

# Johdatus sähköenergiajärjestelmiin

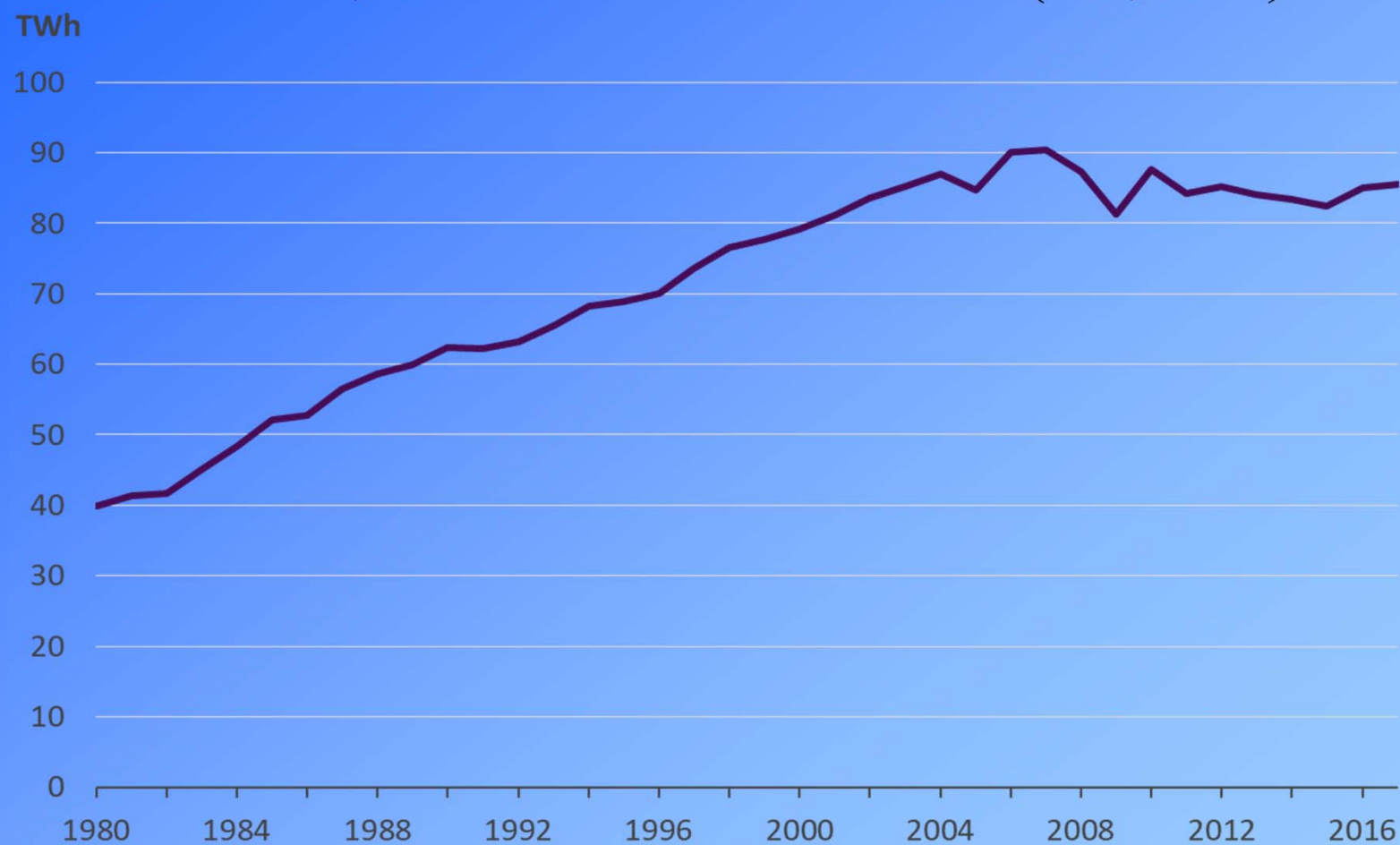
Luento 1

Sähköenergiajärjestelmän yleisesitys

Matti Lehtonen

# Sähkön kokonaiskäyttö

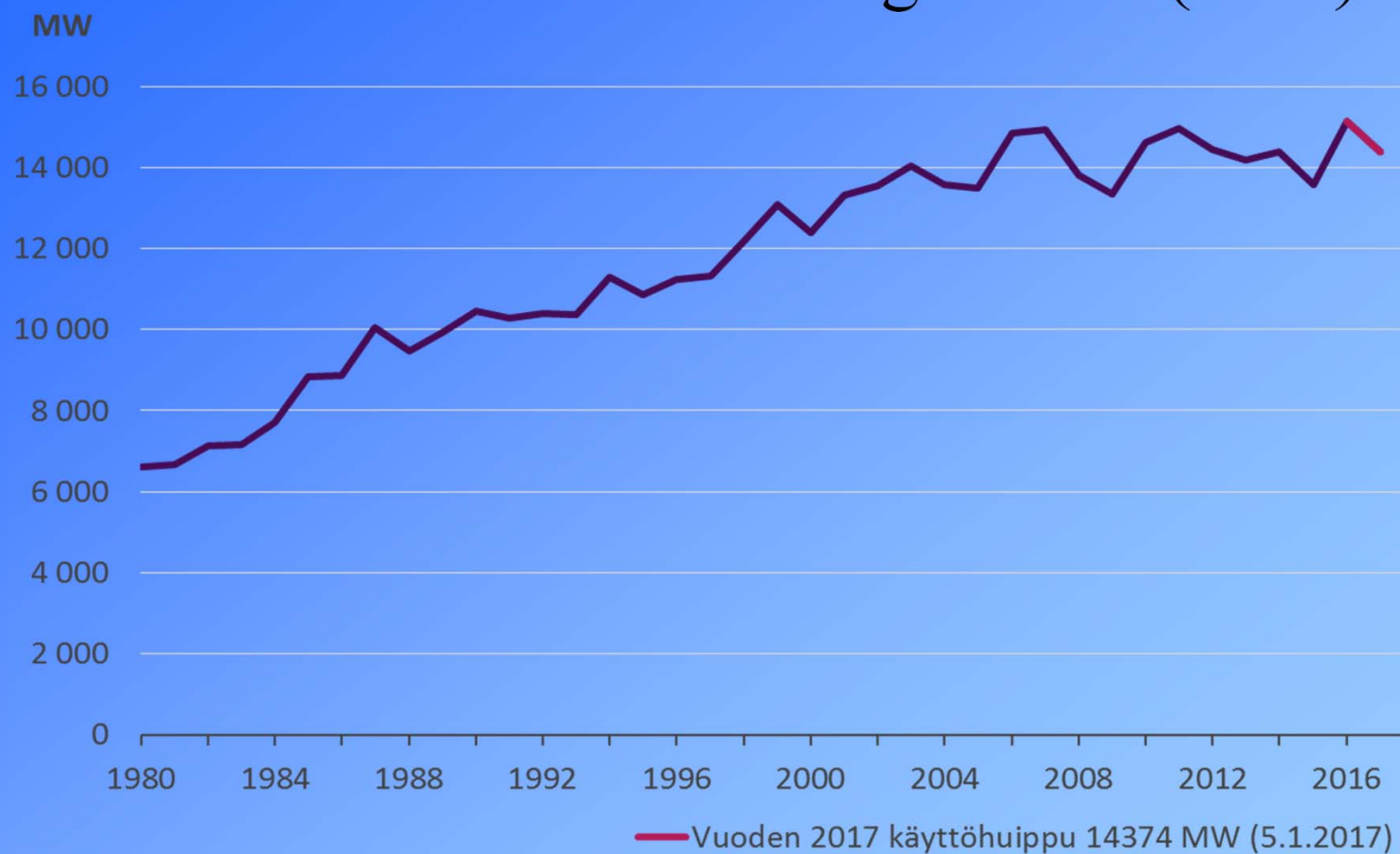
85,5 TWh vuonna 2017 (+0,4 %)



11.9.2018

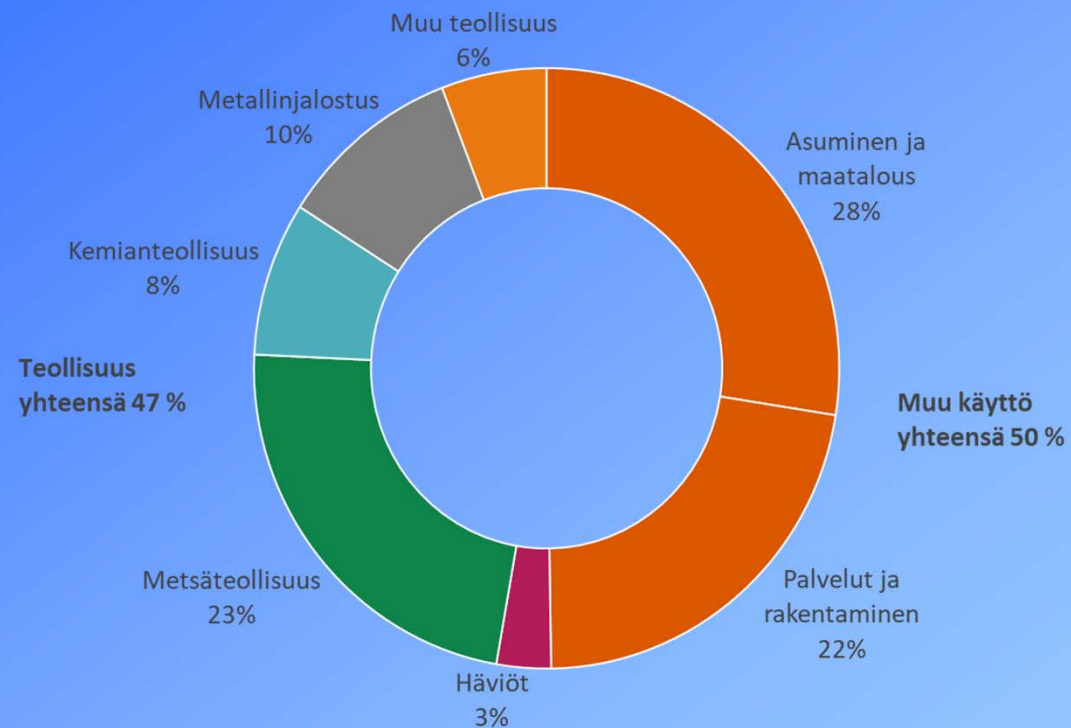
# Sähkön käyttöhuiput

## suurin sähköteho megawattia (MW)



11.9.2018

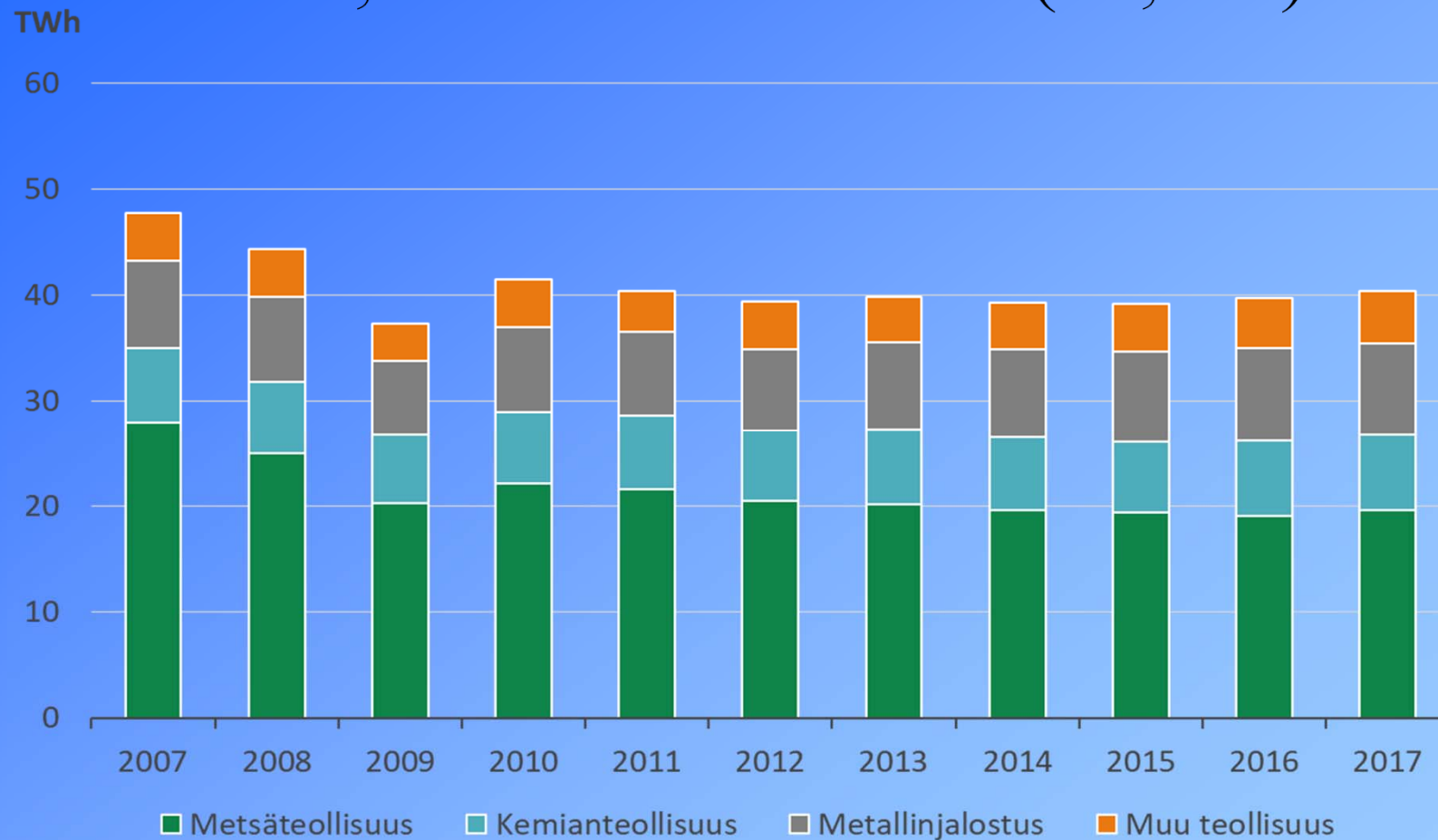
# Sähkön kokonaiskäyttö 2017 (85,5 TWh)



11.9.2018

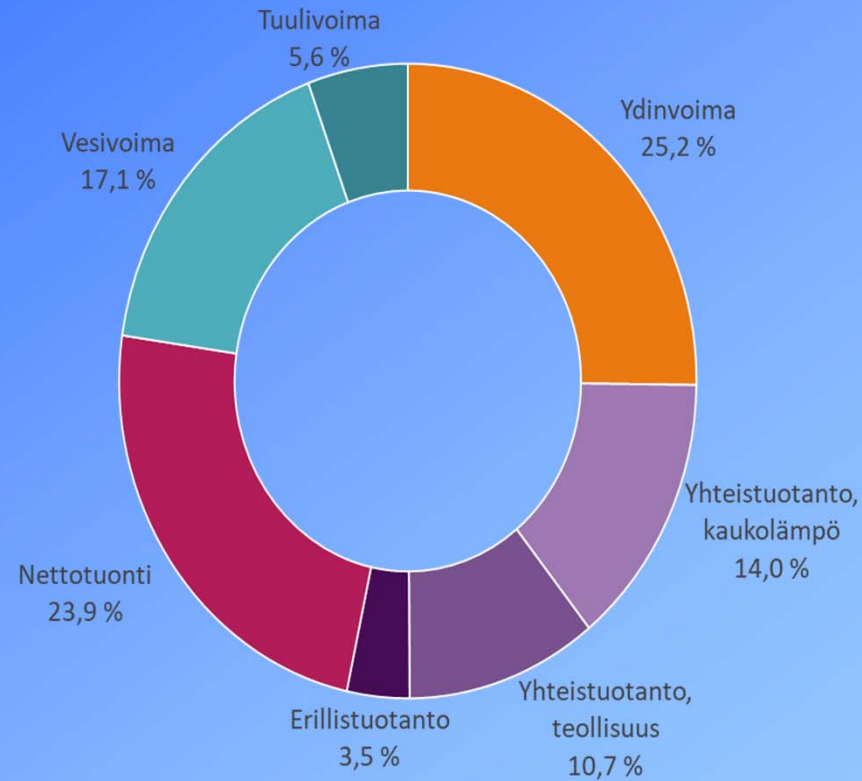
# Teollisuuden sähkönkäyttö

## 40,4 TWh vuonna 2017 (+1,7 %)



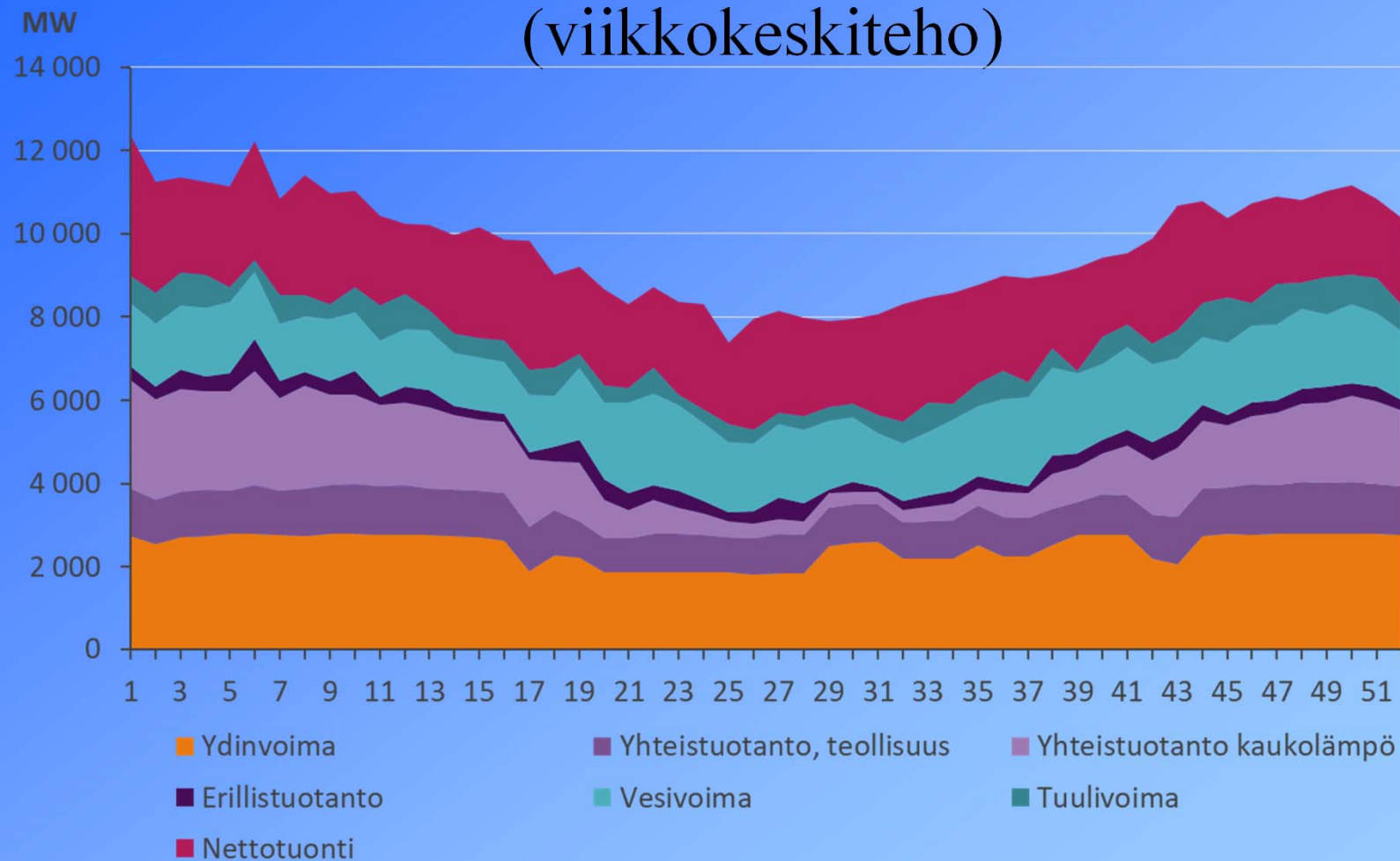
11.9.2018

# Sähkön tuotanto Suomessa ja tuonti 2017 (85,5 TWh)



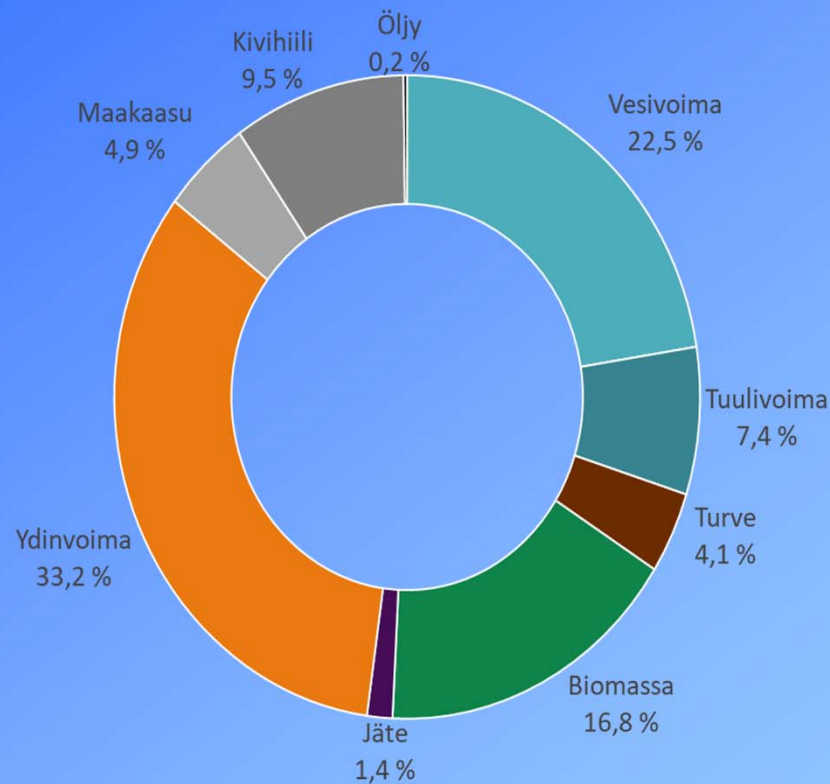
11.9.2018

# Sähkön tuotannon ja tuonnin aikavaihtelu 2017 (viikkokeskiteho)



11.9.2018

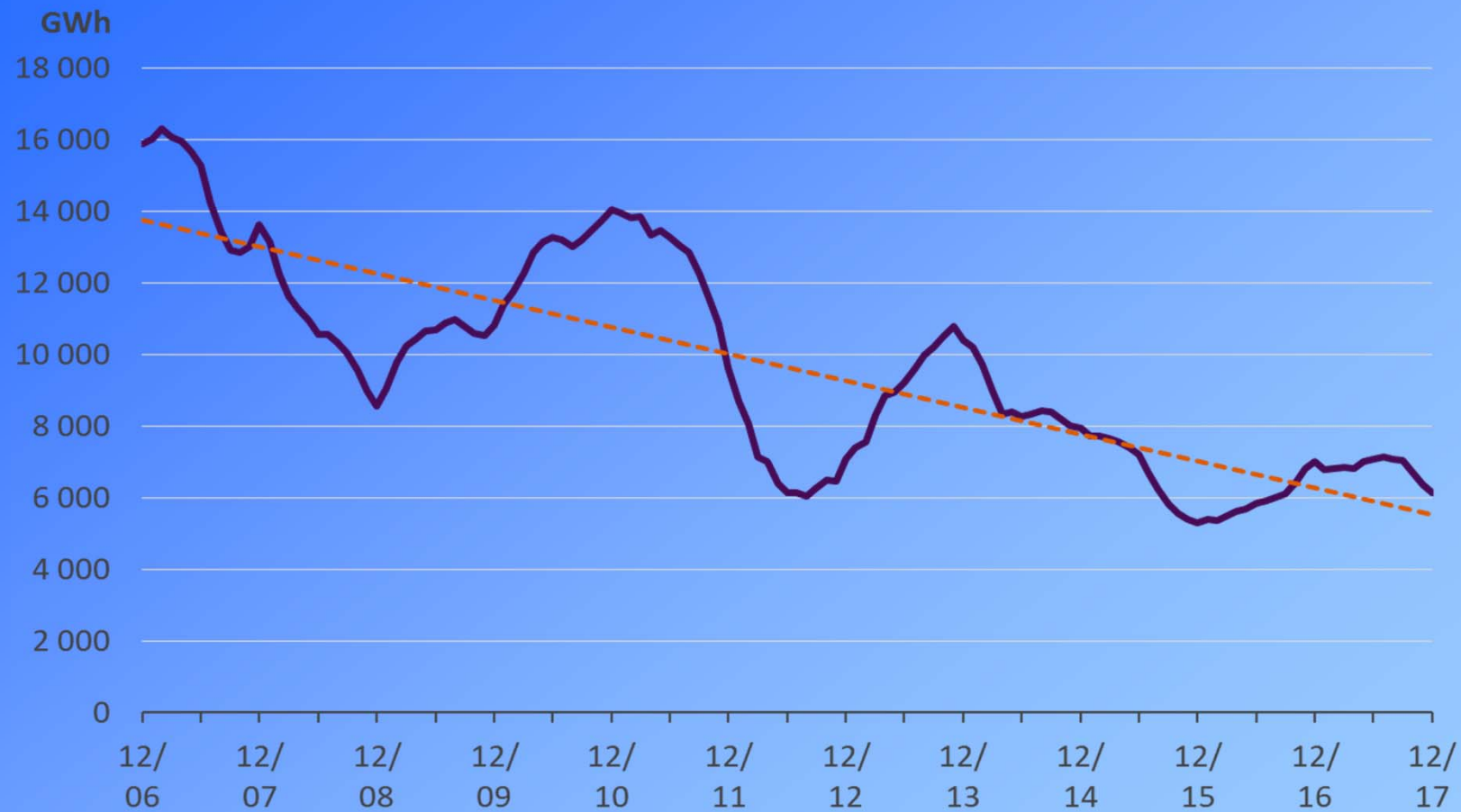
# Sähkön tuotanto energialähteittäin 2017 (65,0 TWh)



Uusiutuvat: 47 %  
Hiilidioksidineutraalit:  
80 %  
Kotimaiset: 52 %

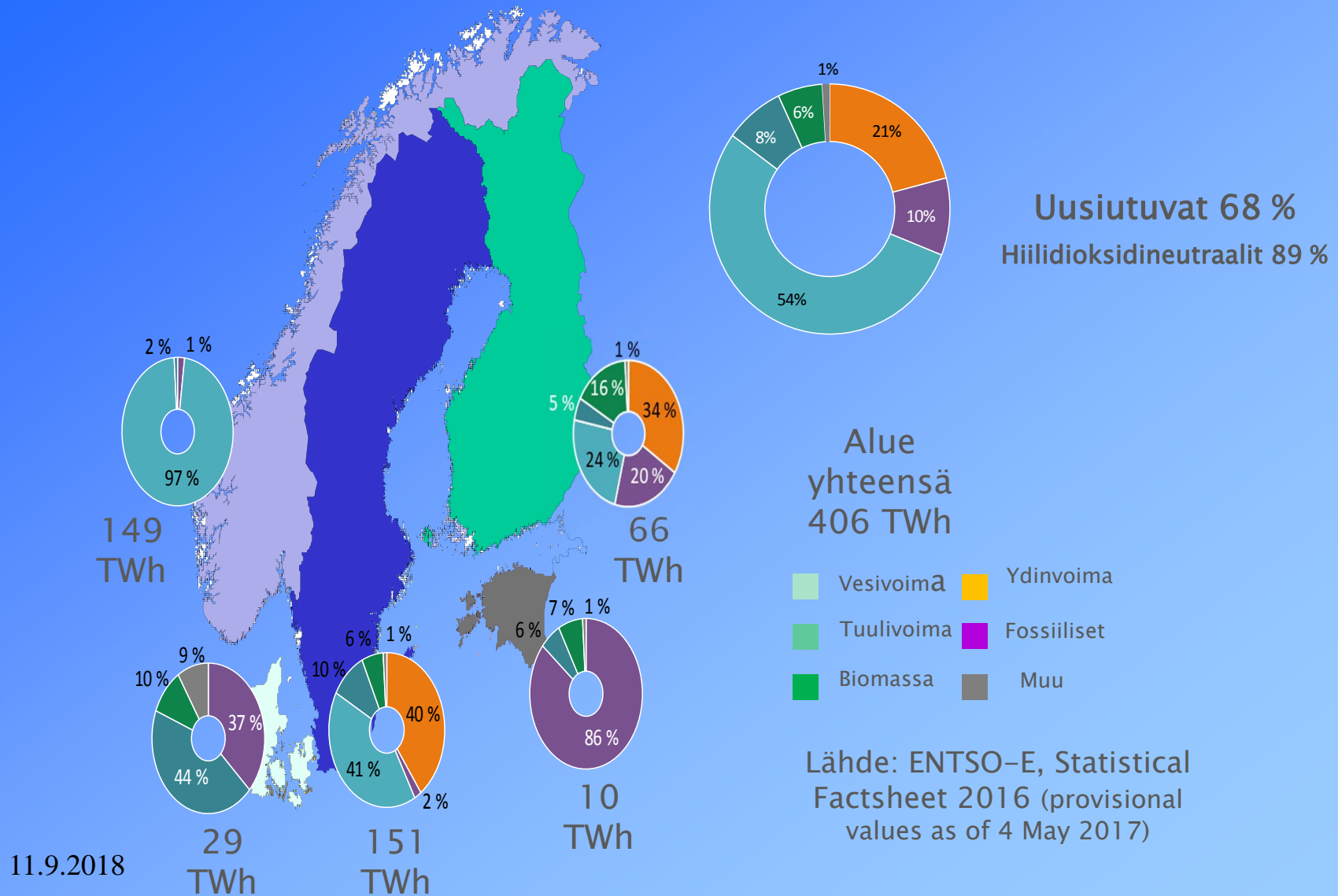


# Sähkön tuotanto kivihiilellä, liukuva 12 kk summa



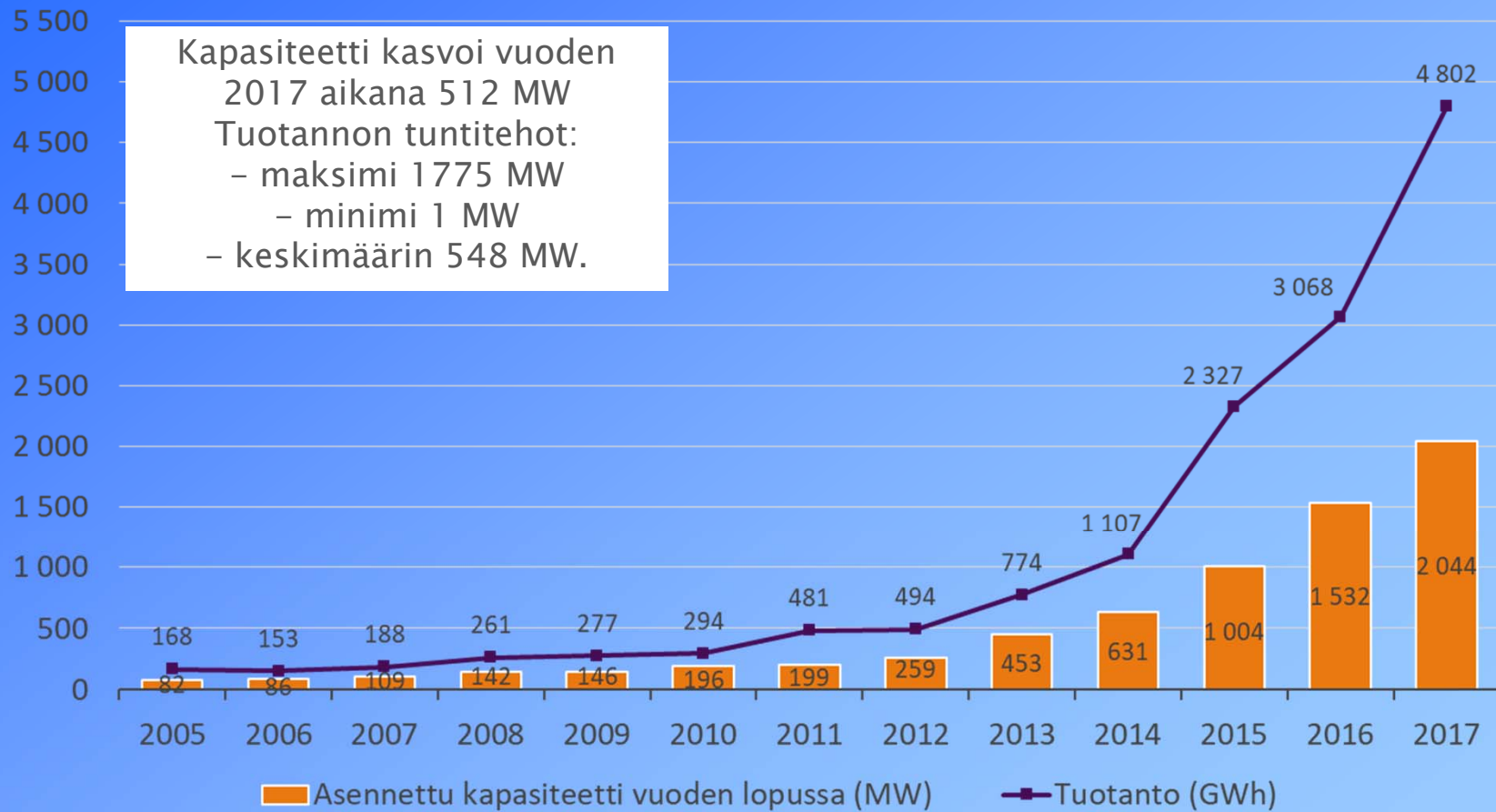
11.9.2018

# Sähkön tuotanto pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla 2016



# Tuulivoimatuotanto ja kapasiteetti

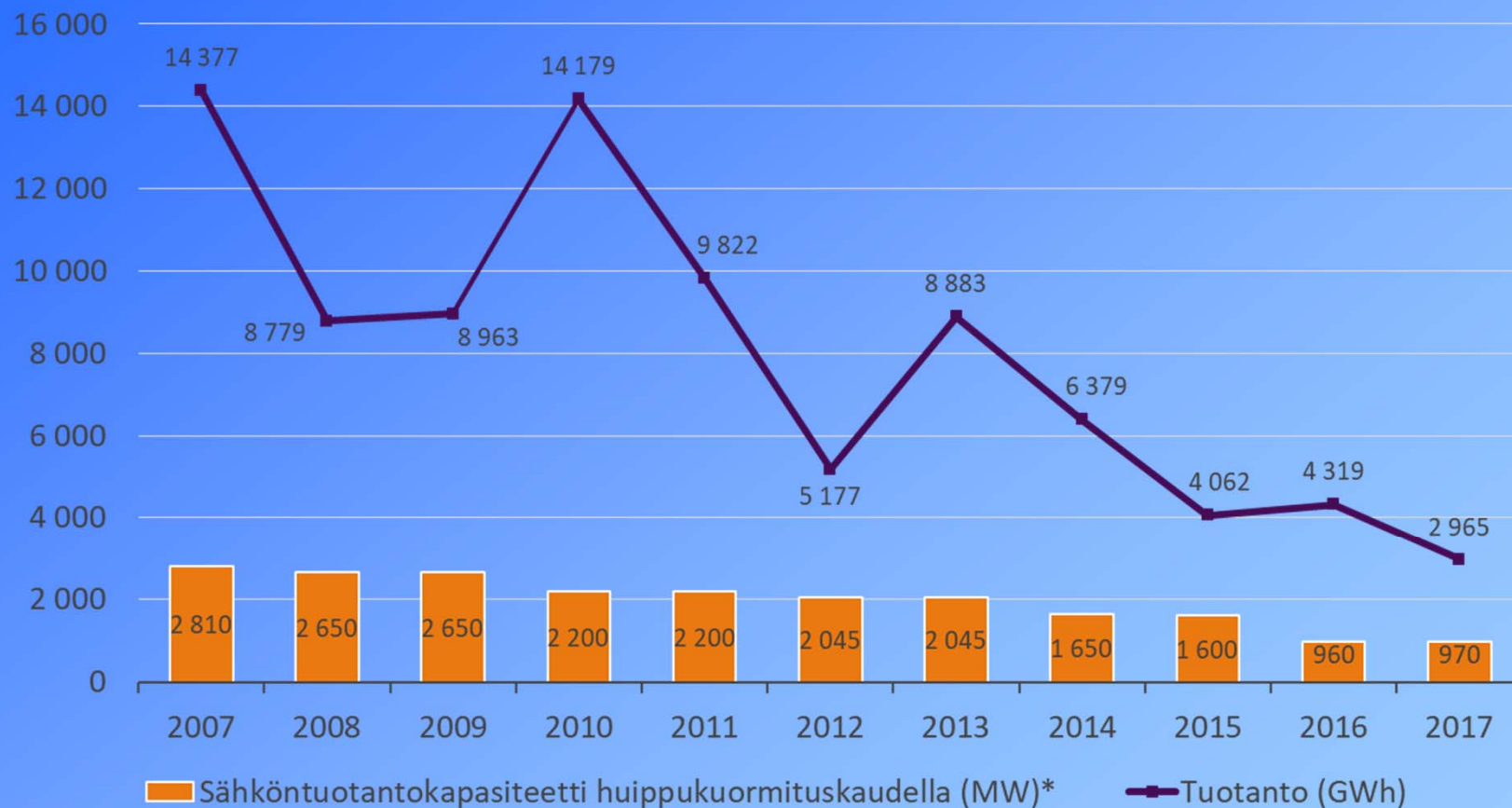
MW ja GWh



11.9.2018

# Lauhdetuotanto ja kapasiteetti

MW ja GWh



\*Lähde: Tilastokeskus, Energia 2016 -  
11.9.2018 taulukkopalvelu, Taul. 3.5

# Yhteistuotantosähkön tuotanto ja kapasiteetti kaukolämmityksessä



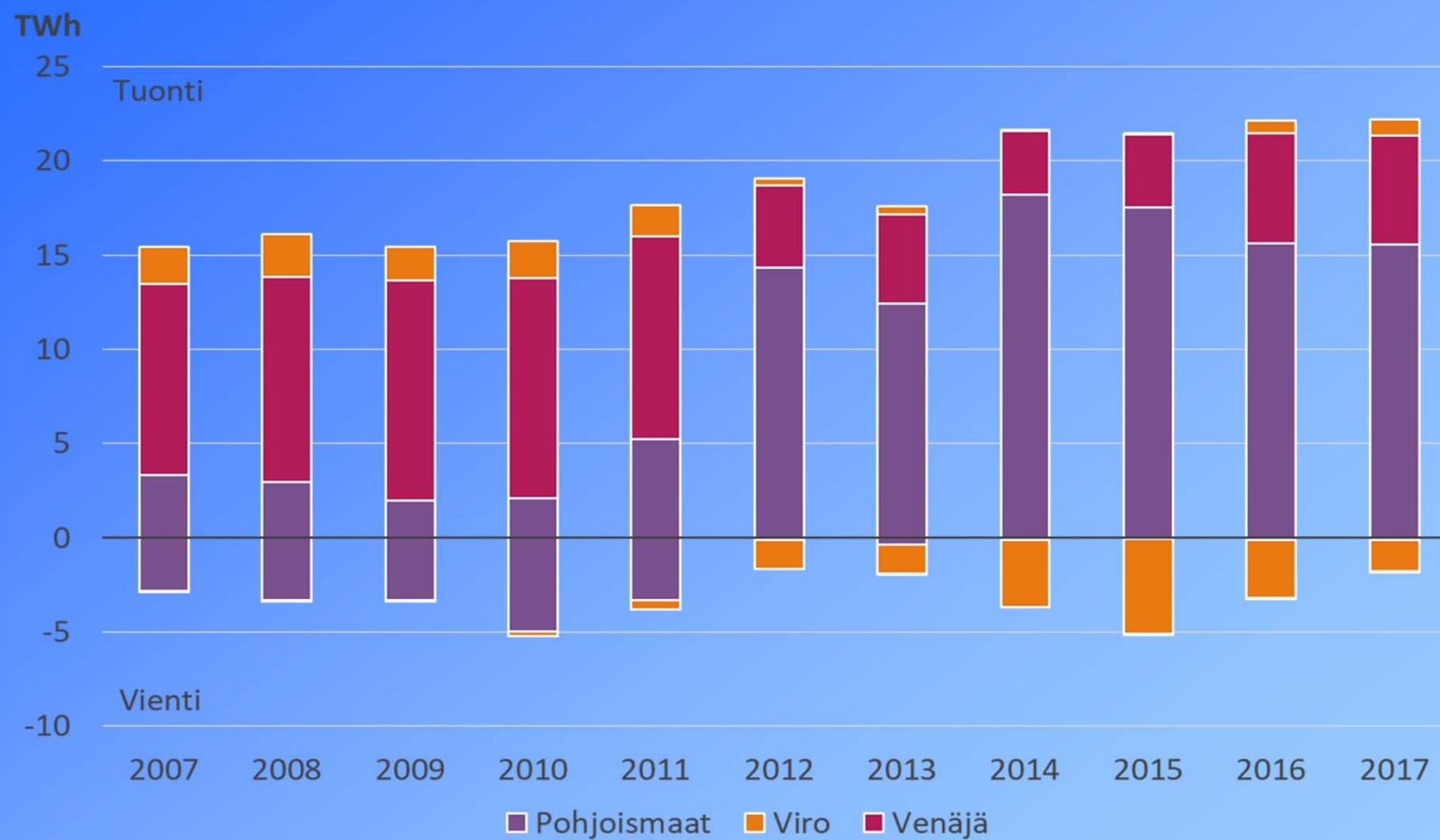
\*Lähde: Tilastokeskus, Energia 2016 –  
11.9.2018 taulukkopalvelu, Taul. 3.5

# Yhteistuotantosähkön tuotanto ja kapasiteetti teollisuudessa



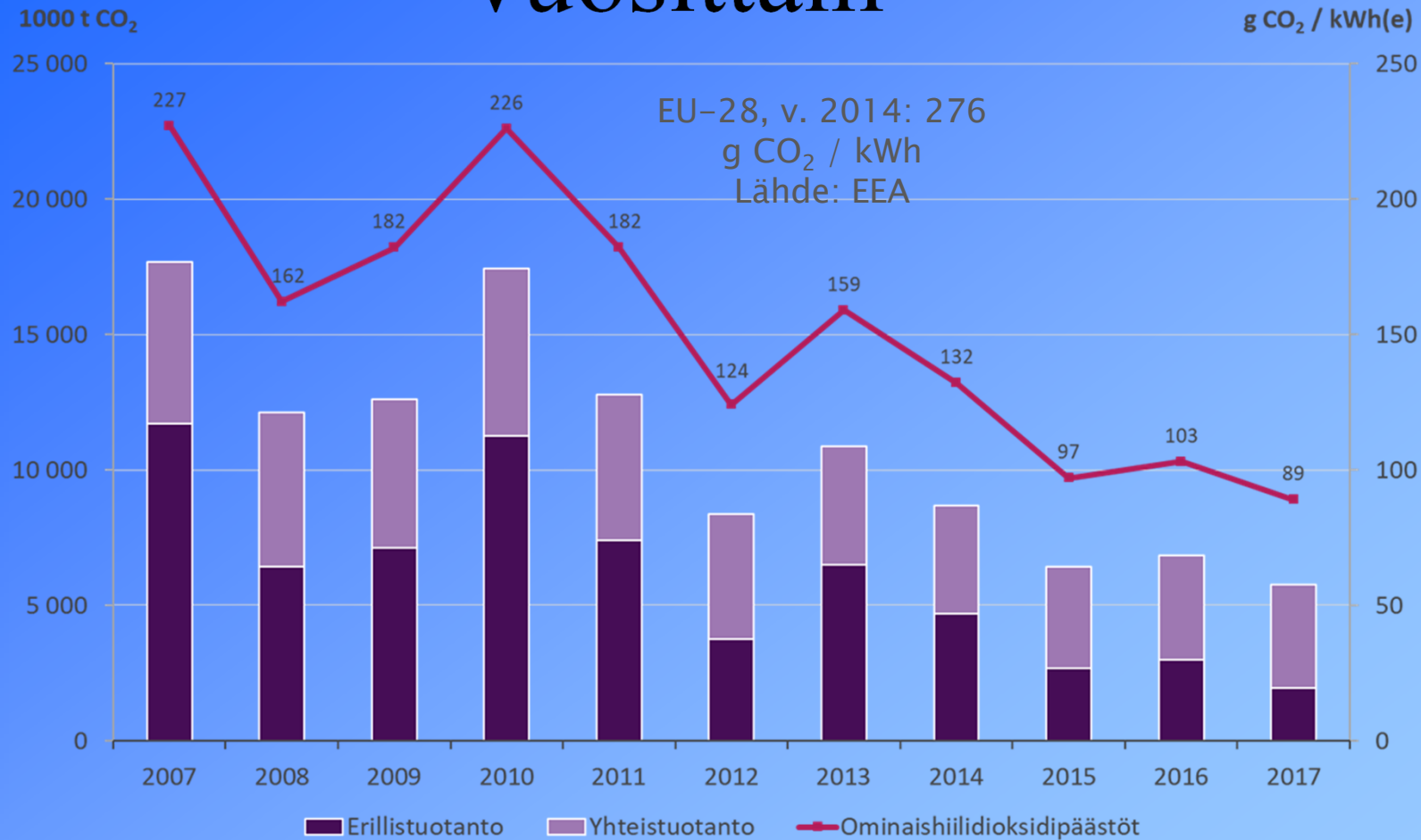
\*Lähde: Tilastokeskus, Energia 2016 -  
11.9.2018 taulukkopalvelu, Taul. 3.5

# Sähkön tuonti ja vienti



11.9.2018

# Sähköntuotannon CO<sub>2</sub>-päästöt vuosittain



CO<sub>2</sub>-päästöt 5,8 Mt  
vuonna 2017

11.9.2018



# Siirto- ja jakeluverkoston periaatekaavio

## Voimalaitos

- generaattori (10,5 kV, 20 kV)
- generaattorimuuntaja (20/400 kV)

## Kaukovoimansiirto

- tehovälimuuntaja (400/220 kV)
- 400, 220 (ja 110) kV johdot
- kytkinasema (220 kV)
- muuntoasema (400/220 kV)

## Suurjännitejakelu

- 110 kV johdot

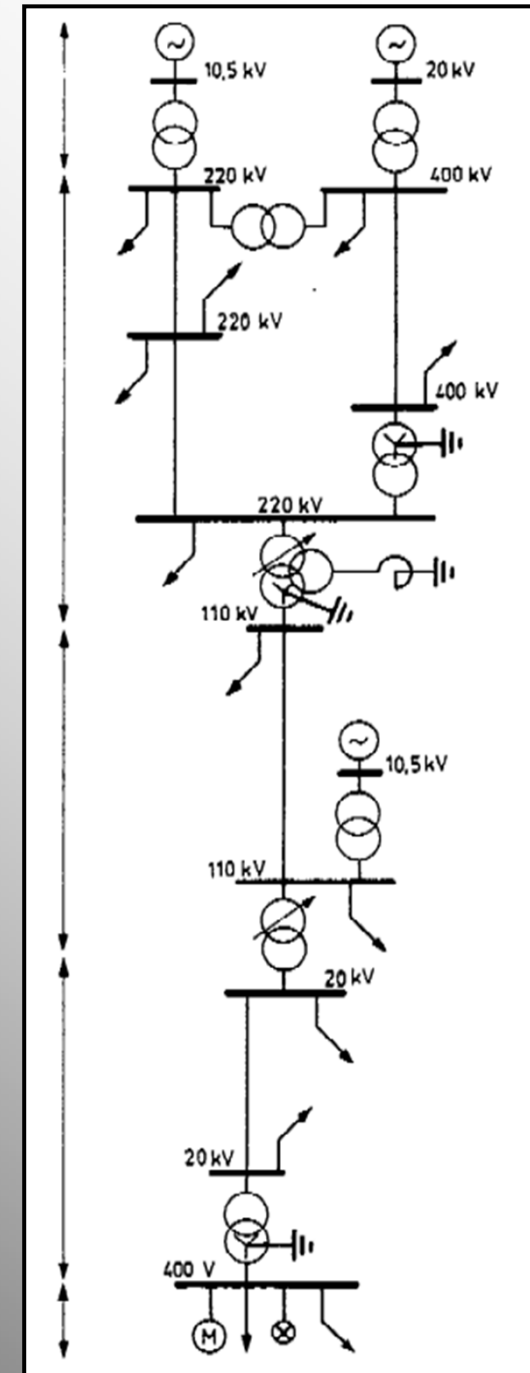
- syöttöasema (110/20 kV)

## Keskijännite- (välijännite-)jakelu

- 20 kV johdot

## Pienjännitejakelu

- 0,4 kV johdot ja kuluttajat



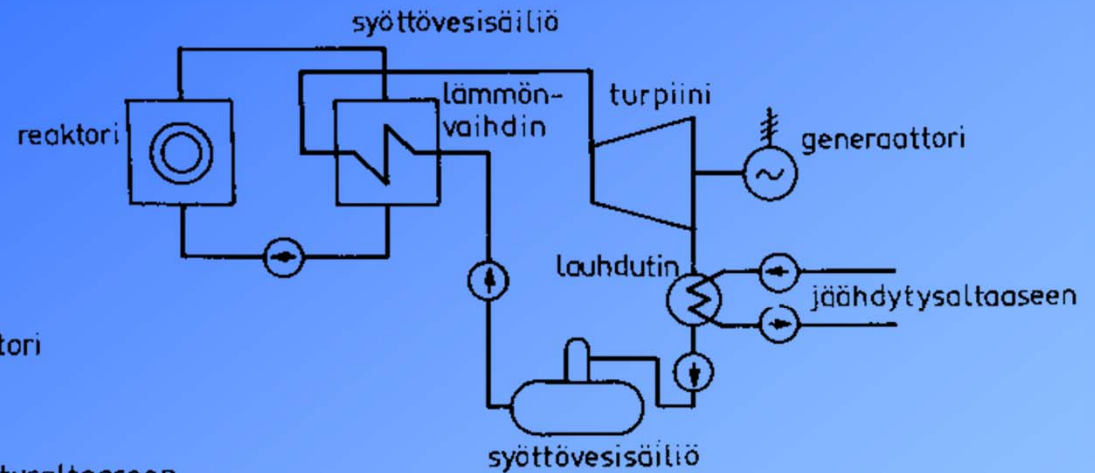
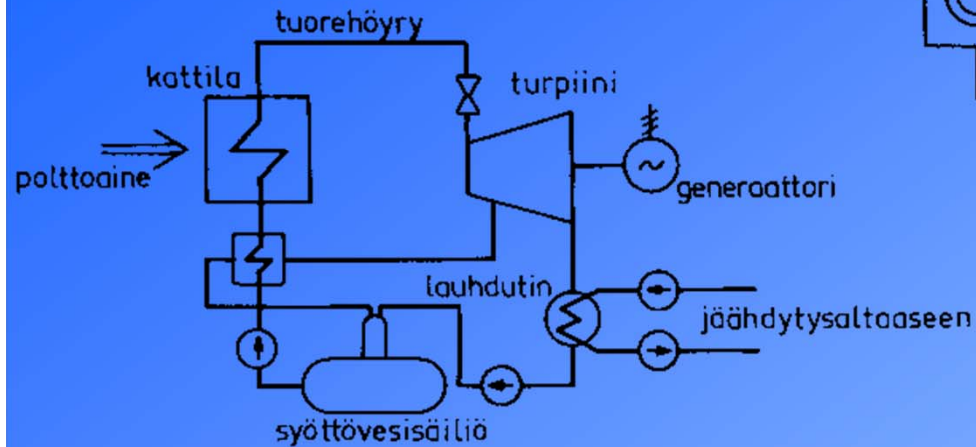
# Pohjoismainen yhteis- käyttöverkko vuonna



Nordel

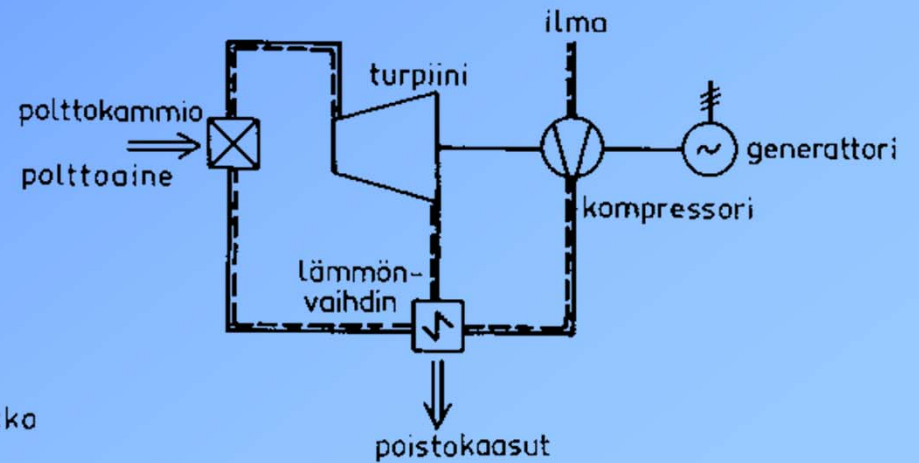
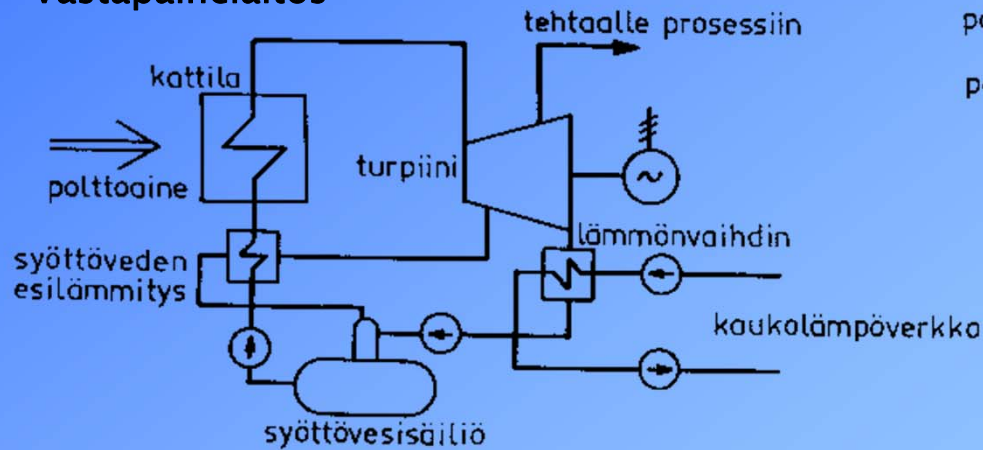
# Voimalaitosten ominaisuudet

## Lauhdevoimalaitos (fossiilinen polttoaine)



## Lauhdevoimalaitos (painevesireaktori)

## Vastapainelaitos



## Kaasuturbiinilaitos

# PERINTEINEN HÖYRYVOIMALAITOS

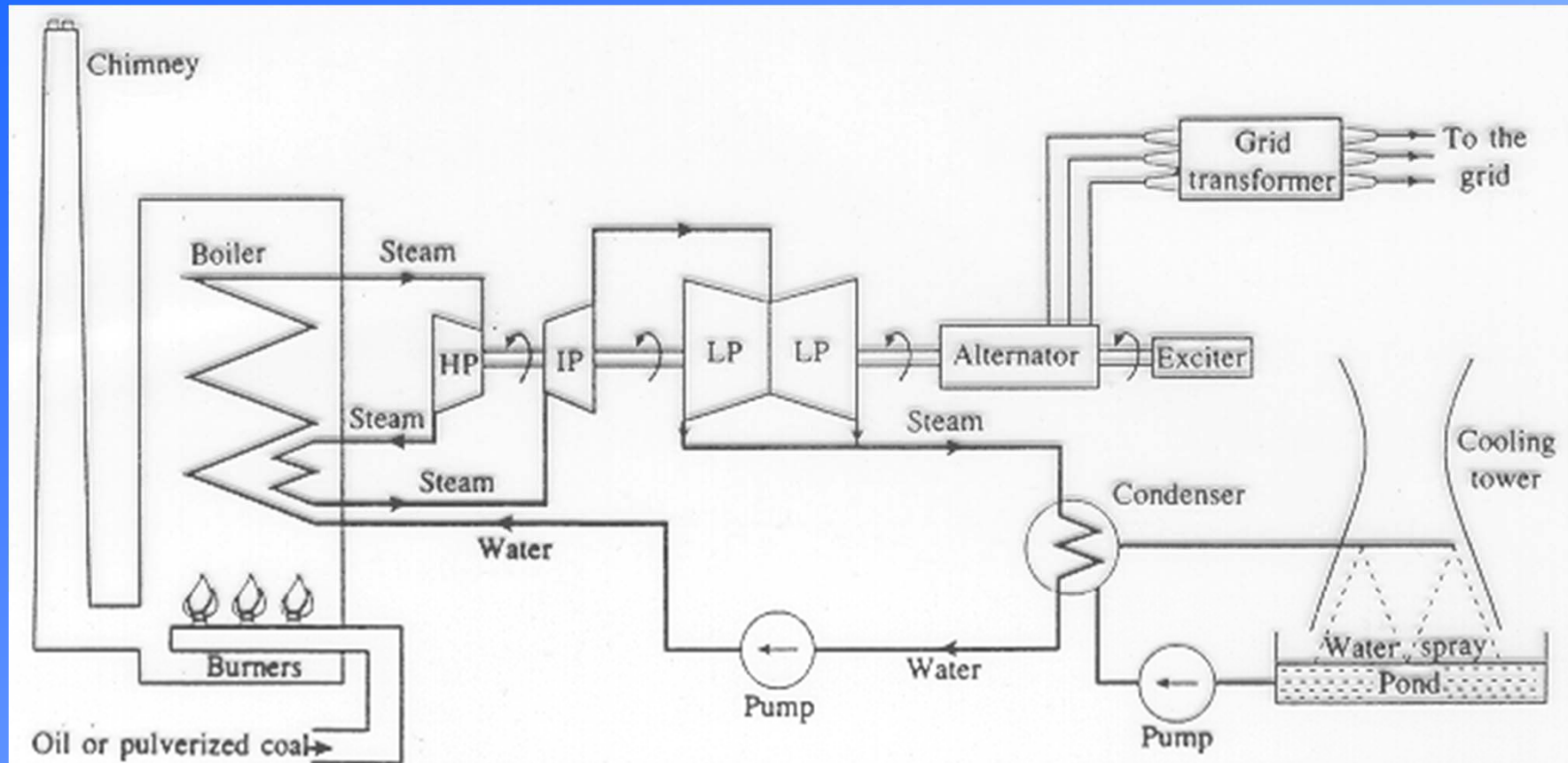


Figure 7.1 Schematic diagram of a coal- or oil-burning power station. HP, IP and LP are the high-pressure, intermediate-pressure and low-pressure turbines respectively

# Höyryvoimalaitosten ominaisuuksia

Polttoaineena kivihiili, öljy tai turve

Hyötysuhde parhaimmillaan 40%

Perus- tai välikuormalaitoksia

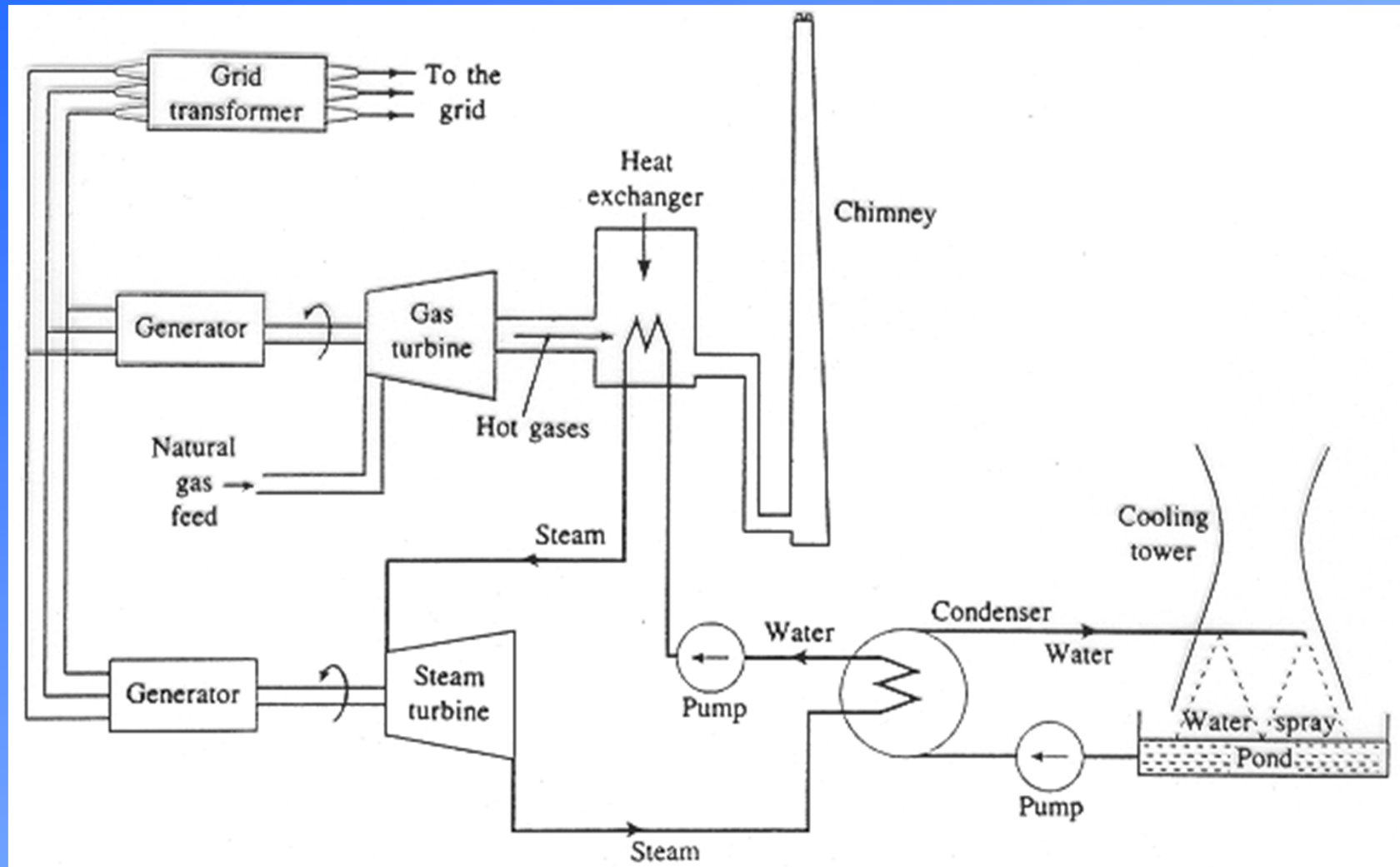
Suuri ympäristörasitus: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ja NO<sub>x</sub>

Kokonaishyötysuhde paranee jos jäännäslämpö voidaan hyödyntää lämmitykseen

⇒Lauhdutin korvataan lämmönvaihtimella

⇒"vastapainevoimalaitos"

# Kombivoimalaitos



# Kombivoimalaitosten ominaisuuksia

Yksi generaattori kaasuturbiinin perässä, toinen höyryturbiinin

Kaasuturbiinin hukkalämpö hyödynnetään höyryn tuotannossa

SO<sub>2</sub> ja NO<sub>x</sub> - emissiot paremmin hallinnassa kuin perinteisissä voimalaitoksissa

Vastapainekäytössä termien hyötysuhde on erittäin hyvä. Sähkön ja lämmön suhde noin 50/50

# YDINVOIMALAITOKSET

## Painevesi- ja kiehutusvesireaktori

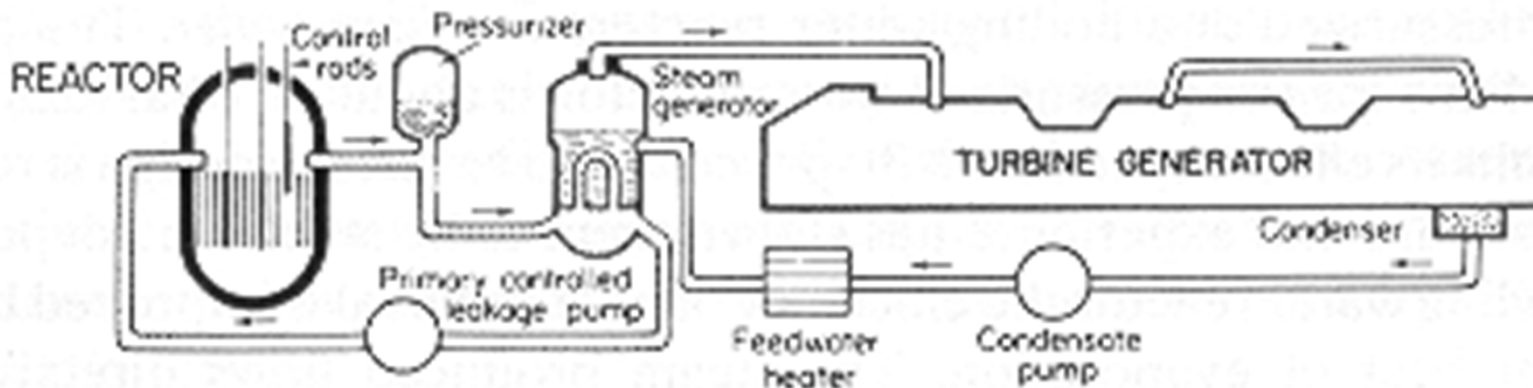


Figure 1.17 Schematic diagram of a pressurized water reactor. (Permission of Edison Electric Institute.)

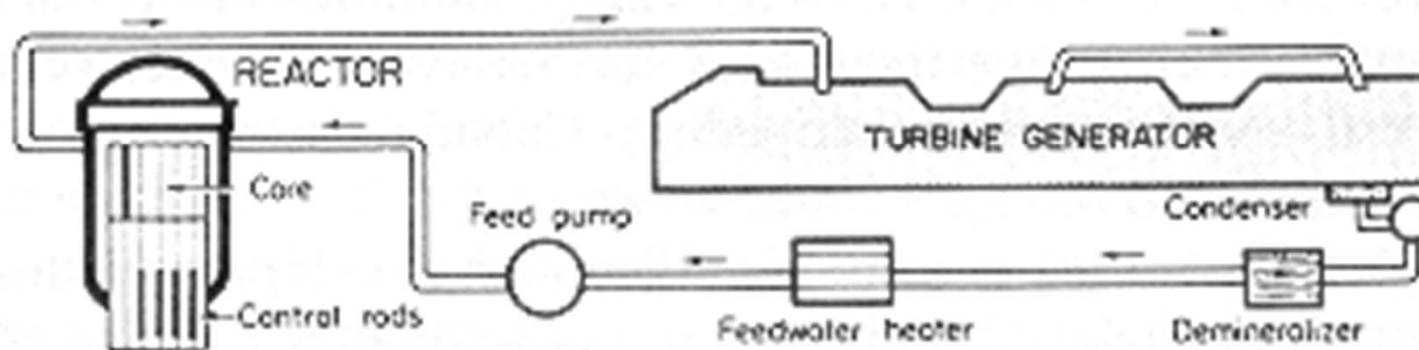


Figure 1.18 Schematic diagram of a boiling water reactor. (Permission of Edison Electric Institute.)



# YDINVOIMALAITOSTEN OMINAISUUKSIA

Reaktoria lukuunottamatta perinteisiä höyryvoimalaitoksia

Kalliit investoinnit & halpa polttoaine => peruskuormalaitoksia

Ei emissioita: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, tai NO<sub>x</sub>

Käytetyn polttoaineen jälkikäsittely ja loppusijoitus

Nykyiset laitokset perustuvat U-235:n fission (0,7%  
luonnonuraanista 235:ttä)

Hyötöreaktori: U-238 muunnetaan plutoniumiksi

Fuusioenergia: D+T= He+n tai D+D=T+H tai D+D=He+n

# Voimalaitosten ominaisuudet ja tuotantokustannukset

## Vesivoima

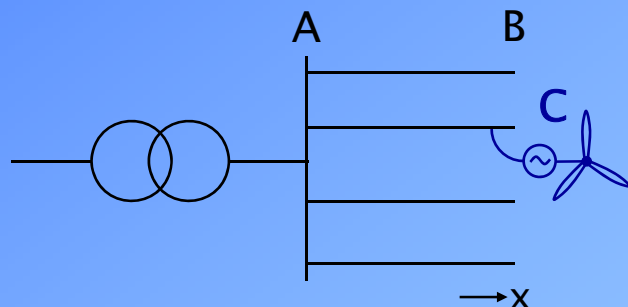
- kalliit investoinnit
- vaihtelevat virtaamat
  - varastointi
- hyvät tehonsäätömahdollisuudet
  - käytön rajoitukset
    - tulvat
  - vedenpinnan tason rajoitukset
- sääntelyssä luonnollinen vesistö tai tekoallas
- Suomessa alkaa olla rakennettu

## Aurinkovoima

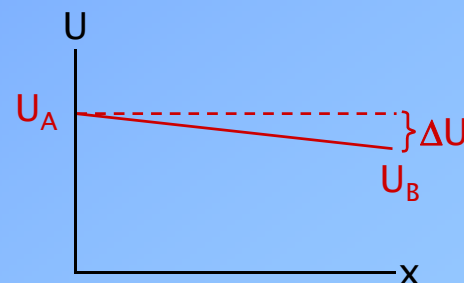
- kennon pieni hyötysuhde n. 15 % ja suuri hinta ( x 10 )
- valon riittävyys meillä ongelma

## Tuulivoima

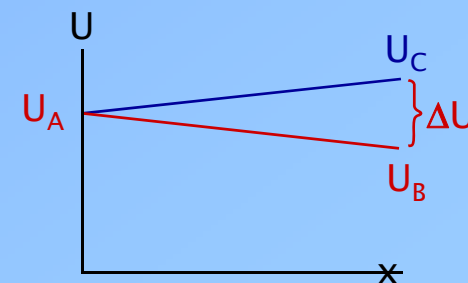
- taloudellinen laitoskoko ~ 1 MW
- suuria tuulivoimapuistoja 100 – 1000 MW
- sähköverkkoon liittäminen voi olla ongelmallista



verkon jännite normaalisti



jos pisteessä C tuulivoimala



# Tuotantotavat

## •Vesivoima

- epätahti- tai tahtigeneraattori
- teho riippuu veden virtauksesta
  - veden virtausvaihtelut
  - allaskapasiteetti

$$P = QH\eta\rho g$$

$P$  = teho (W)

$Q$  = virtaus (m<sup>3</sup>/s)

$H$  = putouskorkeus (m)

$\eta$  = kokonaishyötysuhde

$\rho$  = veden tiheys (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = putoamiskiihtyvyys  
(9,8 m/s<sup>2</sup>)

# Tuotantotavat

## •Tuulivoima

- Sijoitetaan paikkaan, jossa tuulen nopeuden vuotuinen keskiarvo on korkea
- Useita laitevalmistajia, erilaisia laitekonstruktioita
- Nopeasti kasvava tuotantomuoto
- Suurin yksikkökoko nyt noin 5 MW
- Isoja off-shore-tuulipuistoja rakenteilla

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A$$

$P$  = teho (W)

$C_p$  = kerroin

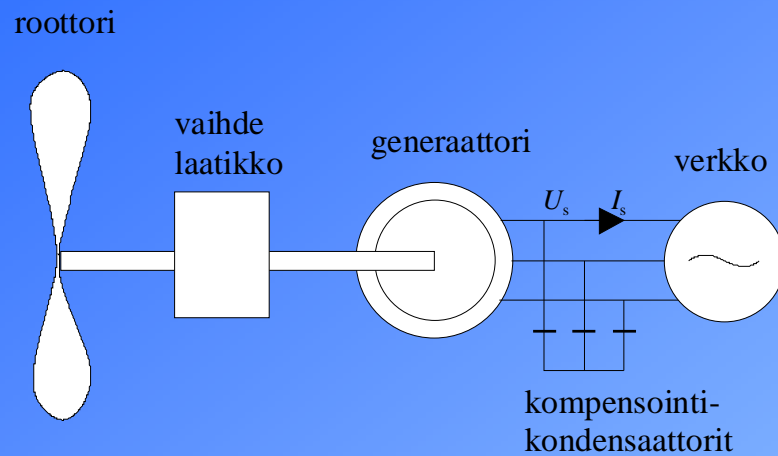
$V$  = tuulen nopeus (m/s)

$A$  = roottorin pyyhkäisyala (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = ilman tiheys (1,225 kg/m<sup>3</sup>)

# Tuotantotavat

- **Tuulivoimalaitokset**
- **Toimintaperiaatteita**



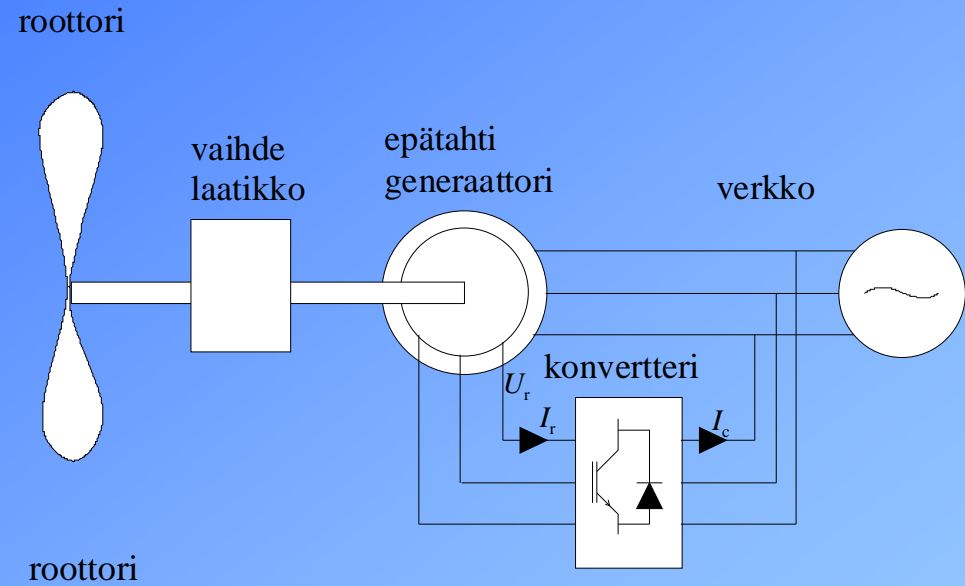
- **Oikosulkumoottori generaattorina**



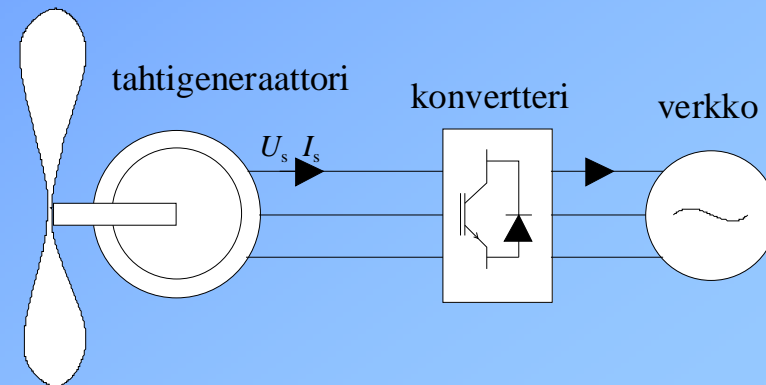
# Tuotantotavat

- **Tuulivoimalaitokset**

- **Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori**



- **Taajuusmuuttajan kautta syötetty tahtigeneraattori**



# Aurinkopaneelin tehontuottoon vaikuttavia tekijöitä

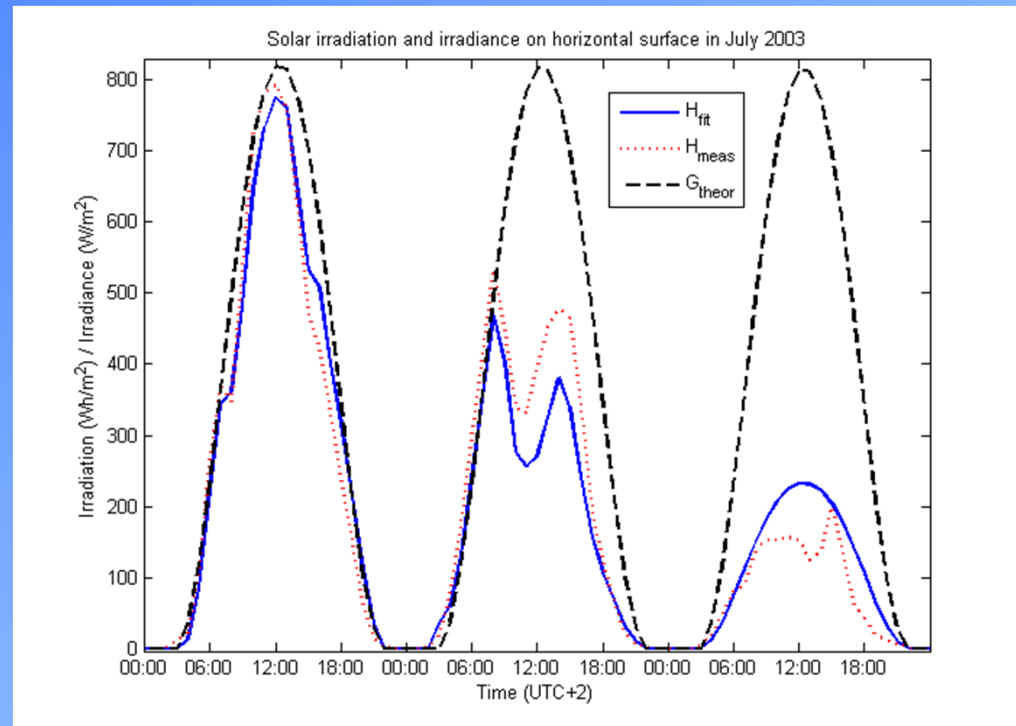
- Auringon säteilyvoimakkuus
  - Säteiden voimakkuus vaihtelee Auringon paikasta riippuvan säteilyn tulokulman mukaan
  - Pilvet estävät suoran säteilyn, mutta ilmakehässä sironnutta hajasäteilyä tulee aina jonkin verran
  - Ilmakehän puhtaus vaikuttaa myös säteiden läpäisykykyyn
- Ulkolämpötila ja Auringon säteilyvoimakkuus nostavat paneelin lämpötilaa, jolloin paneelin hyötysuhde laskee
- Paneelin muut ominaisuudet
  - Kaupallisten piikkennojen ominaisuudet ovat keskenään lähes samat

# Säteilyenergian mallintaminen

Merkitsevin  
Parametri on  
Auringonpaiste-  
Tunnit ssh (%)

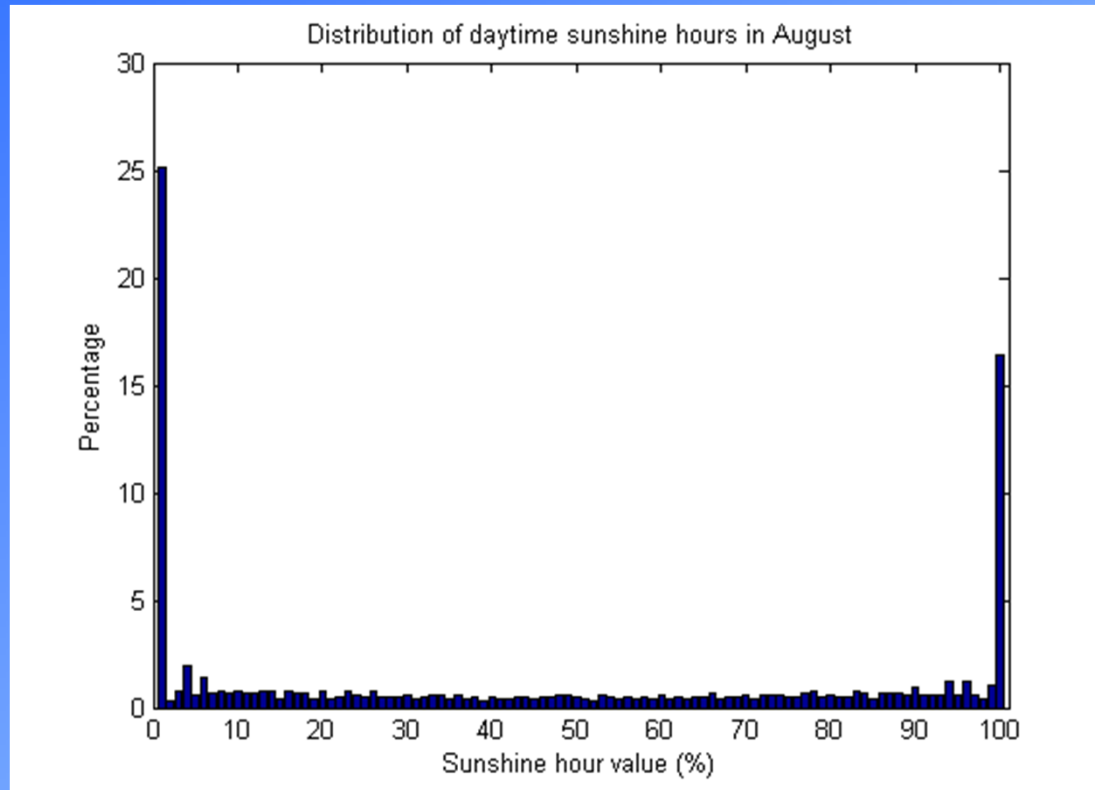
Kirkas taivas:

- ssh = 100%



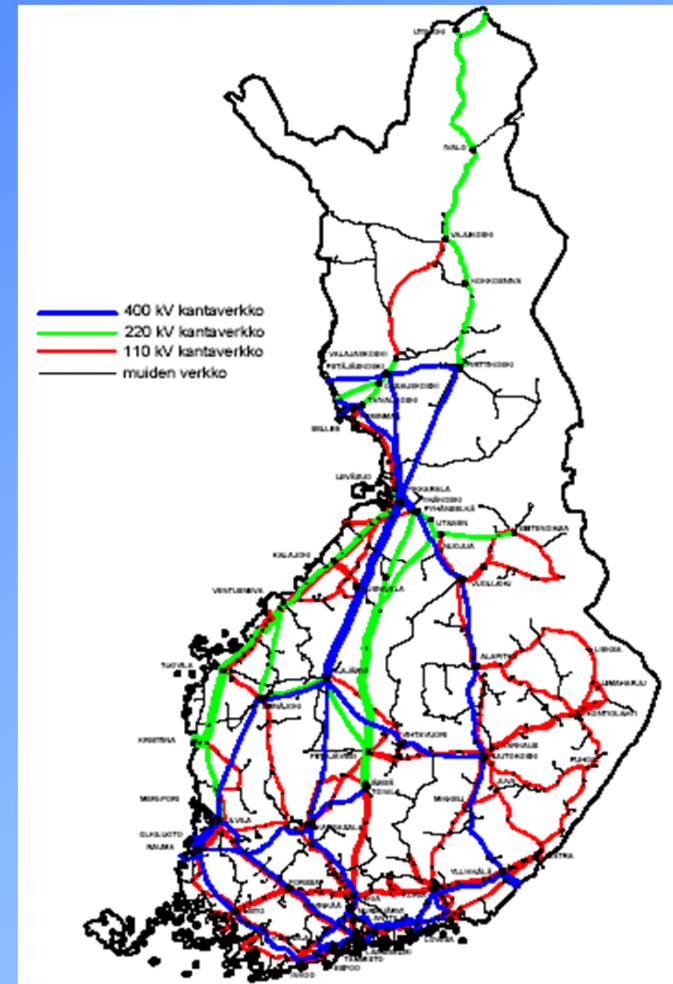


# Auringonpaistetuntien jakauma Suomessa (%)



# Sähkön siirto- ja jakeluverkot

- Suomen kantaverkosta vastaa Fingrid Oyj. Sillä on suurjännitteisiä voimajohtoja yhteensä noin 14 000 km ja sähköasemia 100



# Sähkönsiirtojärjestelmä



# 400kV ilmalinja

400 kilovoltin avojohdossa on tavallisesti 3 vaihejohdinta (tai johdinparia) ja 2 ukkosjohdinta. Eristinuketjun pituus on noin 4 metriä (18–21 lautasta).

Johdon etäisyys maasta on yleensä vähintään n. 8 metriä ja tiestä n. 9 metriä.



# 110kV ilmalinja

110 kilovoltin avojohdossa on tavallisesti 3 vaihejohdinta (tai johdinparia) ja 2 ukkosjohdinta. Eristinuketjun pituus on noin 1 metri (6-8 lautasta)

Johdon etäisyys maasta on yleensä vähintään n. 6 metriä ja tiestä n. 7 metriä.



# Tehomuuntajat

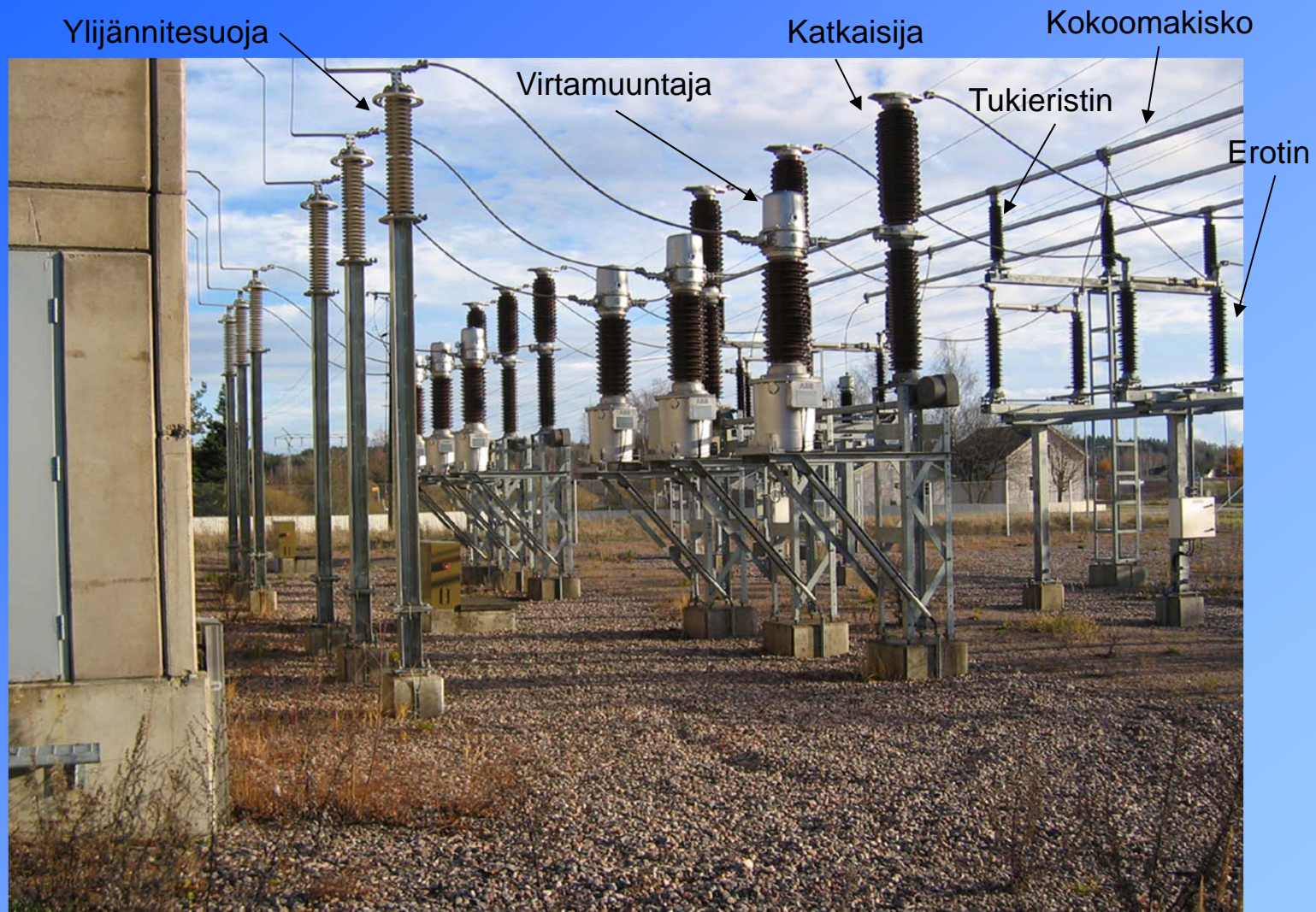
Muuntajan varusteet:

- läpivientieristimet
- öljyn jäähdyttimet
- käämikytkin
- paisuntasäiliö
- suoja- ja valvontalaitteet

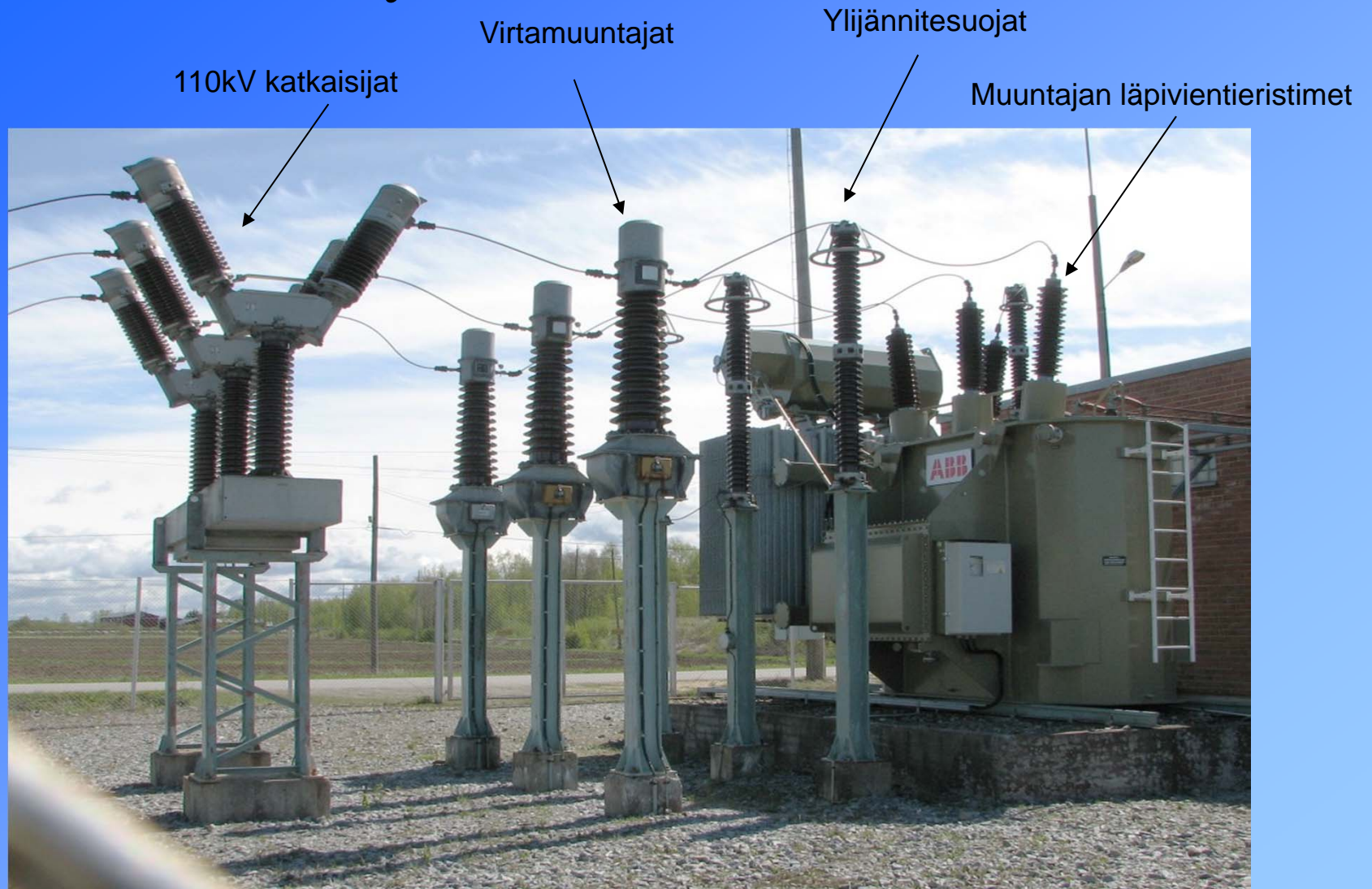


110 kV sähköaseman muuntaja

# Kytinasemalaitteet



# Kytinasemalaitteet





# Kytkinasemalaitteet

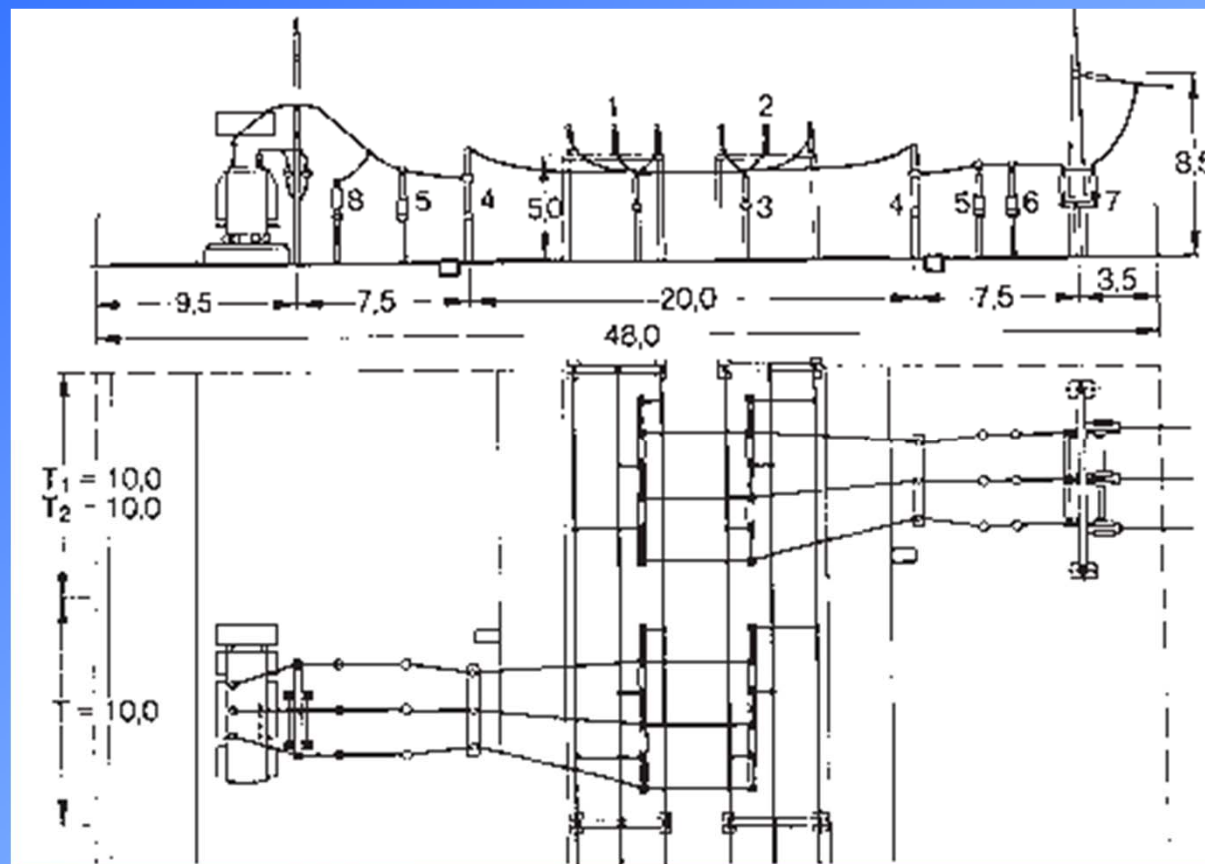
Jännitemuuntaja



# Sähköaseman kaavio – haja-alue

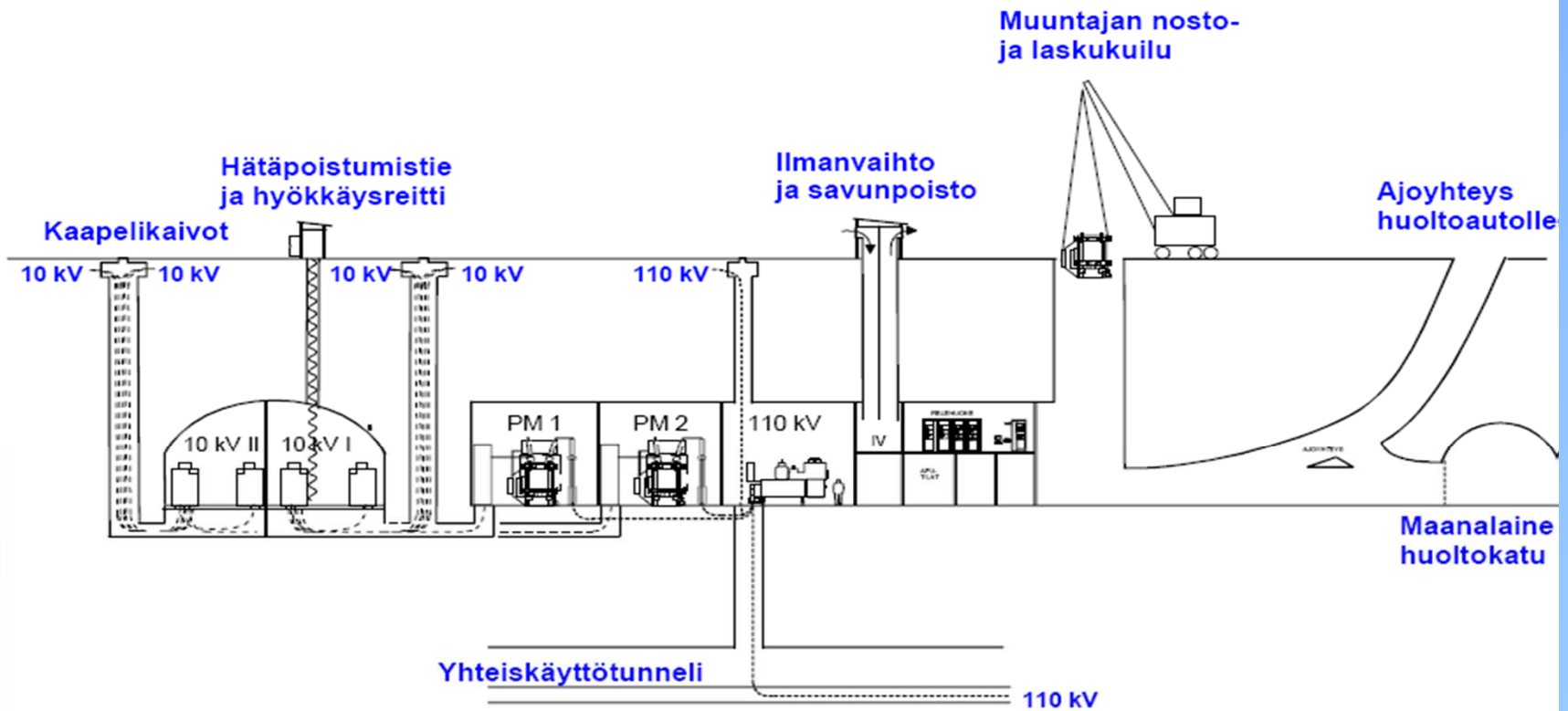
123kV 2-KK järjestelmä

1. kokoojakisko(KK) I
  2. KK II
  3. KK-erottimet
  4. Katkaisija
  5. Virtamuuntaja
  6. Jännitemuuntaja
  7. Linjaerotin
  8. Ylijännitesuoja
- T kenttäleveys (m)



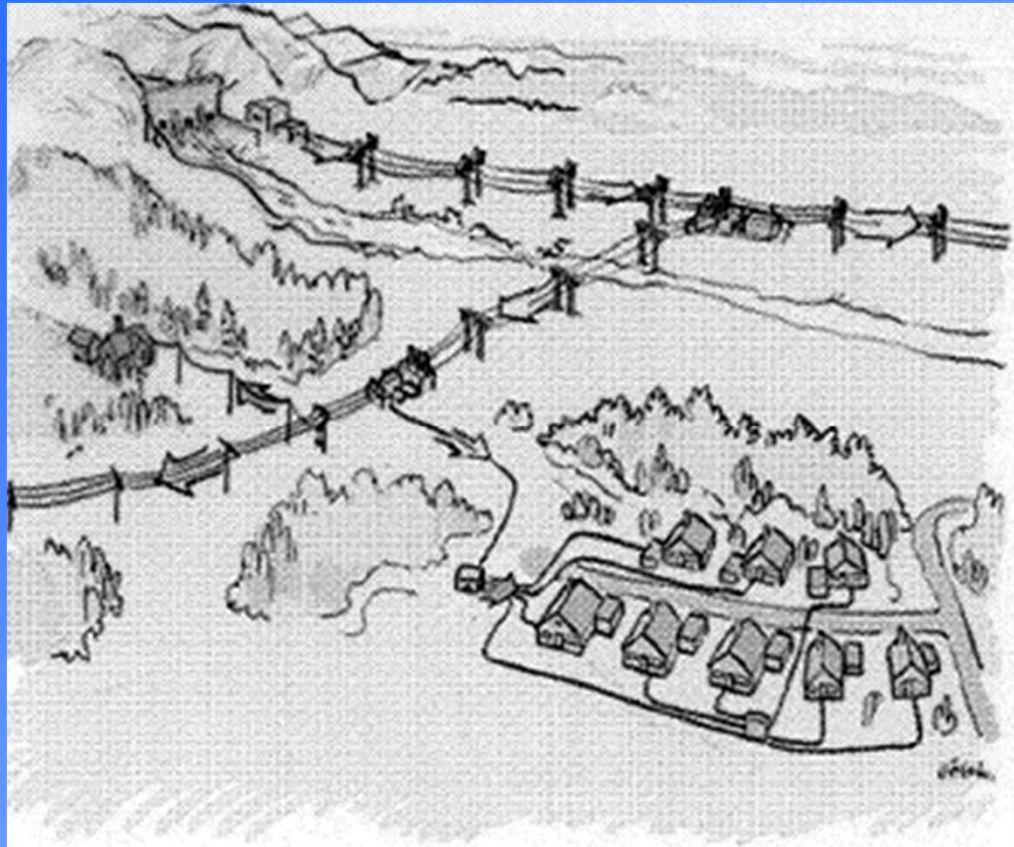
# Kytkinlaitosten rakenne

## Maanalaiset sähköasemat



# Jakeluverkon rakenne

## Perinteinen järjestelmä



•voimalaitos



•kantaverkko

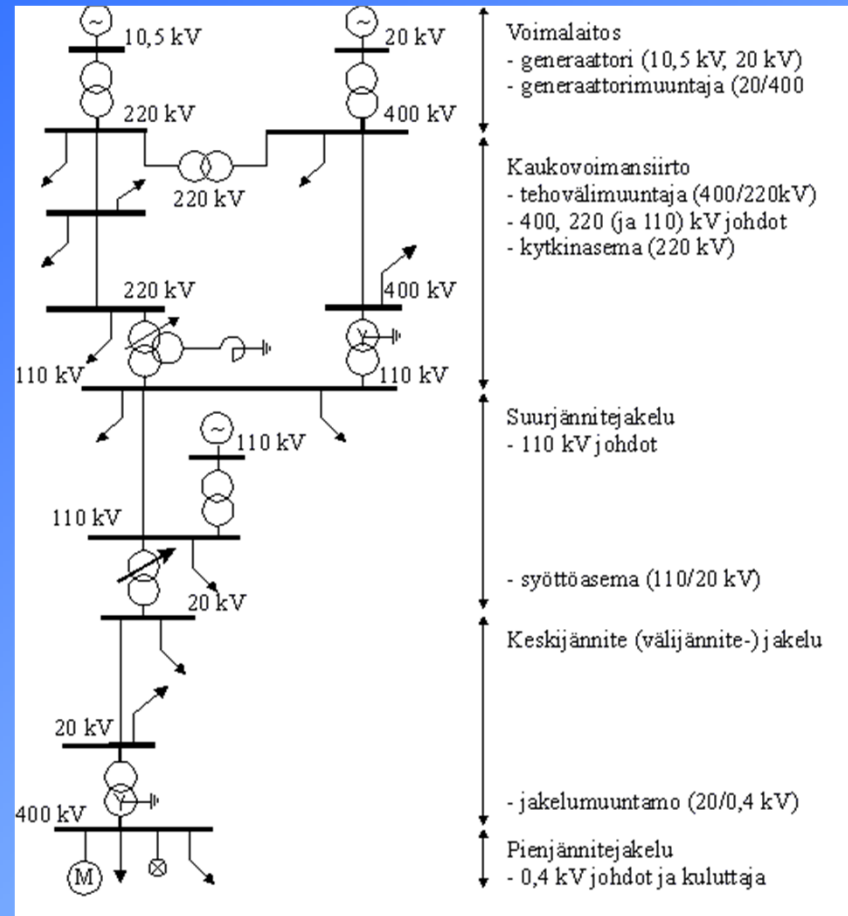


•alueverkko

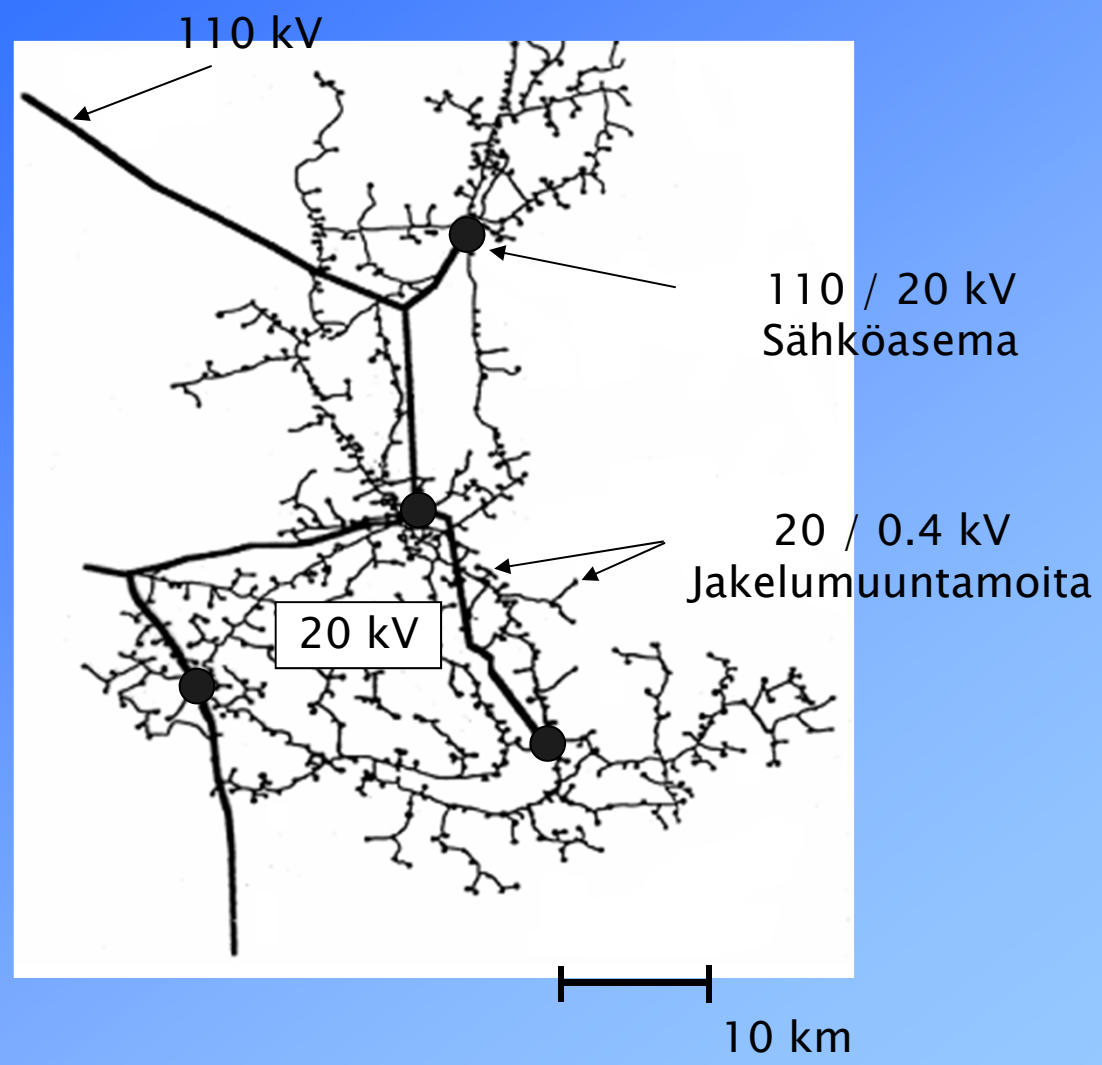


•jakeluverkko

# Sähköjaketun periaate



# Jakeluverkon rakenne



## 20 kV avojohto ja PAS -johto



Eristämätön johdin

20 kV avojohto voidaan rakentaa myös käyttäen ohuella muovikerroksella päällystettyjä johtimia. Tällaisissa PAS -johdoissa johtimet ovat selvästi lähempänä toisiaan kuin tavallisessa 20 kV avojohdossa

PAS -johto= Päällystetty Avojohto Suurjännitteelle

20 kilovoltin avojohto muodostuu kolmesta paljaasta metallisesta vaihejohtimesta, jotka ovat yleensä rinnakkain. Johtimet on kiinnitetty orressa oleviin eristimiin. Pylväät ovat useimmiten puuta. Johtoa käytetään pääasiassa jakeluverkkoyhtiöiden verkoissa taajamien ulkopuolella paikalliseen voimansiirtoon sähköasemien ja kuluttajamuuntajien välillä



PAS johto 47

# Jakeluverkon rakenne

## Keskijänniteverkko (1/3)

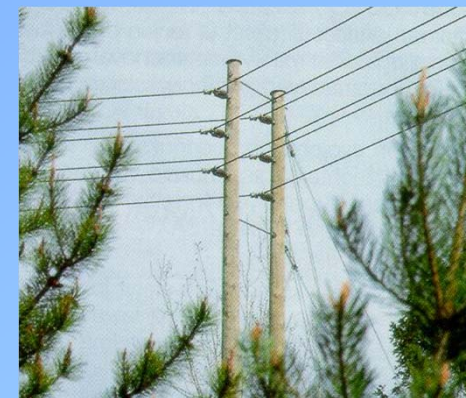
- 3-vaiheinen, 20 kV
  - ei nollajohdinta
- silmukoitu, käytetään säteittäisenä
  - erottimet, osassa kauko-ohjaus
  - korvausmahdollisuudet vikatilanteissa
- maasta erotettu tai sammutettu (kompensoitu)
- suojaus releillä + katkaisijoilla
- tyypillinen siirtomatka 20...30 km (Lapissa jopa 100 km)
- tyypillinen siirtoteho muutamia megawatteja



# Jakeluverkon rakenne

## • Keskijänniteverkko (2/3)

- Ilmajohdot
  - teräsalumiinijohtimet 25...201 mm<sup>2</sup>
  - hinta 10...20 k€/km
- Päällystetyt ilmajohdot, PAS-johdot
  - ohut eristys pinnassa - ei täyttä jännitekestoisuutta
  - kapeampi johtokatu; usein kaksois- tai kolmoisjohtona
  - 20...30 % kalliimpi kuin vastaava avojohto



# Jakeluverkon rakenne

## Keskijänniteverkko (3/3)

- Maakaapelit
  - täysi eristyskyky, muovieristys
  - poikkipinnat 120...240 mm<sup>2</sup>
  - hinta 30...50 k€/km kaivuolosuhteista riippuen
    - trendinä mm. Tanskassa ja Ruotsissa
- Keskijänniteilmakaapeli SAXKA - vähän käytetty



Maakaapeli



Keskijänniteilmakaapeli

# Sähköjohdot

## Kaapelit

- Ilma- ja maakaapelit 110/20/1kV
- täysi eristyskyky, muovikaapelit
- poikki-pinnat 25...240 mm<sup>2</sup>

Ilmakaapeli



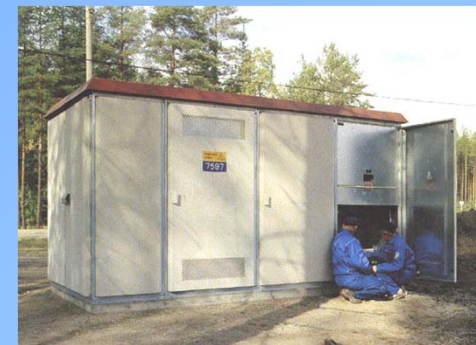
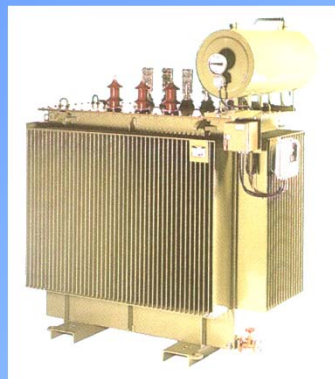
### RAKENNE

Johdin	25 mm <sup>2</sup> : Vesitiivis yksilankainen alumiinjohdin 50 ... 185 mm <sup>2</sup> : Vesitiivis pyöreä tiivistetty alumiinjohdin
Johdinsuoja	Puolijohtava muovi
Eristys	PEX-muovi
Hohtosuoja	Puolijohtava muovi
Vesitiivistys	Veden vaikutuksesta paisuva puolijohtava nauha
Kosketussuoja	Alumiini-muovilaminaatti, joka toimii samalla poikittaissuuntaisena
Vaihevaippa	Säänkestävä musta PE-muovi
Kannatin	Vesitiivis pyöreä muutamalankainen sinkitty
Kannattimen eristys	Säänkestävä musta PE-muovi
Kertaus	Kolme vaipattua vaihetta kerrattu kannattimen ympärille

# Jakeluverkon rakenne

## Jakelumuuntamo

- 20 kV johdon ja muuntajan välissä yleensä erotin
  - ylijännitesuoja tai suojakipinäväli
- Muuntamorakenne + muuntaja
  - ilmajohdoissa pylväsmuuntamo, 1- tai 2-pylväsrakenne
  - kaapeliverkoissa puisto- tai kiinteistömuuntamo
- Pienjännitekeskus
  - pylväsmuuntamossa pylväsvarokekotelot
  - puistomuuntamossa 'oikea' keskus
- Muuntajan runko on suojamaadoitettu



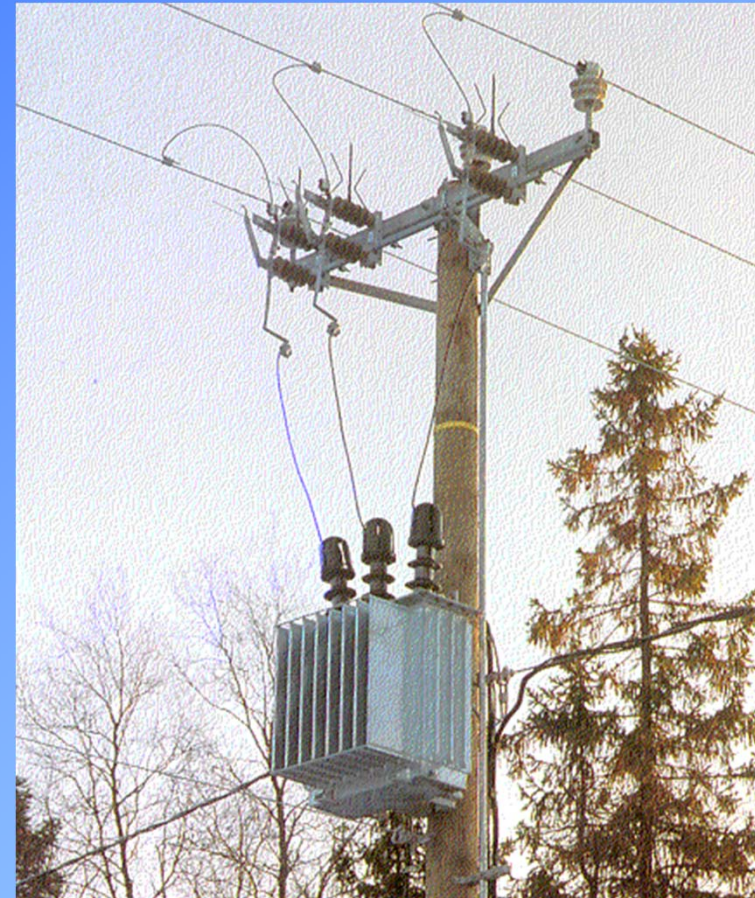
# Jakelumuuntamot

- **Muuntajatyyppejä**

- Pylväsmuuntajat 16...100 kVA
  - Öljyeristeisiä
  - Paisuntasäiliöttömiä
- Normaalit jakelumuuntajat 30...3150 kVA
  - Öljyeristeisiä
  - Paisuntasäiliöllä varustettuja
  - Väliottokytkimet  $\pm 5\%$
- Valuhartsieristeiset jakelumuuntajat 315...2000 kVA
  - Palamattomia
- Hermeettiset jakelumuuntajat 50...1000 kVA
  - Öljyn ja ilman yhteys estetty, kosteus ei pääse muuntajaan  $\Rightarrow$  vanheneminen hidastuu



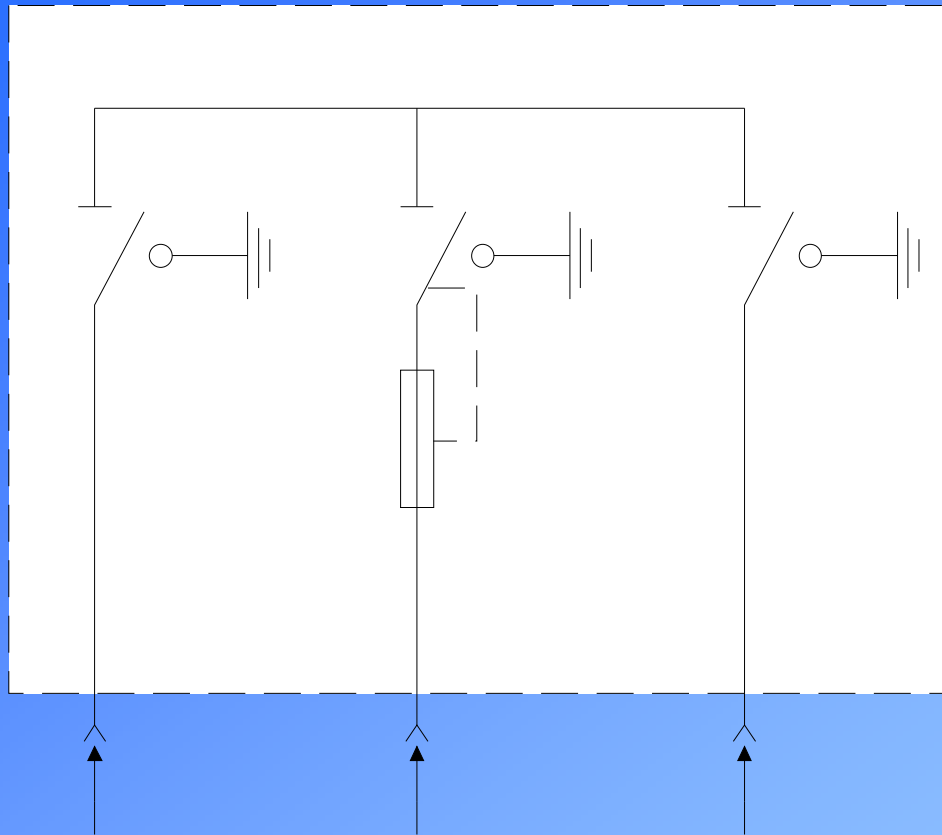
# Jakelumuuntamot



- 20 / 0,4 kV pylväsmuuntamoita

# Jakelumuuntamot

## Ring main unit (RMU)



kj-syöttö

kj/pj-muuntaja

kj-syöttö

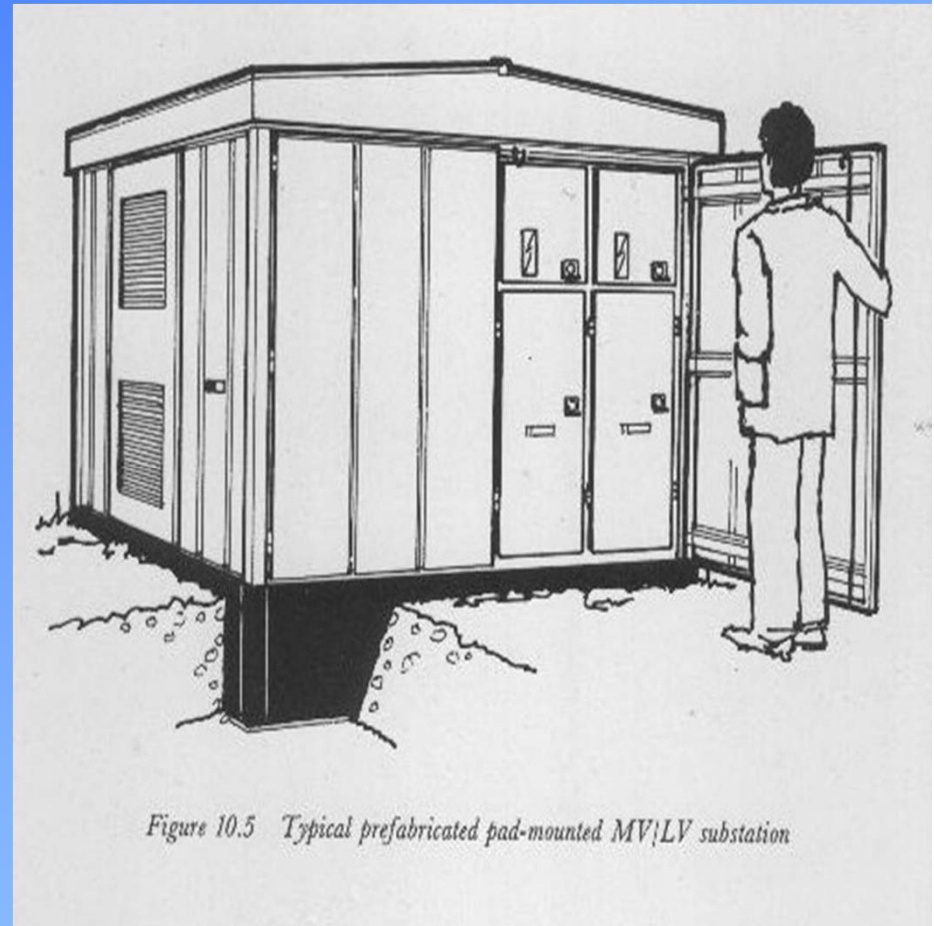
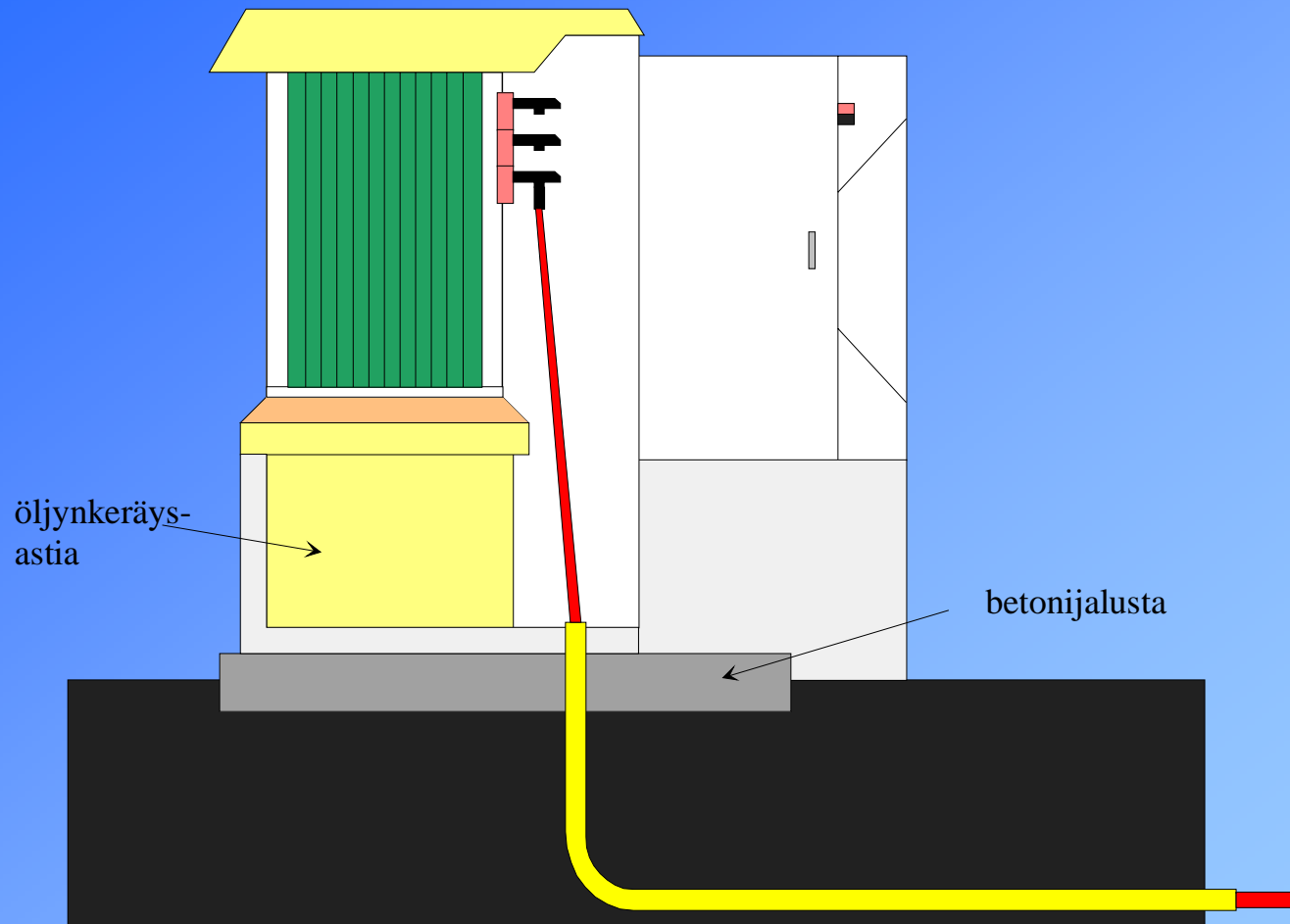


Figure 10.5 Typical prefabricated pad-mounted MV/LV substation

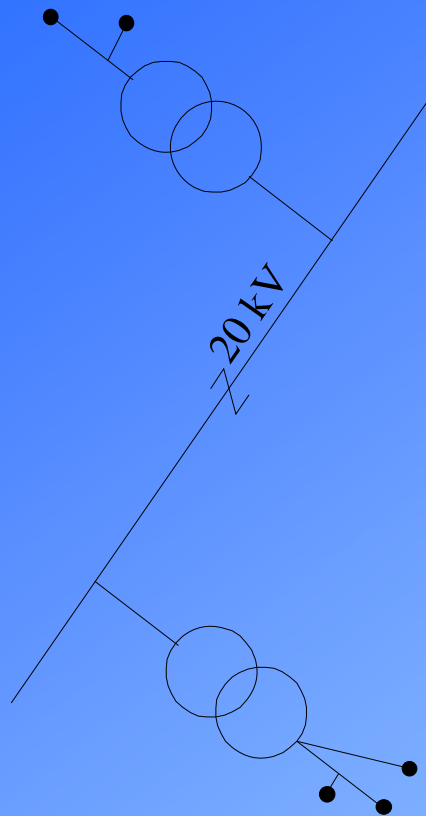
# Jakelumuuntamot

- Jakelumuuntamo (muuntaja 50 – 315 kVA)

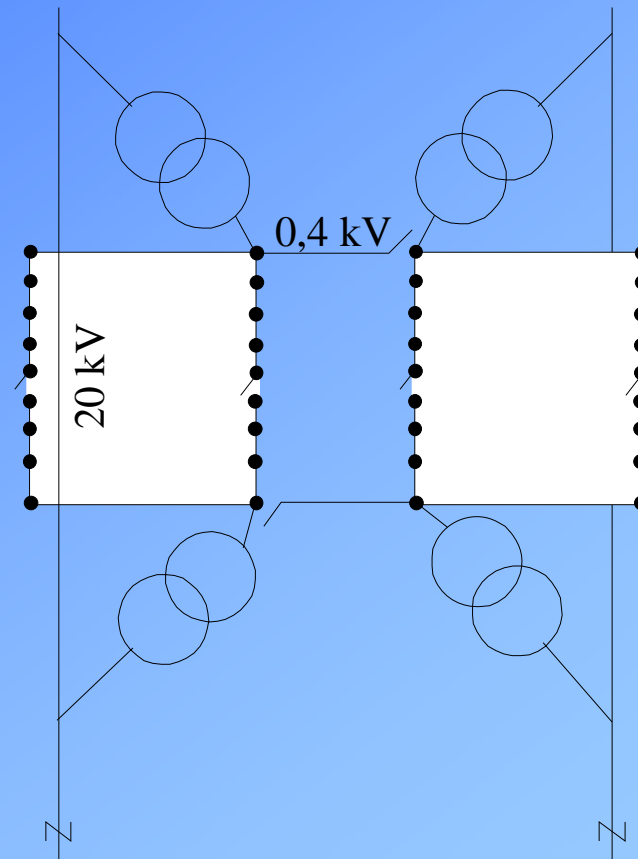




# Jakelumuuntamot



• asiakas  
Maaseutu



• jakokaappi  
Taajama

# Jakelumuuntamot, pienjänniteverkot

