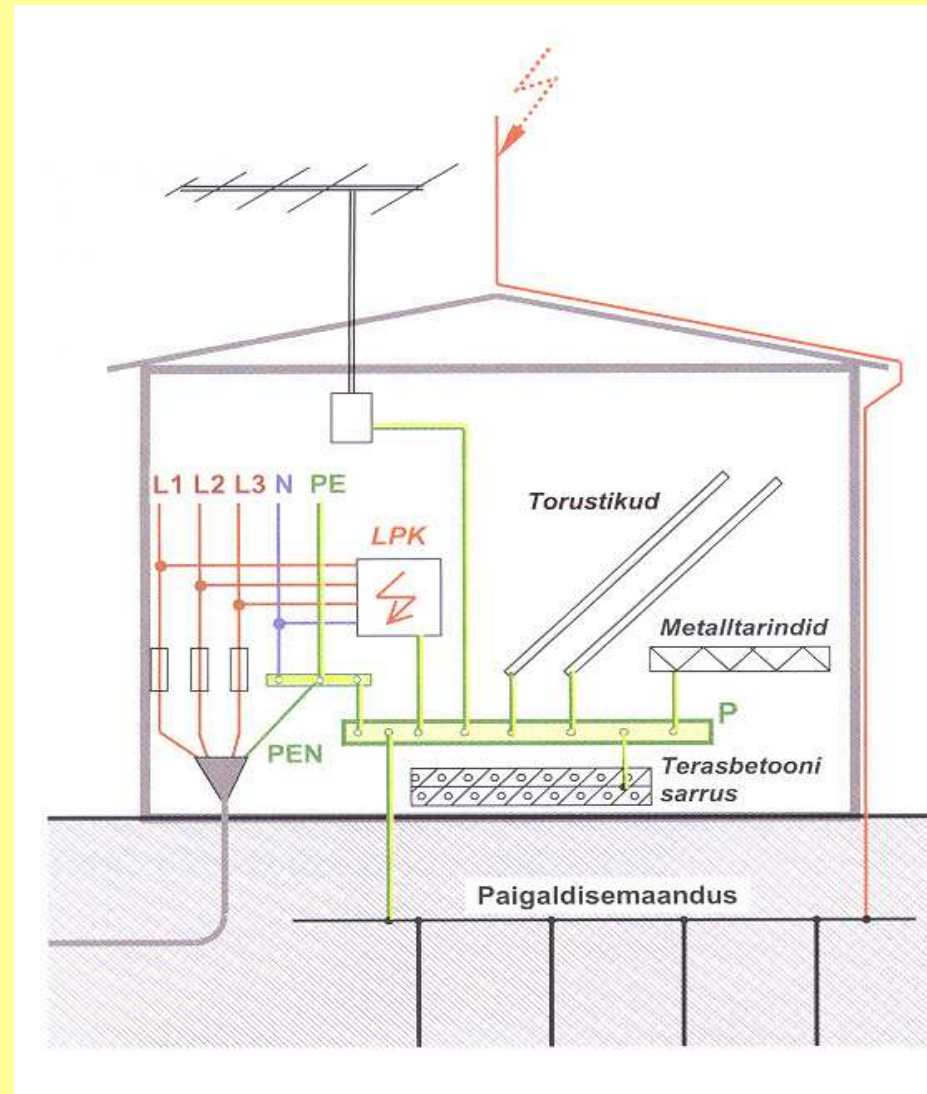
Potentsiaaliühtlustuse olemus ja liigid

Potentsiaaliühtlustus seisneb paigaldise normaaltalitusel pingetute elektrijuhtivate osade omavahelises ühendamises sellekohaste juhtide e. **potentsiaaliühtlustusjuhtide** abil. Sellise ühendamise eesmärk on tagada, et kui üks nendest osadest satub nt. isolatsioonirikke tõttu pinge alla, siis ei teki omavahel ühendatud elektrijuhtivate osade vahel ohtlikku puutepinget. Potentsiaaliühtlustussüsteemi parema töökindluse tagamiseks nähakse ette iga ühendatava osa jaoks ette eraldi juht, mis ühendatakse teiste juhtidega kokku potentsiaaliühtlustuslatil või -klemmil.

Vastavalt otstarbele eritatakse

- **kaitse-potentsiaaliühtlustussüsteemi**, mis oluliselt suurendab paigaldise või selle osa elektriohutust,
- **talitus- potentsiaaliühtlustussüsteemi**, mida kasutatakse muul eesmärgil kui elektriohutuse tagamiseks (nt elektromagnetiliste häirete vähendamiseks),
- **ühtset potentsiaaliühtlustussüsteemi**, mis peab tagama nii elektriohutuse kui ka kaitse elektromagnetiliste jm häirete eest.

Potentsiaaliühtlustussüsteemi tähtsaim osa on **peapotentsiaaliühtlustus**, mis nähakse ette ehitise elektrisisendi juures ja ühendatakse paigaldusmaandusega.



Joonis 4.74. Peapotentsiaaliühtlustus ehitise elektrisisendis TN-C –toitevõrgu ja TN-S- hoonejuhistiku korral.
 L1, L2, L3 –siseneva kaabelliini faasijuhid, PEN – siseneva liini PEN-juht, PE – kaisejuht, N – neutraaljuht,
 LPK – liigpingepiirikute komplekt, P – peapotentsiaaliühtlustuslatt (peamaanduslatt)

Põhinõuded

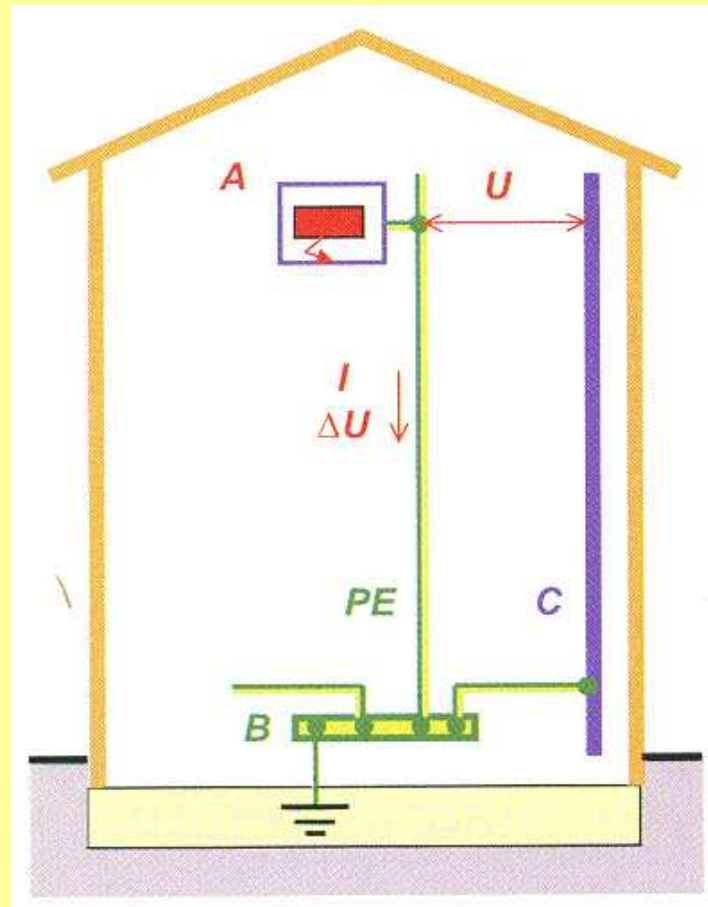
Elektriohutuse rühmastandard näeb ette, et igas ehitises peavad peapotentsiaaliühtlustusega olema ühendatud järgmise juhtivad osad:

- peakaitsejuht,
- peamaandusjuht või peamaandusklemm,
- ehitisesisesed gaasi-, vee- jm torustikud,
- võimaluse korral metalltarandid, keskküttesüsteemid, terasbetoontarindite sarrus,
- kõigi sidekaablite metallmantlid.

Sama standard nõuab, et ehitisse sisenevad voolujuhtivad osad tuleb ühendada potentsiaaliühtlustusega ehitises **sisenemiskohale nii lähedal kui võimalik**. See nõue on tingitud sellest, et pikemate vahemaade korral peapotentsiaaliühtlustuslati ja selle külge kaitsejuhiga ühendatud pingealtide osade vahel võib rikke korral tekkida kaitsejuhi ja kõrvaliste juhtivate osade vahel lubamatult suur pinge, mis teatud oludes võib osutada ohtlikuks (joonis 4.75).

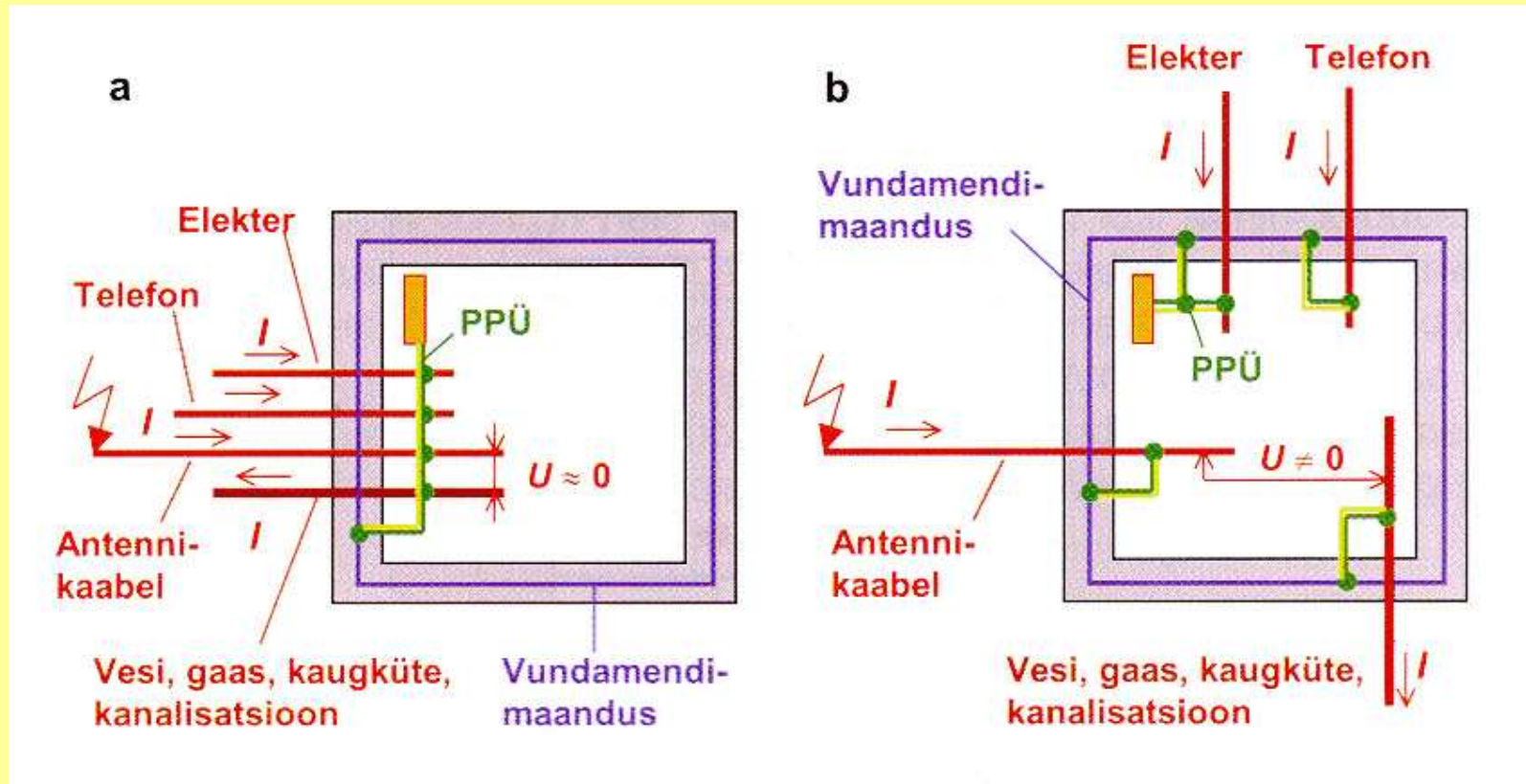
Sellis ohu vältimiseks võidakse kasutada **lisa-potentsiaaliühtlustust**, mis võib olla maandatud või maandamata.

Joonisel 4.76 on kujutatud ehitise madalpingepaigaldise maandus- ja potentsiaaliühtlustussüsteemi ehituspõhimõte, kui ehitises on kasutatud nii pea- kui ka lisapotentsiaaliühtlustust.



Joonis 4.75. Pinge teke kaitsejuhi ja kõrvalise juhtiva osa vahel, mis on ehitise elektrisisendist suhteliselt kaugel. A – elektritarviti, B – peapotentsiaaliühtlustuslatt, C – kõrvaline juhtiv osa (nt metalltoru), PE – kaitsejuht, I – rikke korral kaitsejuhis tekkiv vool, ΔU – pingelang kaitsejuhis, U – pinge kaitsejuhi ja kõrvalise juhtiva osa vahel

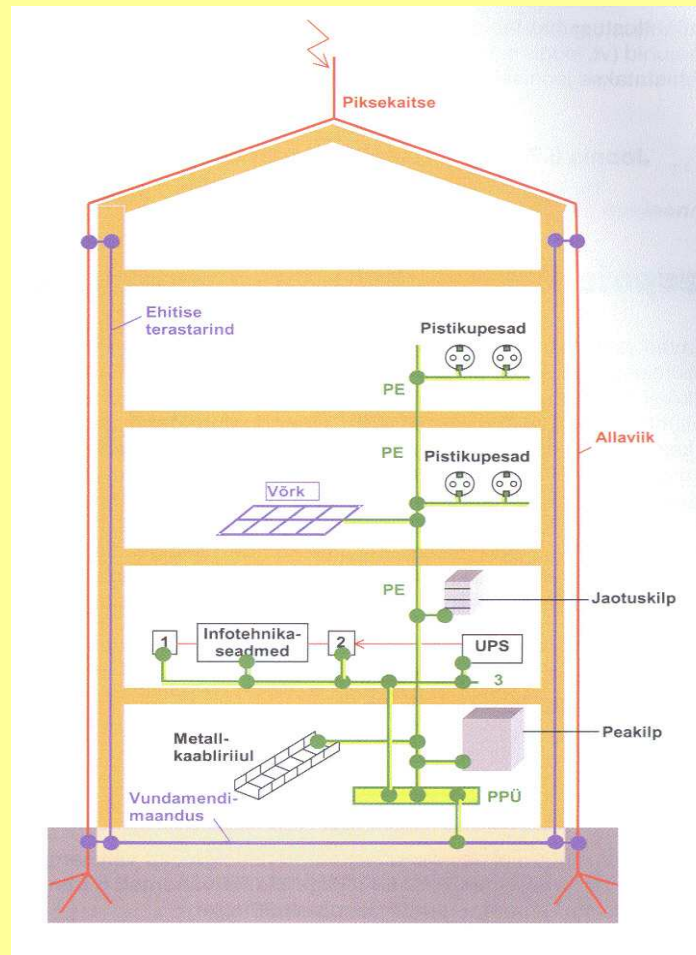
Et potentsiaaliühtlustus toimiks võimalikult tõhusalt, peavad potentsiaaliühtlustusjuhid olema võimalikult lühikesed. See tähendab ka seda, et elektri- ja sideliinid, torustikud jms tulevad sisestada ehitisse üksteisele nii lähedal kui võimalik, mis võimaldab vältida ebasoovitavaid, häiretundlikke seadmeid mõjutavaid pingeid.



Joonis 4.77. Häirepingete vältimine torustike, metallkatetega kaablite jms sisestamise teel ehitisse ühessamas kohas (a) ja häirepinge teke sisetamiskohtade paiknemisel üksteisest eemal (b).

I – indutseeritud vool, $PPÜ$ – peapotentsiaaliühtlustussüsteem, U – pinge eri metallosade vahel

Ehitise potentsiaaliühtlustus- ja maandussüsteemi kujunduse näide elektrilöögikaitse, elektromagnetilise ühilduvuse ja piksekaitse seisukohalt on toodud joonisel 4.78.



Joonis 4.78. Ehitise potentsiaaliühtlustus- ja maandussüsteemi kujundus vastavalt elektripaigaldiste ehituse standardi, piksekaitsestandardi ja elektromagnetilise ühilduvuse standardi nõuetele. 1 – telefon, 2 – ehitise elektroonikaseadmed, 3 – kohalik potentsiaaliühtlustus, PE – kaitsejuht, PPÜ – peapotentsiaaliühtlustuslatt, UPS – katkestusvaba toitesead

Peapotsiaaliühtlustuse teostamine

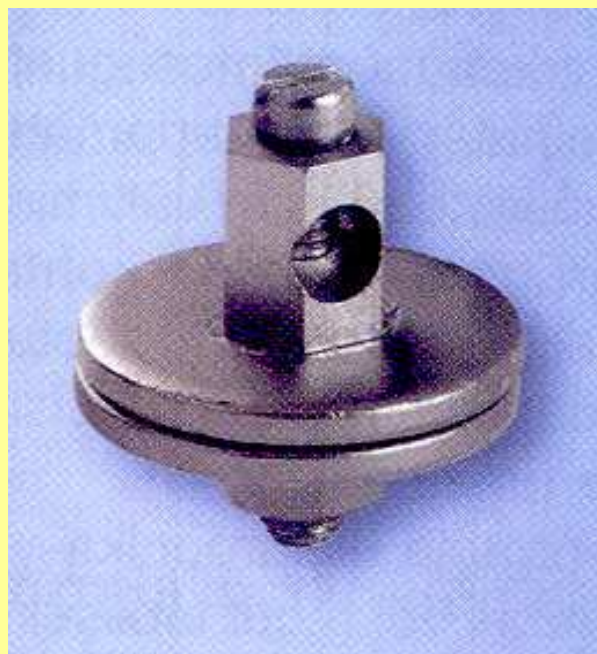
Ühendusjuhtidena kasutatakse enamasti nähtavalt paigaldatud, massiivse ristlõikega ümar- või lattjuhte, kuid võidakse kasutada ka mitmekiulisi ja isoleeritud juhte. Isolatsioon on tingimata vajalik siis, kui potentsiaaliühtlustuslatt paikneb pinnases või korrodeerivas keskkonnas (nt kasvuhoones või loomalaudas). TN-juhistikus peab peapotsiaaliühtlustuslatiga ühendatud potentsiaaliühtlustusjuhtide ristlõige olema vähemalt samasuur kui peajaotuskilbist lähtuval suurima ristlõikega kaitsejuhil. Viimane omakorda määratakse vastava ahela faasijuhtide ristlõike järgi lähtudes alltoodud tabelist.

Faasijuhi ristlõige S , mm ²	Kaitsejuhi vähimalt nõutav ristlõige, mm ²
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	$S / 2$

Seejuures ei tohi potentsiaaliühtlustusjuhtide ristlõige olla väiksem mehaaniliselt vähimalt lubatust. Vase puhul peab ristlõige olema vähemalt 6 mm², alumiiniumi puhul – vähemalt 16 mm² ja terase puhul – vähemalt 50 mm².

Potentsiaaliühtlustusjuhtidena võib kasutada ka jaotuskappide ja lattmagistraalide metallümbriseid ja muid metalltarindeid, kui

- nende ristlõige vastab ülaltoodud nõuetele,
- nad on vastupidavad keskkonna toimele,
- nad on varustatud potentsiaalijuhtide külgeühendamiseks ettenähtud klemmidega.

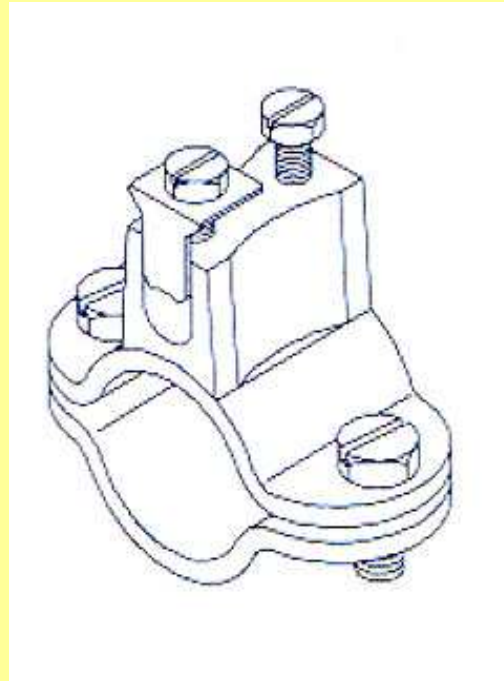


Joonis 4.79. Potentsiaaliühtlustusjuhi külgeühendusklenn (OBO Bettermann)

Potentsiaaliühtlustusjuhtidena **ei tohi kasutada**

- veetorusid,
- põlevvedelike ega –gaaside torusid,
- normaaltalitusel mehaanilise pinge all olevaid metalltarindeid,
- paidjuhte, mis ei ole ettenähtud potentsiaaliühtlustuseks,
- paindtarindeid ega tarindite paindosi,
- kandetrosse.

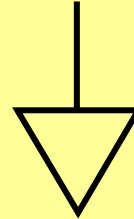
Potentsiaaliühtlustusjuhtide ühendamise kõrvaliste juhtivate osadega toimub sellekohaste klamber-, rõngas- vms klemmidega.



Joonis 4.80. Torudele nimiläbimõõduga $\frac{3}{4}$ kuni 2 tolli kinnitatav klemm, millega saab ühendada potentsiaaliühtlustusjuhte ristlõikega $16 \dots 70 \text{ mm}^2$ või ümarjuhti läbimõõduga kuni 10 mm

Märkus. Niiskes keskkonnas tuleb juhid ja klemmid valida selliselt, et oleks välditud elektrokeemilise korrosiooni teke. Sageli tähendab see alumiiniumjuhtmete välistamist.

Potentsiaaliühtlustusjuhid **tähistatakse** tavaliselt kollarohelise tunnusvärviga nagu maandus- ja muud kaitsejuhid ning nende külgeühendamiseks ettenähtud klemmid tähistatakse vastava **tingmärgiga**.



Joonis 4.81. Potentsiaaliühtlustusklemmi tingmärk

Lisa-potentsiaaliühtlustuse kasutamine

Lisa-potentsiaaliühtlustus on vajalik seal, kus ehitise peapotentsiaaliühtlustus ei taga nõutavat ohutust tasapotentsiaalsuse näol. Eriti kehtib see nõue ohtlike ruumide (medruumid, vanni- ja duširuumid, basseinid, paadisadamad, loomakasvatushooned, kasvuhooned jms) kohta, elektromagnetiliste häirete vältimise seisukohast aga andmetöötlus- ja telekommunikatsiooniaparatuuri ruumide kohta. Lisa-potentsiaaliühtlustusega võidakse vajaduse korral ühendada

- **potentsiaalitasanduse**elektroodid, mis enamasti kujundatakse võrguna elektroonikaaparatuuri põrandas, loomade asemete all laudapõrandas või muul taolisel viisil,
- elektromagnetilised varjed või varjestustarindid.

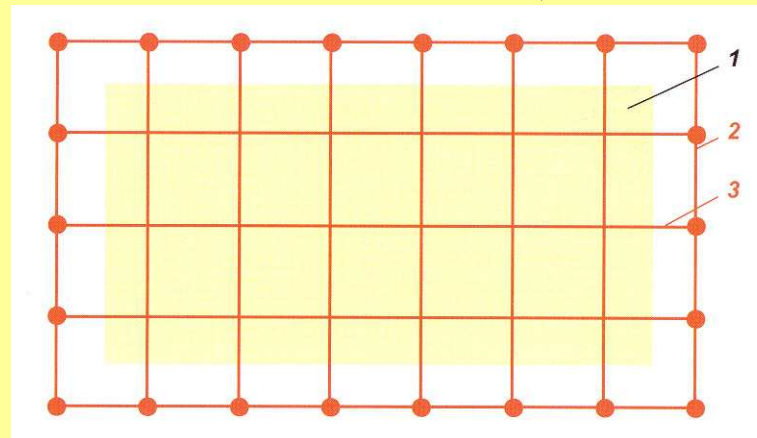
Kui lisa-potentsiaaliühtlustusjuht seob omavahel **kaht pingealdist osa**, ei tohi selle juhtivus olla väiksem kui nendega ühendatud suurema ristlõikega kaitsejuhil. **Pingealdist ja kõrvalist juhtivat** osa omavahel siduva lisa-

potentsiaaliühtlustusjuhi juhtivus ei tohi olla väiksem kui pool pingealti osaga ühendatud kaitsejuhi oma. Mõlemal juhul on vähim lubatav ristlõige vase puhul

- $2,5 \text{ mm}^2$, kui juht on mehaanilise kahjustamise eest kaitstud,
- 4 mm^2 , kui juht on mehaanilise kahjustamise eest kaitsmata.

Potentsiaalitasandus

Potentsiaaliühtlustuse eesmärk erinevalt potentsiaalitasandusest seisneb selles, et tagada võimalikult ühtlane potentsiaal teatud pinna ulatuses. Seda ala nimetatakse **tasapotentsiaalseks** ja ideaaljuhtumil on potentsiaal selle ulatuses konstantne. Tasapotentsiaalsus on elektriõhutuse tagamiseks ja elektromagnetiliste häirete vältimiseks mõnikord vajalik ka ehitiste juhivates põrandates. Kõige paremini saavutatakse tasapotentsiaalsus elektripaigaldist või ruumi teatud osa ümbritseva kinnise kontuuri taolise maanduri (kontuurmaanduri) korral.



Joonis 4.82. Välis-elektripaigaldise võrkmaanduri kujunduspõhimõte. 1 – elektriseadme paigaldusala, 2 – omavahel ühendatud varraselektroodidest moodustatud kontuur, 3 – rõhtelektroodide võrk