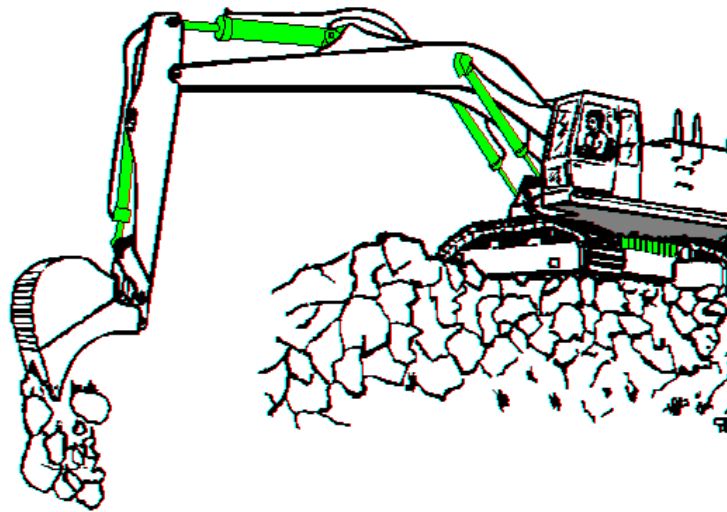


## MOBILETEKNIikka / HYDRAULIIKKA



Mobile hydraulics: Excavator

## SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	3
2. MOBILEVENTTIILIT.....	4
2.1 Venttiilirakenteet.....	4
2.1.1 Yksilohkoventtiilit.....	4
2.1.2 Monilohkoventtiilit.....	5
2.1.3 Hajautetut venttiilit.....	5
2.2 Venttiilien osat ja hydraulinen kytkentä.....	6
3. VENTTIILI – JA JÄRJESTELMÄTYYPIT.....	7
3.1 Avoimen keskiasennon ympärpumppausjärjestelmä, CFO.....	7
3.2 CFC-Järjestelmä.....	10
3.3 Vakiopainejärjestelmä (CP).....	12
3.3 Kevennetty vakiopainejärjestelmä (CPU).....	13
3.4 Kuormantunteva järjestelmä (LS).....	14
4. VENTTIILIEN OHJAUS.....	17
4.1 Yleistä.....	17
4.2 Mekaaninen ohjaus.....	17
4.3 Hydraulinen ohjaus.....	18
4.3 Pneumaattinen ohjaus.....	19
4.4 Sähköhydraulinen ohjaus.....	20
5. Ohjausjärjestelmän käyttöönotossa tehtävät yleisimmät säädöt.....	22
5.1 Minimitilavuusvirran säätö.....	22
5.2 Maksimitilavuusvirran säätö.....	23
5.3 Ramppien säätö.....	23
6. MOBILEVENTTIILIEN VALINTAAN LIITTYVIÄ PIIRTEITÄ.....	24
6.1 Lähtoporttien paineenrajoitus.....	24
6.2 Painekompensaattori.....	25
6.3 Karojen valinta.....	25
6.3.1 Kuormanlasku.....	26
6.4 Muita valintoja.....	27
6.5 Kuormanlaskun hallinta erilliskuristusta käyttäen.....	27
6.6 ELS-järjestelmä.....	28
7 JARRUJÄRJESTELMÄT.....	30
8. HYDROSTAATTINEN OHJAUS.....	30
9. JÄRJESTELMÄTYYPIT.....	33
9.1 Avoin hydraulijärjestelmä.....	33
9.2 Suljettu hydraulijärjestelmä.....	34
9.3 Sekundäärisäädetty tehonsiirto.....	34
9.4 Suljetun järjestelmän toimintaperiaate.....	35
9.4.1 Erilaiset kytkentäperiaatteet.....	36
9.5 Ajovoimansiirto.....	36
9.5.1 Ominaisuuksia.....	36
9.5.2 Ajovoimansiirron osat ja järjestelmäratkaisuja.....	37
9.6 Ajovoimansiirron ohjaaminen.....	38

# 1. JOHDANTO

Johdanto-osuudessa pyritään vastaamaan kysymykseen miten eroavat toisistaan mobilehydrauliikka (liikkuvan kaluston hydrauliikka) ja teollisuushydrauliikka. Samat fysikaaliset peruslait ovat voimassa molemmissa järjestelmissä. Seuraavassa on esitetty joitakin eroja:

- teollisuussovellutuksissa järjestelmät toimivat usein ennakolta määrätyllä tavalla, jolloin tilavuusvirrat, paineet ja tehontarpeet on helppo määrittellä
- mobilesovellutuksissa työkone joutuu usein suorittamaan hyvinkin erilaisia, jatkuvasti vaihtuvia toimintoja koneen käyttäjän ohjaamana
- mobilesovellutuksissa tarvitaan useimmiten portaatonta (proportionaalista) ohjausta
- työkoneiden työskentelyolosuhteet ovat vaikeat (suuret lämpötilavaihtelut, kosteus ja pöly)
- mobilesovellutuksissa komponenttivalintaa ei voi tehdä niin optimoidusti kuin teollisuushydrauliikassa, jolloin kokonaishyötysuhde jää alhaisemmaksi ja lämmönkehitys suuremmaksi
- mobilesovellutuksissa paino ja tilantarve pyritään minimoimaan
- helppokäyttöisyys

Edellä mainittujen erojen vaikutus on selvästi havaittavissa mobilesuintaventtiileissä, joita käsitellään luvussa 2. Tällaisia suuntaventtiilejä käytetään yleisesti kaikissa liikkuvan kaluston sovellutuksissa (nosturit, kuormaajat, metsäkoneet, trukit yms.)

Ulkoisesta yhdennäköisyydestään huolimatta venttiilit voivat poiketa toisistaan hyvinkin paljon. Esimerkkinä voi käyttää traktoriin tarkoitettua ns. isäntälinjan metsänosturin venttiiliä verrattuna nykyaikaisen metsäkoneen digitaalisesti ohjattuun suuntaventtiiliin. Jälkimmäinen on niin hinnaltaan kuin toiminnaltaan aivan eriluokkaa.

Perinteisesti työkoneiden hydrauliikkajärjestelmät sekä hydrauliikan ohjaamiseen tarkoitettujen järjestelmät ovat olleet melko yksinkertaisia mihin ovat vaikuttaneet vaativat käyttöolosuhteet sekä toimintavarmuudelle asetetut vaatimukset. Lisääntyneet tuottavuus- ja ohjattavuus vaatimukset ovat kuitenkin suuresti lisänneet elektroniikan osuutta ohjauksen osuudessa.

## 2. MOBILEVENTTIILIT

### 2.1 Venttiilirakenteet

Venttiilien rungot ovat tavallisesti harmaavalurautaa tai pallografiittivalua. Pallografiitilla saavutetaan hieman parempi paineen kesto. Karan ja venttiilipesän välykset ovat pienempiä kuin teollisuusventtiileissä. Tällä pyritään pitämään venttiilin vuoto alhaisena.

Karan vaihdon yhteydessä on syytä varmistaa käytetäänkö ko. venttiiliin yhteydessä erikokoisia, esim. värimerkinnällä varustettuja karoja.

Venttiilien perusrunkoon voi olla saatavilla erilaisia ohjausvaihtoehtoja (käsivipu-, hydraulinen-, sähköhydraulinen ohjaus).

Rakenteellisesti venttiilit voidaan jakaa yksilohko-, monilohko- ja hajautettuihin venttiileihin

#### 2.1.1 Yksilohkoventtiilit

Yksilohkoventtiileillä (kuva1) on yksi yhteinen valettu runko, johon on sijoitettu kaikki toiminnat. Karojen lukumäärä on alhaisempi kuin monilohkoventtiileissä (harvoin yli 6 karia). Sen etuja ovat:

- muotojäykkä rakenne (ei kiinni juuttumista)
- kompakti rakenne ja pieni koko
- yksinkertainen

Vastaavasti haittapuolia ovat:

- vaikeampi ja kalliimpi valmistaa (suuret susikustannukset)
- toimintojen yhdistely vaikeampaa
- suuri uusintakustannus vauriotilanteissa
- muutosten teko hankalampaa



Kuva 1: Yksilohkoventtiili

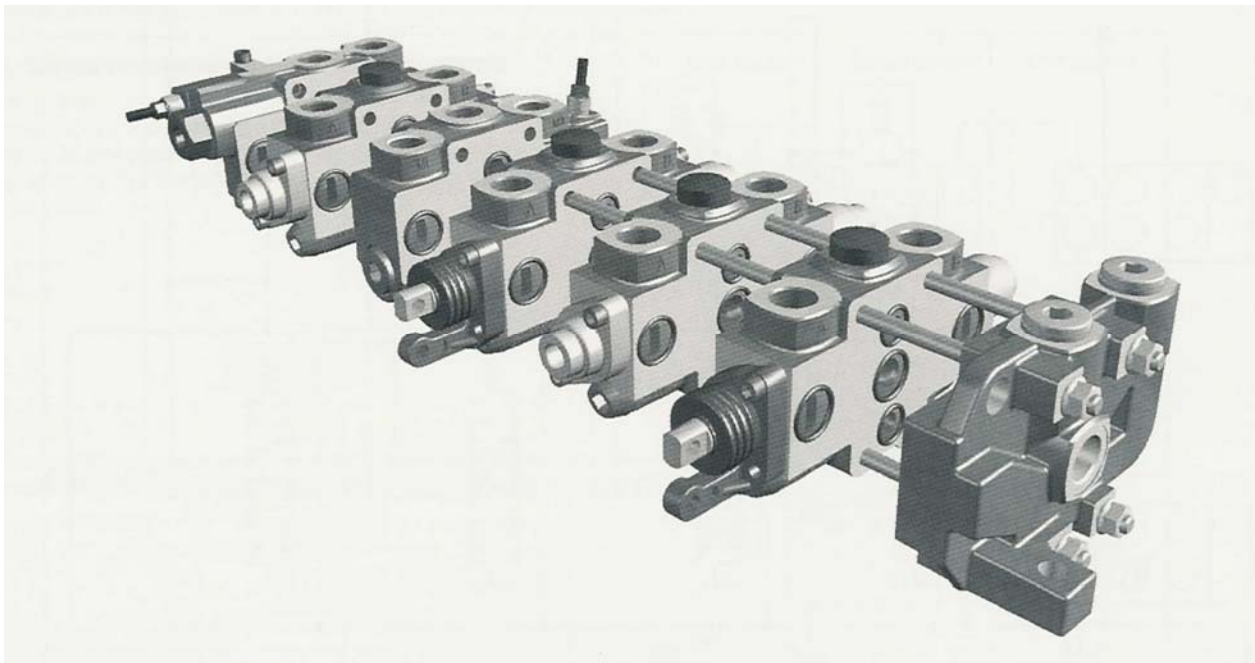
## 2.1.2 Monilohkoventtiilit

Venttiili koostuu eri toimintalohkoista (etupääty, karalohkot, ja takapääty), jotka kootaan yhteen si-depulteilla (kuva 2). Karojen lukumäärä voi olla 1...11 kpl. Näiden venttiilien etuja ovat:

- valmistaminen ja kokoonpano edullisempaa
- erilaisten toimintojen yhdistely helpompaa
- muutosten teko helpompaa
- alhaisemmat uusintakustannukset vauriotilanteissa (vain vauriokohta uusitaan)

Haittapuotia ovat:

- huonompi muotojäykkyys
- enemmän toimintahäiriöitä heikommasta muotojäykkyydestä johtuen
- enemmän vuotokohtia
- alhaisemmat työpaineet



Kuva 2: Monilohkoventtiili

## 2.1.3 Hajautetut venttiilit

Hajautettujen venttiilien periaatteena on, että jokaiselle toimilaitteelle on oma venttiilinsä, joka sijoitetaan mahdollisimman lähelle itse toimilaitetta.

Ratkaisun etuna on putkitusten väheneminen. Koska venttiilin ja toimilaitteen välinen etäisyys jää lyhyeksi, vähenevät painehäviöt. Samalla nestetilavuus, joka toimii tavallaan jousena venttiilin ja toimilaitteen välissä vähenee. Tätä ”jousta” jäykistää myös letkujen lyhentymisen. Seurauksena toimilaitteiden värähtelyalttius alenee. Ratkaisumallin kalleuden takia sitä on käytetty vain, kun siirtoimatka muodostuisi todella pitkäksi (esim. korkealle nostavat henkilönosturit). Kenttävyölien yleis-

tymisen johdosta näiden ratkaisujen ohjaaminen tulee aikaisempaa helpommaksi ja käyttö saattaa lisääntyä.

## 2.2 Venttiilien osat ja hydraulinen kytkentä

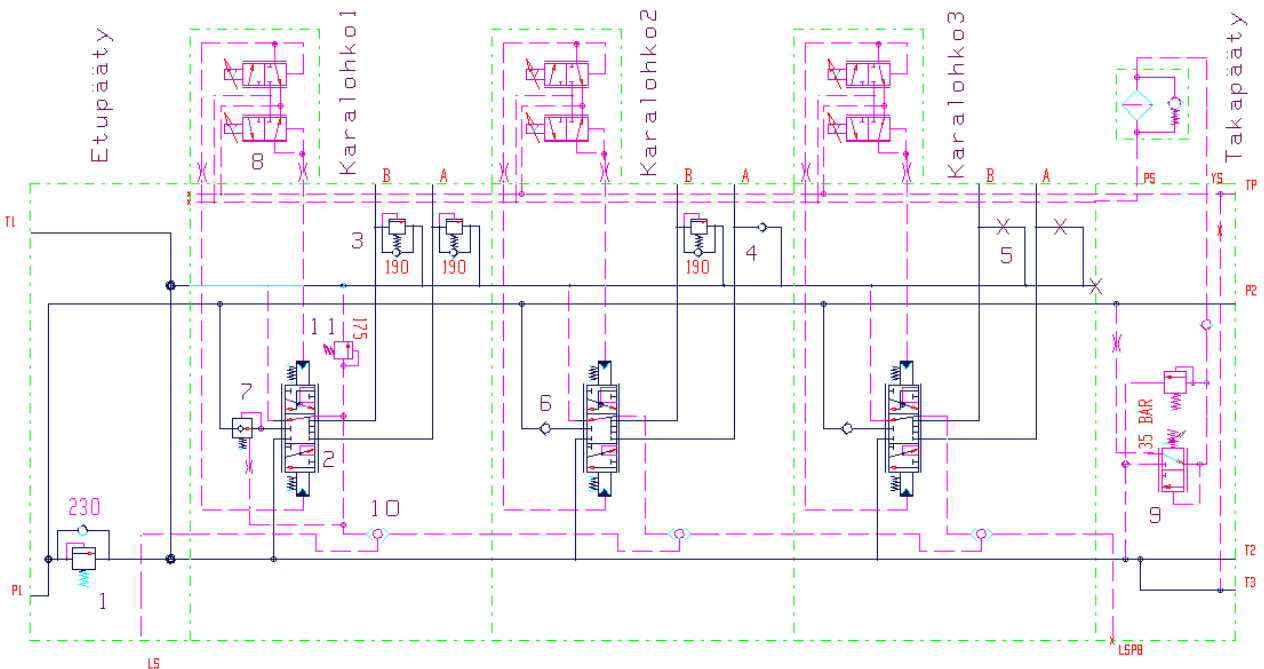
Tyypillinen monilohkoventtiilin rakenne näkyy kuvassa 1. Tavanomaisia osia ovat etupääty, karalohkot (tässä 5 kpl) sekä takapääty. Joissakin tapauksissa venttiiliin voidaan liittää ns. välisyöttölohko (suuri tilavuusvirran tarve).

Kuvassa 3 on erään venttiilin kytkentäkaavio. Fyysisestä rakenteesta riippumatta lohkoventtiilit piirretään lähes samoin. Monilohkoventtiileissä eri lohkot rajataan pistekatkoviivoin. Kuvan 3 kytkentäkaavio edustaa siis monilohkoventtiiliä, koska siinä näkyvät erilliset etupääty, karalohkot ja takapääty. Sama sisäinen kytkentäperiaate soveltuu myös yksilohkoventtiilille, lohkojen välistä voidaan jättää pistekatkoviivat pois.

Venttiilin etupääty sisältää tavallisesti paine- ja tankkiliitännät sekä pääpainerajoitusventtiilin (1). Pääpainerajoitusventtiili voi olla kiinteällä- tai säädettävällä paineasetuksella. Sen tilalla voi olla myös tulppa. Venttiilin valmistajat voivat sijoittaa etupäätyihin myös muita toimintoja.

Karalohko sisältää suuntaventtiililaittoiminnon (2) lisäksi syöttövastaventtiilin (6), jonka tilalla voi olla myös painekompensaattori (7) sekä lähtöporttikohtaisen painenrajoituksen (3). Painenrajoituksen tilalla voi olla myös ns. imuventtiili (4), tulppa (5) tai vapaa yhteys tankkiin.

Karan (2) hydraulinen toiminta ja tilavuusvirran läpäisy valitaan tapauskohtaisesti. Myös painenrajoitusvarustelu riippuu sovellutuksen tarpeista. Kuvan 2 venttiili on kuormantunteva (LS). Vaihtovastaventtiilien 10 läpi yhdistetään karoilta tulevat kuormanpainet niin, että suurin paine pääsee



Kuva 3: Venttiilin hydraulikaavio

venttiilin LS-porttiin.

Karojen ohjausmahdollisuuksia voi olla useita. Tässä käytettiin sähköhydraulista portaattomasti säädettävää (proportionaalista) esiohjausta. Muita vaihtoehtoja ovat: mekaaninen käsivipu tai kauko-ohjaus, pneumaattinen sekä hydraulinen ohjaus. Karan ohjaus voi olla myös on/off tyyppinen.

Takapääty sisältää normaalisti yhden tai useamman tankkiliitännän ja joskus myös paineliitännän. Moniin venttiileihin kuuluu myös ns. sarjaliitin, jonka avulla voidaan mm. ympärpumppausjärjestelmissä kytkeä useampia venttiileitä sarjaan. Kuvan 2 venttiilin takapäädyssä on karojen sähköhydraulisen esiohjauksen (8) paineenalennusventtiili (9). Esiohjauksen syöttöpaine tulee tätä kautta, paine alennetaan tyypillisesti tasolle 20...50 bar. Takapäädyssä voi olla myös esiohjauksen suodatus, jolla varmistetaan esiohjauksen toimivuutta.

### 3. VENTTIILI – JA JÄRJESTELMÄTYYPIT

Mobilesovellutuksissa yleisimmät järjestelmätyypit ovat:

1. Avoimen keskiasennon ympärpumppausjärjestelmä, CFO = **C**onstant **F**low **O**pen **C**enter
2. Suljetun keskiasennon ympärpumppausjärjestelmä, CFC = **C**onstant **F**low **C**lose **C**enter
3. Kuormantunteva järjestelmä, LS = **L**oad **S**ensing

Näiden lisäksi voi joskus tulla vastaan vakiopainejärjestelmä (CP) tai kevennetty vakiopainejärjestelmä (CPU). Vakiopainejärjestelmät ovat yleisiä teollisuushydrauliikassa. Mobilesovellutuksissa CPU-järjestelmiä esiintyi yleisesti vielä 90-luvun alussa.

Edellä mainitut järjestelmät koostuvat tietyistä pumppu- ja venttiiliratkaisuista. Kullakin järjestelmätyypillä on ominaisuuksia kuten hinta, ohjausominaisuudet ja hyötysuhde, jotka vaikuttavat niiden valintaan. Seuraavassa käsitellään kunkin järjestelmän toimintaperiaatetta ja ominaisuuksia.

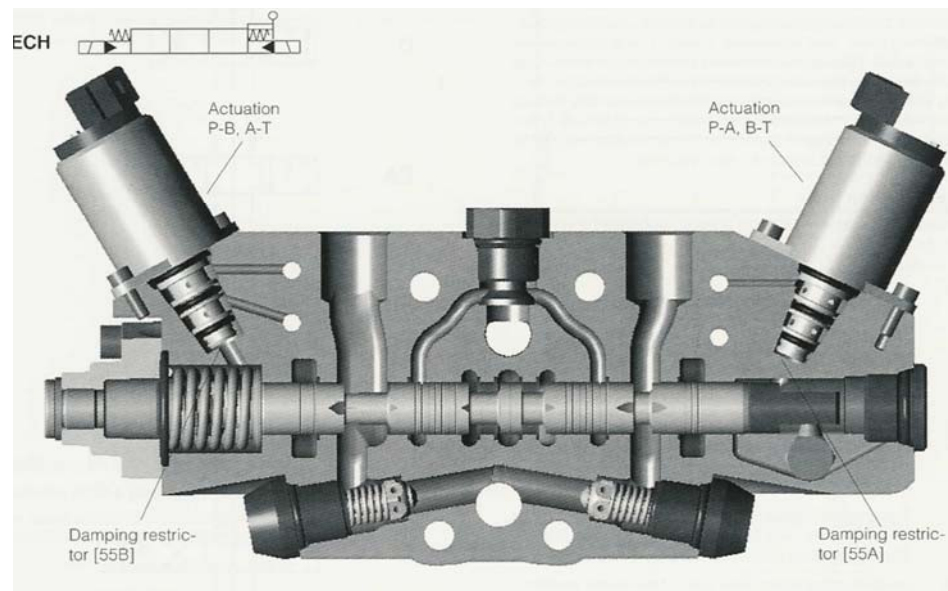
#### 3.1 Avoimen keskiasennon ympärpumppausjärjestelmä, CFO

Ympäripumppausjärjestelmissä käytetään tyypillisesti vakiokierrostitilavuuspumppuja. Eli pumppuja, joilla on kiinteä kierrostitilavuus ja jotka tuottavat pyöriessään vakionopeudella vakiotilavuusvirran:

$Q = n \cdot V_k \cdot \eta_v$ . Kuva 6 esittää CFO-järjestelmän hydraulista kytkentää.

- Neutraaliasennossa (karat keskellä, ei ohjausta) tilavuusvirta johdetaan vapaavirtauskanavan kautta tankkiin. Vapaavirtauskanava kulkee kaikkien karojen läpi. Halkileikkauskuvassa 4, vapaavirtauskanava näkyy keskellä karaa.
- Tilavuusvirta toimilaitteelle aikaansaadaan siirtämällä karaa keskiasennosta. Tällöin vapaavirtauskanava alkaa supistua ja samalla aukeaa painekammioista yhteys valittuun lähtöporttiin.
- Toisessa lähtöportissa aukeaa samaan aikaan yhteys tankkikanavaan. Toimilaitte lähtee liikkeelle, kun syöttöpaine ylittää toimilaitteella vallitsevan kuormanpaineen.
- Paineennousu syntyy vapaavirtauskanavan supistumisesta.
- Virtaus toimilaitteelta syöttökanavaan (kuormanpaine lähtöportissa syöttöpainetta suurempi) on estetty syöttövastaventtiilillä 3 (kuva 6).

- Kuormaa laskettaessa vapaavirtauskanava ei tavallisesti vaikuta laskutapahtumaan, vaan laskunopeus riippuu ainoastaan karan laskupuolelle aiheutetusta kuristuksesta.
- Toiminnallisesti venttiili voidaan kytkeä rinnan, sarjaan tai priorisoida tiettyjä toimintoja. Eniten käytetään rinnankytkentää.

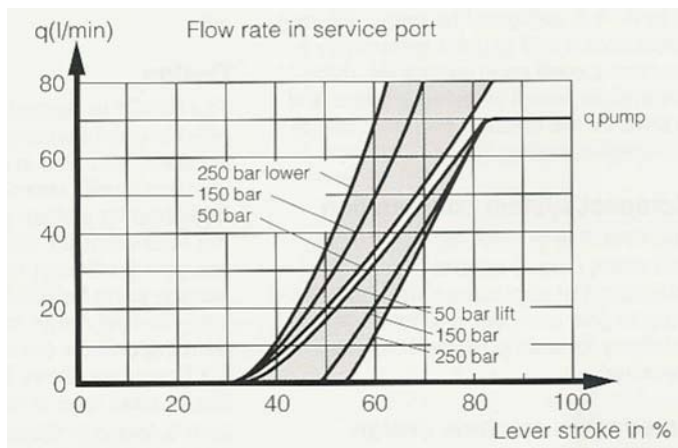


**Kuva 4. Ympäripumppausventtiilin karalohko**

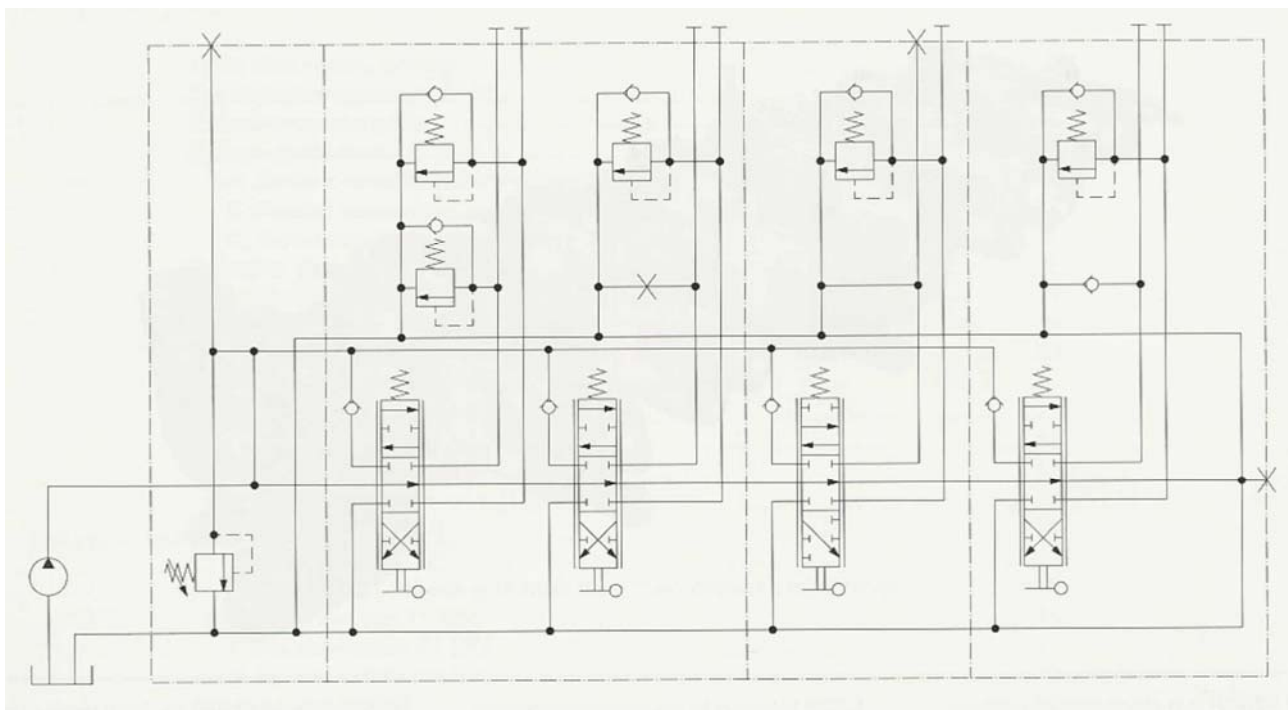
#### OMINAISUUKSIA:

- Hinnaltaan edullinen ratkaisu, koska käytetään yksinkertaista kiinteätuottoista pumpua.
- Ratkaisulla saavutetaan ns. voimantunto, koska paineen nousu keskikanavassa riippuu ohjauksen suuruudesta (=ohjausvivun kulmasta), kuva 5.
- Kuormanpaineen vaihtelu (vastustavan voiman muuttuminen) vaikuttaa tilavuusvirtaan, eli toimilaitteen nopeuteen, ellei koneen käyttäjä korjaa virhettä manuaalisesti.
- Myös yhtäaika tehtävät ohjaustoiminnot vaikuttavat toisiinsa, silloin paine määräytyy suurimman kuormanpaineen mukaan.
- Venttiilin ohjausominaisuudet eivät ole erityisen hyvät. Suurilla kuormilla säätövaraksi jää vain kapea ohjaussauvan liikealue lähellä maksimi-ohjausta. Säädettävyyttä voidaan tosin parantaa sovittamalla virtauspinta-alat sopiviksi muuttamalla vapaavirtauskanavan ja lähtöportin keskinäistä avautumishetkeä ja virtauspinta-alaa.
- Säätöominaisuudet näkyvät kuvassa 5.
- Tehohäviöt syntyvät pääasiassa vapaavirtauskanavan kautta tankkiin menevästä öljymäärästä. Vallitseva syöttöpaine riippuu kulloinkin vaikuttavasta suurimmasta kuormanpaineesta, kuva 8.
- Vapaakiertopaineesta syntyy myös häviöitä. Käsikäyttöisillä venttiileillä häviöpaine voi olla hyvin pieni, mutta hydraulisesti tai sähköhydraulisesti ohjatuissa venttiileissä tarvitaan riittävä alkupaine, jotta kara saadaan liikkeelle (ellei ole mahdollista käyttää erillistä esiohjauspumpua)



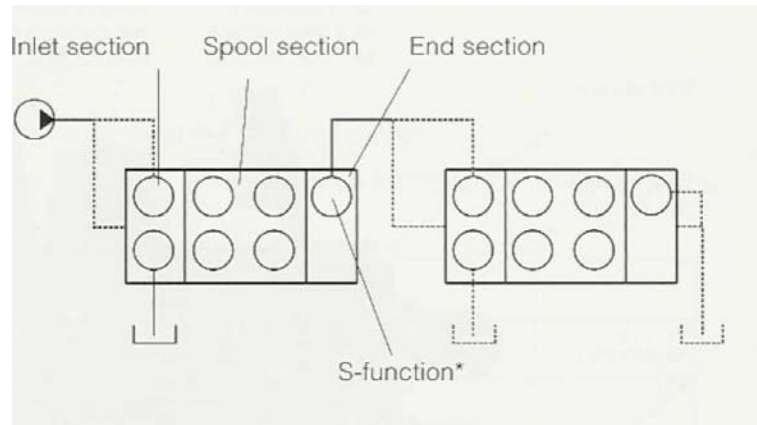


**Kuva 5. CFO-venttiilin virtauskuvaajat**

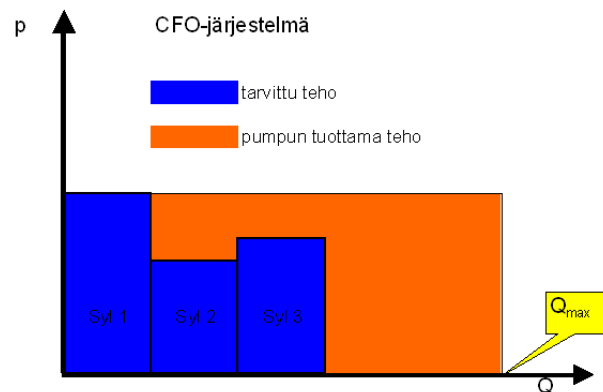


**Kuva 6. CFO-järjestelmä**

- Kaikki ympärpumppausjärjestelmään kuuluvat venttiilit kytketään sarjaan. Täysi virtaus kulkee kaikkien venttiilien läpi, joten venttiilien tulee olla tilavuusvirran läpäisyltään samaa kokoa.
- Venttiilien kytkennässä on huomioitava sarjaan kytkennän vaatima sarjaliitin, kuva 7.



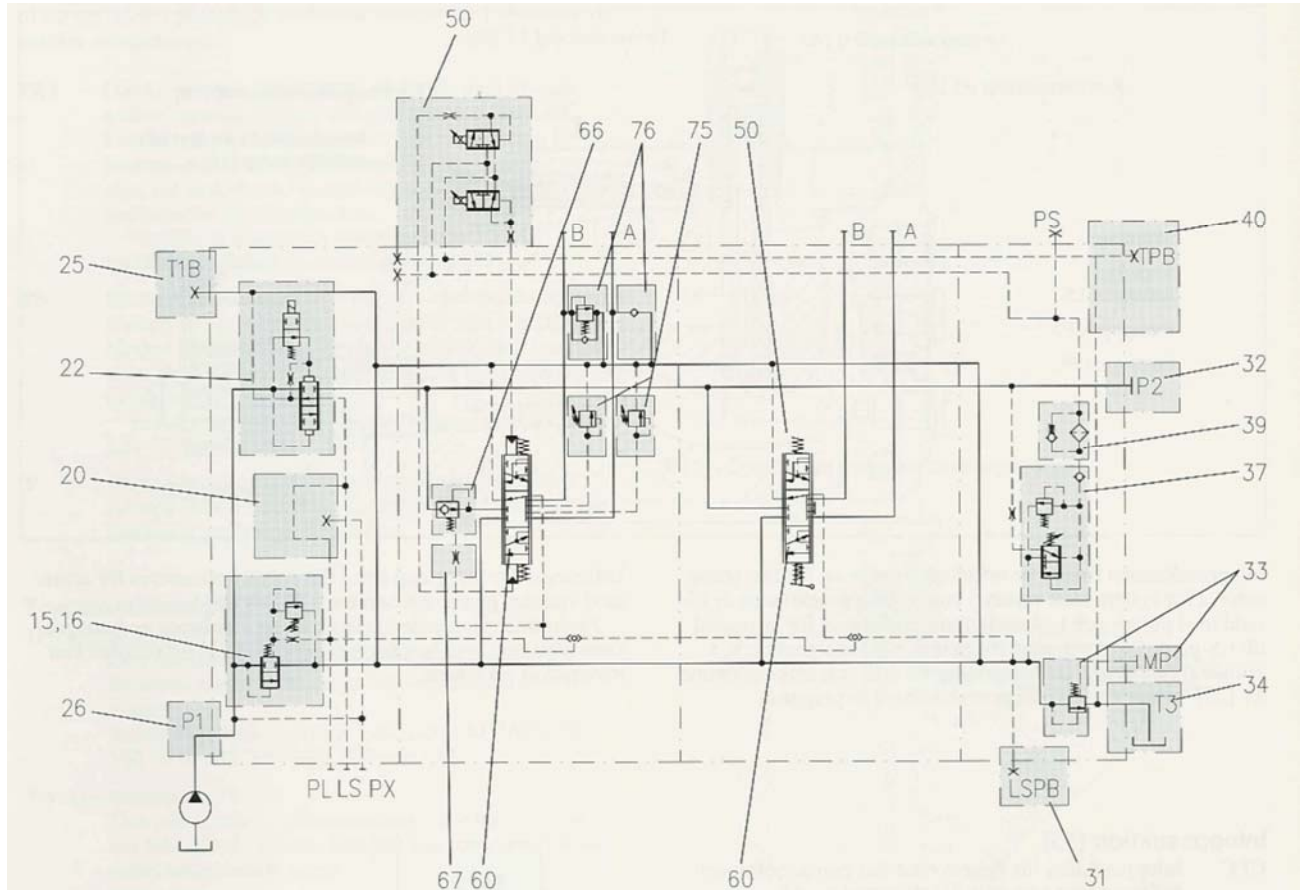
**Kuva 7. Sarjaliitanta**



**Kuva 8. Tuotettu teho CFO-järjestelmässä**

### 3.2 CFC-Järjestelmä

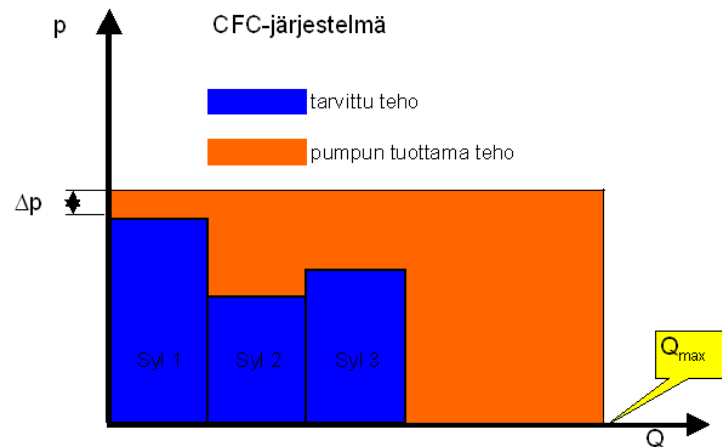
Tässä järjestelmätyypissä (kuva 9) käytetään myös vakioilavuuspumppua. Karan ollessa keskiasennossa pumpun tuotto ohjataan vapaakiertoventtiilin 15 kautta tankkiin. Tyhjäkäyntipaine määräytyy venttiilin 15 jousen mukaisesti (yleensä n. 10..25 bar). Jousitila on yhteydessä kuormapainekanavaan (LS-kanava). LS-kanavat ovat yhdistyneenä karojen 60 läpi tankkiin, mikäli karaa ei ohjata. Kun jotakin karaa poikkeutetaan keskiasennosta, kuormanpainekanava yhdistyy karan 60 läpi ko. toimilaitteen syöttökanavaan, jossa vallitsee kuormasta riippuva paine. Tämä paine pääsee nyt vahvistamaan josta. Syöttöpaine kasvaa jousivoiman verran kuormanpainetta suuremmaksi. Vapaakiertoventtiili 15 toimii yhdessä paineenrajoitusventtiilin 16 kanssa myös pääpaineenrajoitusventtiilinä. Venttiili 16 määrittää suurimman paineen.



**Kuva 9. CFC-venttiilin kytkentäkaavio**

**OMINAISUUDET:**

- Venttiili on hinnaltaan LS-venttiilin luokkaa, kiinteätuottoinen pumppu alentaa järjestelmän hintaa.
- Ohjausominaisuudet ovat paremmat kuin CFO- järjestelmässä, koska käyttäytyminen vastaa ohjattavuudeltaan myöhemmin esitettävää LS-järjestelmää.
- Kytkentämahdollisuudet vaihtelevat venttiileistä riippuen. Esim. kuvan 9 venttiilin rinnalle voidaan kytkeä muita venttiileitä (koosta riippumatta), mikäli nekin ovat LS-venttiileitä, joiden kuormanpaine voidaan kytkeä kuvan venttiilin LSP, LS tai PL-kanaviin.
- Pumpun tuottama paine asettuu vapaa-kiertoventtiilin 15 jousen määräämän paineeron verran yli suurimman kuorman paineen ja pumppu antaa vakio tilavuus-virran, kuva 10.



Kuva 10. Tuotettu teho CFC-järjestelmässä

### 3.3 Vakiopainejärjestelmä (CP)

Vakiopainejärjestelmät ovat yleisiä teollisuussovellutuksissa mutta harvinaisia työkoneissa. Vakiopainejärjestelmässä, kuten muissakaan säätötilavuuspumpun käyttävissä järjestelmissä, ei esiinny vapaavirtausta. Pumpun säädin yhdessä käytetyn venttiilin kanssa määrittää järjestelmätyypin.

#### TOIMINTA:

- Järjestelmässä on koko ajan pumpun säätimellä asetettu maksimipaine.
- Neutraaliasennossa venttiilit ovat suljettu ja pumppu on asettunut O-tuotolle.
- Pääpaineenrajoitusventtiilin avautumispaine on asetettava vähintään 10 bar korkeammalle kuin pumpun maksimipaineasetus.
- Karaa avattaessa pumppu pyrkii tuottamaan niin suuren tilavuusvirran kuin karan läpi menee.
- Paine pysyy pumpun säätimellä määritetyssä maksimiarvossa arvossa, ellei pumpun suurinta maksimituottoa ylitetä.

#### OMINAISUUDET:

- Kalliimpi kuin CFO-järjestelmä säätötilavuuspumpusta johtuen.
- Järjestelmään voidaan helposti lisätä erikokoisia komponentteja kytkemällä ne rinnan olemassa olevien kanssa.
- Ohjausominaisuudet ovat erinomaiset, koska paine pysyy vakiona.
- Ohjaussauvan liike vaikuttaa vain liikenoiteeseen, maksimivoima on aina käytössä, (ei voimantuntoa)
- Jatkuva korkea paine rasittaa pumppua ja tiivisteitä.

- Karavuodoista johtuen toimitaitteissa (erityisesti sylinterit) esiintyy ryömintää.
- Ohivirtauksia ei synny mutta häviöitä voi silti syntyä runsaasti etenkin, jos tarvittava kuormanpaine ohjatuilla liikkeillä on pieni.

#### KAYTTÖ:

- Jatkuvasta korkeasta paineesta ja sen aiheuttamasta ryöminnystä johtuen vakiopainejärjestelmää ei sellaisenaan juurikaan käytetä työkonoiden hydraulijärjestelminä. Sen sijaan sitä läheisesti muistuttavaa kevennettyä vakiopainejärjestelmää esiintyy hieman yleisemmin.

### 3.3 Kevennetty vakiopainejärjestelmä (CPU)

Myös kevennetyt vakiopainejärjestelmät ovat nykyisin harvinaisia työkonosovellutuksissa.

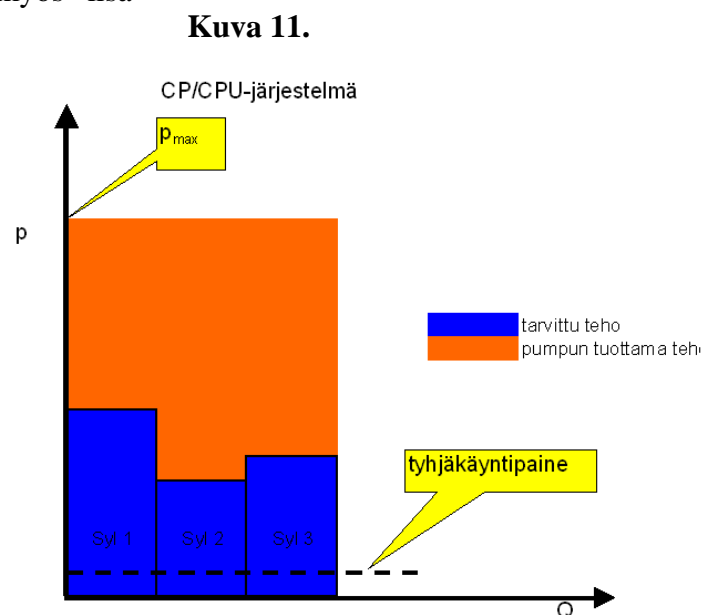
#### TOIMINTA

- Kevennetyssä vakiopainejärjestelmässä käytetään hyväksi venttiilin keskikanavaa, jolla toimintaa ohjataan.
- Keskikanava on näissä venttiileissä niin ahdas, että pienikin karan liike sulkee sen heti.
- Tällöin signaalikanavan yhteys tankkiin katkeaa ja kanavaan nousee täysi, pumpun säätimellä määrätty paine.
- Tyhjäkäyntipaine (stand-by paine) on tavallisesti 15..25 bar. Se on usein säädettävissä pumpun tyhjäkäyntiasetuksella.
- CPU-järjestelmissä signaalikanavan öljy syötetään pääventtiililtä tai pumpulta. Tämä on huomioitava pumppu-venttiiliyhdistelmää valittaessa.
- Pumpun ja venttiilin väliin tarvitaan ohjauslinja, joka ”herättää” pumpun.

#### OMINAISUUDET

- Kuten CP-järjestelmässä, mutta jatkuvan korkean paineen haitat on eliminoitu. Tyhjäkäyntipaine, 15...25 bar ei pysty aikaansaamaan ryömintää.
- Lisähydrauliikan asenta-minen helppoa (kuten CP-järjestelmässä), mutta pumpun herättäminen on huomioitava myös lisähydrauliikan osalta (muuten järjestelmän painetta ei saada nousemaan).
- Kuvan 11 mukaisesti tilavuusvirta säätyy sylinterien tarpeiden mukaan ja pumpun syöttöpaine asettuu maksimipaineelle, joka säädetään pumpun säätimestä.

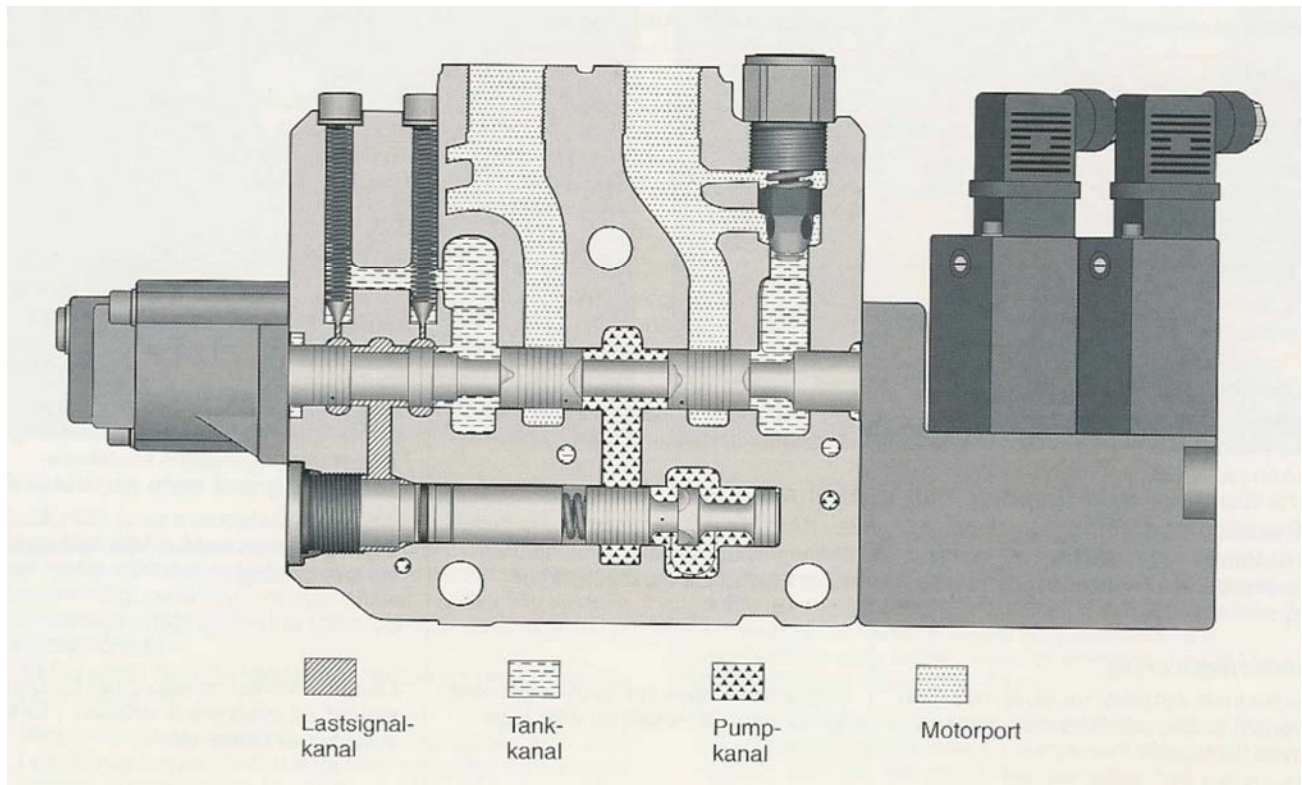
#### KÄYTTÖ



- On vielä 90-luvun alussa ollut yleinen useissa sovellutuksissa.

### 3.4 Kuormantunteva järjestelmä (LS)

Järjestelmässä käytetään yleensä säätötilavuuspumppua, jossa on LS- säädin. Eräissä venttiileissä on mahdollista käyttää myös kiinteätilavuuksista pumppua (Kts. CFC-järjestelmä). Erään LS-venttiilin halkileikattu kara-lohko näkyy kuvassa 12. Kuormantunnon vaatimat kanavat venttiilin rungossa ja karoissa tekevät näistä venttiileistä monimutkaisempia ja kalliimpia.



**Kuva 12. Halkileikattu LS-venttiilin karalohko**

#### TOIMINTA

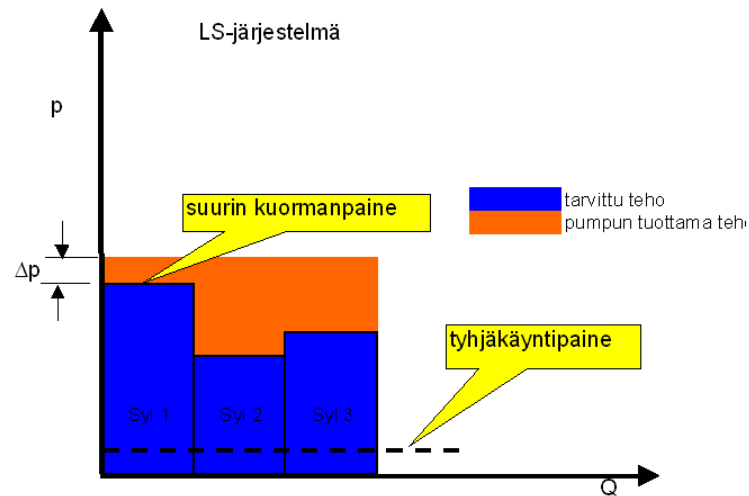
Seuraavassa LS-järjestelmän toimintaa on selvitetty kaaviota 13 käyttäen.

- Neutraaliasennossa (ei ohjausta) järjestelmässä vallitsee tyhjäkäyntipaine (stand-by paine), koska kuormanpainetta ei tule kopioventtiilille 2. LS-linjassa ei ole painetta ja pumpulle ei mene ohjausta.
- Suuntaventtiilin karaa 5 avattaessa, toimilaitteella vallitseva kuormanpaine pääsee venttiilin karan kautta ensin vaihtovastaventtiilille 3 ja edelleen kopioventtiilille 2 (suurin kuormanpaine).
- Venttiili 2 (harvoin käytetty) kopioi kuormanpaineen käyttäen painelinjaa apuna. Kopioventtiilin käyttö on harvinaista, sillä varmistetaan, että LS-linjassa tilavuusvirta riittää, vaikka esimerkiksi pumpun säätimessä olisi vuotoa. Kopioventtiili estää öljynkulutuksen venttiilin LS-linjoissa ja sitä kautta toimilaitteiden pienen liikkeen (LS-linjan ollessa jo auki mutta lähtöportti vielä kiinni). Kuormanpaine-kanavat on ajoitettu avautumaan ennen lähtöportin avautumista.



## OMINAISUUKSIA

- Edellisiä kalliimpi järjestelmä.
- Hyvä hyötysuhde, painetta kehitetään vain stand-by paineen verran yli tarpeen.
- Lisähydrauliikkaa kytkettäessä on huomioitava pumpun herättäminen ja yleensä venttiilien sopivuus järjestelmään.



**Kuva 14. Tuotettu teho LS-järjestelmässä**

- Yhtä karaa käytettäessä (myös suurinta painetta tarvitsevilla karalla) ohjausominaisuudet ovat hyvät, koska paine-ero karan yli pysyy vakiona kuormanmuutoksista huolimatta. Liikenopeus pysyy siis vakiona ilman korjaavia toimenpiteitä.
- Useamman karan yhteiskäytössä käytetään usein painekompensaattoria, osa 6 kuvas-  
sa 13, parantamaan ohjausominaisuuksia. Painekompensaattori pitää karan yli vallit-  
sevan paine-eron vakiona ja estää syöttö- ja kuormanpaineen muutosten vaikutuksen  
tilavuusvirtaan.
- LS-järjestelmät ovat muita alttiimpia värähtelemään. Puomien jousto ja siitä johtuvat  
paineenvaihtelut välittyvät kuormantunnon kautta pumpulle, joka pyrkii kompensoi-  
maan ne. Tällöin pumppu helposti pahentaa värähtelyjä. Säättöviiveistä aiheutuva  
vaihesiirto voi todellisuudessa vahvistaa paineen vaihteluja.

## KÄYTTÖ

- LS-järjestelmä on yleisin järjestelmätyyppi, kun koneen hydrauliikkaa käytetään jat-  
kuvasti. Se tuottaa vähiten hukatehoa ja -lämpöä järjestelmään.

## MUITA HUOMIOITA

LS-järjestelmä ei toimi tilanteissa, joissa tullaan pumpun maksimituotolle asti (pumppu saturoi). Esimerkkinä kaksi toimilaitetta, joiden tuottovaatimukset ovat 80 l/min ja 50 l/min. Jälkimmäinen vaatii korkeamman paineen. Jos pumpun tuotto on vain 100 l/min, tilavuusvirta jää 30 l/min liian pieneksi. Seurauksena suurimman paineen vaativa liike hidastuu. Kevyemmin kuormitettu toimilaite liikkuu edelleen säädetyllä nopeudella. Koska liikenopeudet säädetään monissa tapauksissa toisiinsa



suhteelliseksi, joutuu koneen käyttäjä nyt korjaamaan virheen. Jotta tällaista tilannetta ei syntyisi, pumppua ei saa päästää saturoitumaan tai kaikkia liikkeitä on hidastettava samassa suhteessa. Eräs ratkaisu tähän on LUDV-venttiili (Bosch Rexroth) Suurimpana erona normaaliin LS-venttiiliin on, että karan jälkeen on painekompensaattori, joka pitää paine-eron karan yli vakiona ja "ylikuormitus" tilanteissa estää liikenopeuksien suhteen muuttumisen.

Pumpun saturaatio voi syntyä myös tehonrajoituksen johdosta. Varsinkin raskaissa kaivukoneissa hydraulikan ottama teho voi kasvaa erittäin suureksi, jollaista mikään järkevän kokoinen käyttömoottori ei pysty antamaan. Tehon ottoa rajoitetaan useimmiten pumpun kierrostilavuutta pienentämällä, joko pumpun oman säätimen avulla tai sähköisesti tarkkailemalla käyttömoottorin pyörimisnopeuden laskemista (pyörimisnopeuden lasku merkitsee moottorin ylikuormittumista).

## 4. VENTTIILIEN OHJAUS

### 4.1 Yleistä

Venttiilien ohjaus tapahtuu useimmiten kauko-ohjauksena mutta myös suoraa käsivipuhjaustakin esiintyy. Käsivipuja voi esiintyä myös sähköohjauksen yhteydessä, jolloin ne toimivat esimerkiksi hätäohjauksena sähköjen katketessa. Kauko-ohjauksen etuna on venttiilien vapaa sijoittelu.

Ohjaustapoja on useita, seuraavassa niiden alustava listaaminen:

- mekaaninen ohjaus suoraan vivulla tai polkimella
- mekaaninen kauko-ohjaus vivuilla tai vaijereilla
- hydraulinen ohjaus
- pneumaattinen ohjaus
- sähköpneumaattinen ohjaus (on/off tai proportionaalinen)
- sähköhydraulinen ohjaus (on/off tai proportionaalinen)
- sähkömekaaninen ohjaus (askelmoottori tms)

On/off ohjauksen käyttö on harvinaisempaa. Sitä käytetään, jos liikenopeutta ei tarvitse säätää (yksi liikenopeus riittävä). Jatkossa tarkastellaan hieman tarkemmin erilaisia ohjaustapoja.

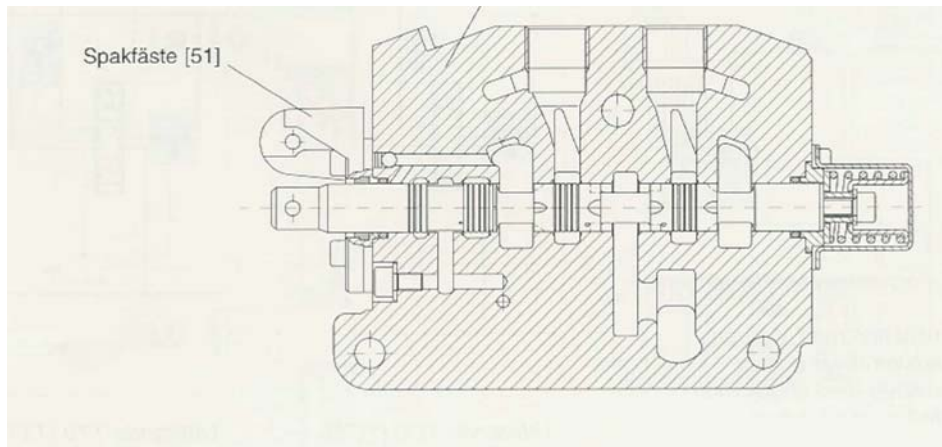
### 4.2 Mekaaninen ohjaus

Mekaaninen ohjaus, kuva 15, toteutetaan joko suoraan karoihin kiinnitetyillä vivuilla tai kauko-ohjauksena vipujen tai vaijereiden välityksellä.

Mekaanisen ohjauksen etuna on yksinkertaisuus toimintavarmuus ja halpa hinta. Käyttövoimaksi riittää lihasvoima.

Haittoja ovat raskas käytettävyys, eri toimintojen hankala yhdisteltävyys ja kulumisen aiheuttamat vällykset. Lisäksi ns. karakompensointi ei toimi, koska karaa pidetään mekaanisesti paikallaan.

Kuormitusmuutosten aiheuttamat paine-erot saavat aikaan muutoksia virtauksessa (toimilaitteiden nopeudet muuttuvat). Hyvälaatuisten suuntaventtiilien karat ovat suunniteltu niin, että syntyvät virtausmuutokset aiheuttavat karaan muutosta kompensoivan voiman, joka pienentää virtausmuutosta. Mekaanisessa ohjauksessa kompensoiva voima ei korjaa virhettä.



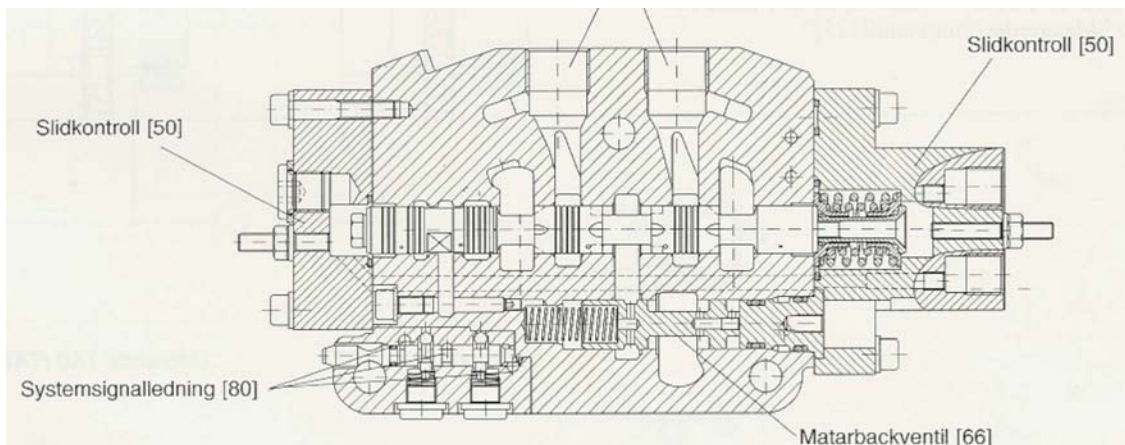
**Kuva 15. Mekaanisesti ohjattu venttiili**

Mekaanista ohjausta käytetään laitteissa, joita ei tarvitse jatkuvasti käyttää ja joilta edellytetään halpaa hintaa. Useimmiten mekaanista ohjausta käytettäessä myös venttiilin karalohkot ovat tavallista yksinkertaisemmin varusteltuja.

Lisäksi mekaanista suoraa käsivipuohjausta voidaan käyttää varaohjauksena sähköhydraulisten ja –pneumaattisten ohjaustapojen rinnalla.

### 4.3 Hydraulinen ohjaus

Hydraulisessa ohjauksessa karan päissä ovat umpinaiset ”kupit”, joissa ainakin toiseen sisältyy jousi. Tuomalla halutun suuruinen hydraulinen paine jousikoteloon, saadaan kara liikkumaan tietyn matkan vastajousta vasten.

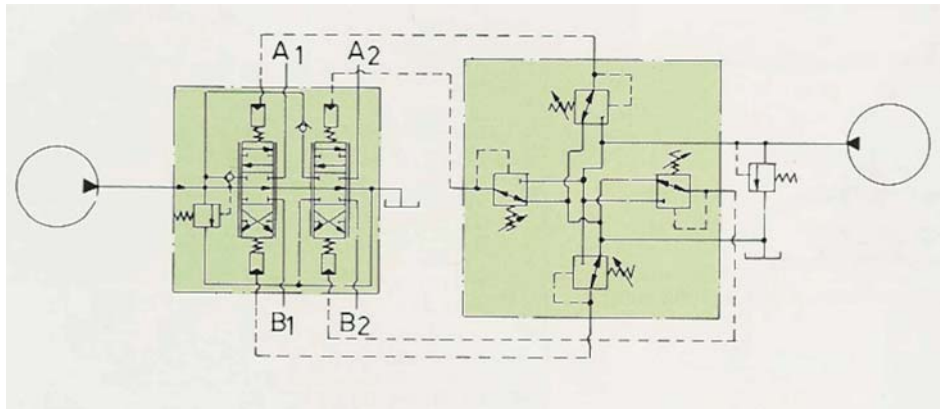


**Kuva 16. Hydraulisesti ohjattu karalohko**

Joissakin venttiileissä saattaa olla erikseen keskitysjouset ja säätäjouset. Keskitysjouset keskittää karan. Karan ollessa keskellä säätäjousissa on pieni välys. Kun karaa aletaan ohjata, se liikkuu ensin kevyesti välyksen suuruisen matkan ( $\approx$ kuollut alue), jonka jälkeen vastustavaksi voimaksi tulee keskitysjouset lisäksi myös säätäjouset aiheuttama voima. Tällä toimenpiteellä saadaan ns. kuolleen alueen vaatima turha ohjausliike minimoitua ja lisättyä säätöliikealuetta.

Ohjauspainetta säädetään käsivivulla ohjatulla venttiilillä. Kun vipu on keskellä, karan jousikotelo on yhdistettynä ohjausventtiilin läpi tankkiin. Vipua kääntämällä puristetaan venttiilin jouta, jolloin karan jousikoteloon tulee säätövivun kääntökulmaa vastaava paine. Kuva 17 esittää hydraulisen ohjauksen kytkentäkaaviota. Oikean puoleinen laatikko kuvaa hydraulista ohjaussauvaa.

Hydraulisessa ohjauksessa on huomioitava, että vipujen syöttöpaine (esiohjauspaine) saa tavallisesti olla maksimissaan 50...60 bar, joten otettaessa syöttöpaine varsinaisesta järjestelmästä, tarvitaan väliin paineenalennusventtiili.



**Kuva 17. Hydraulinen ohjaus**

Ympäripumppausjärjestelmissä vapaakiertopaine saattaa olla hyvin alhainen (2...4 bar). Karan liikkeelle saamiseen tarvitaan venttiilistä riippuen muutaman baarin (5...7 bar) paine. Ympäripumppausjärjestelmissä tarvitaan toisinaan vastapaineventtiili paluulinjaan nostamaan vapaakiertopaine riittäväksi. Joskus käytetään erillistä esiohjaus pumppiiriä ohjausvipujen syöttöpaineen aikaansaamiseksi.

Hydraulisen ohjauksen etuna on pienempi ohjausvoiman tarve ja erilaisten ohjausominaisuuksien aikaansaaminen verrattuna mekaaniseen ohjaukseen. Toimintojen yhdistely on helppoa, yhdellä ohjausvivulla voidaan ohjata kahta karaa. Haittoja ovat ohjausvipujen ja venttiilin väliset putkitukset ja mahdollisesti tarvittavat ylimääräiset järjestelyt riittävän lähtöpaineen aikaansaamiseksi. Ohjausominaisuuksien säätäminen ja muuttaminen vaatii asiantuntemusta ja on hankala tehdä.

Hydraulista ohjausta on käytetty aikaisemmin paljon jatkuvassa käytössä olevissa koneissa (kaivurit, metsäkoneet). Sähköhydrauliset järjestelmät ovat nykyisin monissa tapauksissa syrjäyttäneet hydraulisen ohjauksen.

### **4.3 Pneumaattinen ohjaus**

Pneumaattisella ohjauksella on sama toimintaperiaate kuin hydraulisella ohjauksella. Tarvittavat ohjauspinta-alat ovat hieman suuremmat, koska pneumaattiset paineet ovat pienemmät. Tästä johtuen ”kupit” karojen päissä ovat pneumaattisissa käytettäessä erilaiset.

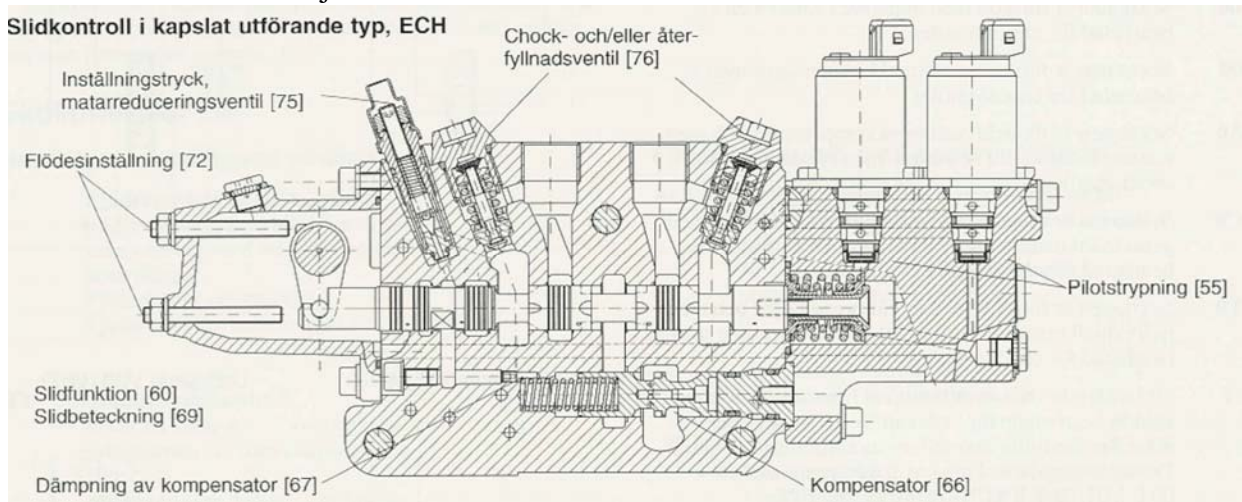
Pneumaattista ohjausta käytetään mm. kuorma-autojen hydraulikkaventtiileitä ohjattaessa, koska paineilmaa on saatavilla ja sitä tarvitaan myös jarrujärjestelmässä.

## 4.4 Sähköhydraulinen ohjaus

Kuvassa 18 on sähköhydraulisesti ohjatun karalohkon halkileikkaus. Karaa ohjataan nytkin viimekädessä hydraulisesti, mutta ohjauspaine aikaansaadaan sähköohjatulla proportionaaliventtiilillä. Tällöin ohjausvipu on sähköinen ja putkitusta ohjausvivun ja venttiilin välillä ei tarvita. Sähköhydraulisen ohjauksen sähköinen osa voidaan toteuttaa monella tavalla:

- analogiatekniikalla
- digitaalitekniikalla
- radio-ohjauksella

Analogiatekniikalla toteutetut järjestelmät ovat poistumassa. Ne korvataan digitaali- ja tietotekniikkaa soveltavilla järjestelmillä. Kenttäväylien osuus tiedonsiirrossa on myös voimakkaasti kasvussa, koska sen avulla voidaan johdotustarvetta selvästi vähentää.



**Kuva 18. Sähköhydraulisesti ohjattu karalohko**

Radio-ohjausta käytetään, kun välimatka käyttäjältä venttiilille on pitkä ja jos käyttäjän on voitava liikkua vapaasti. Radio-ohjauksessa välitetään vain ohjauskäsky ohjaajalta venttiilille/ohjauskeskukselle radioteitse, itse ohjaustekniikka voi olla toteutettuna analogisesti tai digitaalisesti.

Tyypillisessä analogisessa ohjauksessa ohjausvivulla aikaansaadaan säätövastuksen avulla ohjausjännite, joka viedään vahvistin/säätöyksikölle. Siellä ohjausjännite vahvistetaan jännitteen suuruudesta riippuvaksi ohjausvirraksi, joka viedään esiohjausventtiilin kelalle. Venttiili saa aikaan ohjausvirtaan verrannollisen ohjauspaineen.

Vahvistimella on tyypillisesti mahdollista säätää:

- minimi ohjausvirta (minimi liikenopeus, millä ohjaussauvan kulmalla liike alkaa )
- maksimiohjausvirta ( suurin liikenopeus täydellä ohjauksella)
- kiihdytys ja hidastusrampit (pehmentävät toimilaitteen liikkeitä, työkonneissa ei yleensä ole hidastusramppeja)

Säädöt voidaan jokaiselle liikesuunnalle erikseen.

Täysin digitaalisissa ohjauksissa tiedonsiirto tapahtuu kenttäväylän välityksellä ja kaikki komponentit anturit mukaan lukien voidaan kytkeä väylään. Käytännössä esiintyy kuitenkin runsaasti osittain

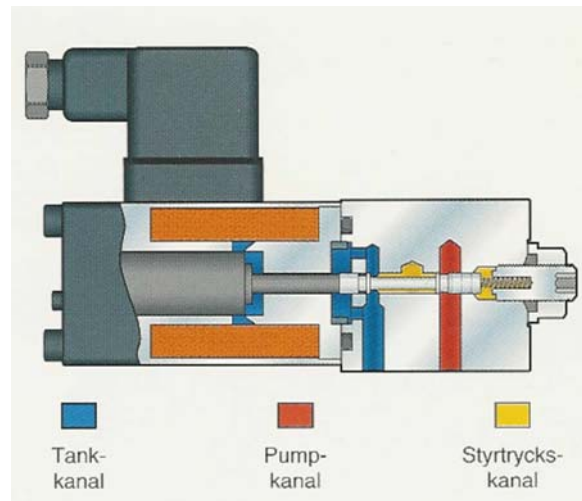
kenttäväylää käyttäviä järjestelmiä. Niiden yhteydessä käytetään lisämoduuleja, jotka muuttavat analogisen viestin digitaaliseksi. Usein ainakin erilaiset anturit (analogiset) liitetään järjestelmään tällaisten muuntimien välityksellä. Myös suuntaventtiili voi olla perinteistä tekniikkaa ja liitetään analogisesti vahvistimeen.

Digitaalitekniikka mahdollistaa monenlaisten uusien sovellutusten hyödyntämisen. Käyttöönnotossa ja säädössä tarvitaan ohjelmointilaitetta tai PC:tä. Järjestelmän käyttöönotto on enemmän asiantuntemusta vaativaa sillä toimintaan ja konfigurointiin voidaan vaikuttaa selvästi perinteistä johdotusta monipuolisemmin.

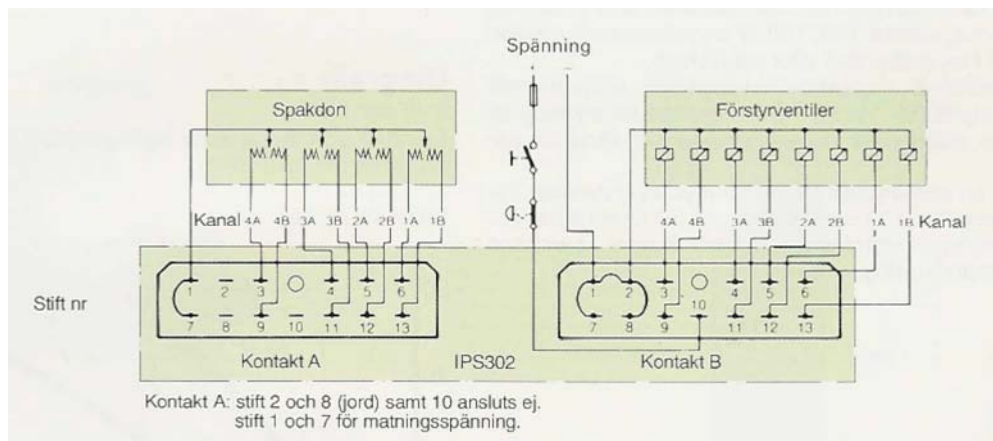
Sähköhydraulisten ohjausten etuina ovat kevyt ohjattavuus, venttiilin helppo sijoittaminen ja pienempi putkitustarve. Venttiilin ohjausominaisuudet voidaan myös parhaiten muokata sopiviksi. Yhteen ohjausvipuun sijoitetaan usein kolmen karan portaaton ohjaus. Tietotekniikan ansiosta ohjaajan omat asetukset voidaan määrittää kaikille käyttäjille erikseen. Joissakin tapauksissa koneelle ”kirjautetaan” USP-muistitikon avulla, joka sisältää kirjautujan henkilökohtaiset asetukset.

Sähköistä ohjausta käytettäessä varsinaista suuntaventtiiliä ohjataan useimmiten kuvan 19 tapaisella paineenalennusproportionaaliventtiilillä. Erään valmistajan ohjausjärjestelmän kytkentäkaavio on kuvassa 20.

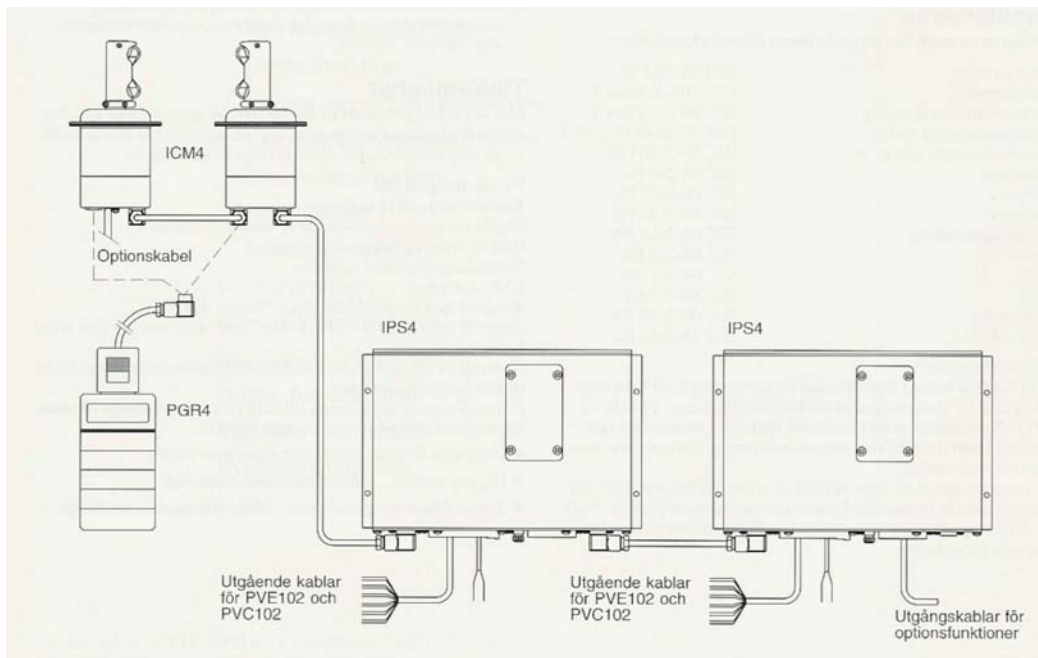
Mikroprosessorien käyttöön perustuvat digitaaliset ohjausjärjestelmät sekä kenttäväylät (CAN-väylä) ovat vähitellen syrjäyttämässä analogiatekniikkaan pohjautuvia ohjausjärjestelmiä. Kuvassa 21 on periaatekuva eräästä digitaalisesta ohjausjärjestelmästä. Digitaalisista järjestelmistä löytyvät samat säätökohteet kuin analogisista järjestelmistä. Niiden säätäminen tapahtuu PC:llä tai valmistajan ohjelmointilaitteella.



**Kuva 19. Esiohjausventtiili**



Kuva 20. Ohjauksen kytkentäperiaate



Kuva 21. Digitaalinen ohjausjärjestelmä

## 5. Ohjausjärjestelmän käyttöönotossa tehtävät yleisimmät säädöt

Tavallisesti tehtäviä säätöjä kullekin liikkeelle ja liikesuunnalle ovat:

- minimi tilavuusvirran säätö
- maksimi tilavuusvirran säätö
- ramppien säätö (tätä ei ole aina mahdollista säätää).

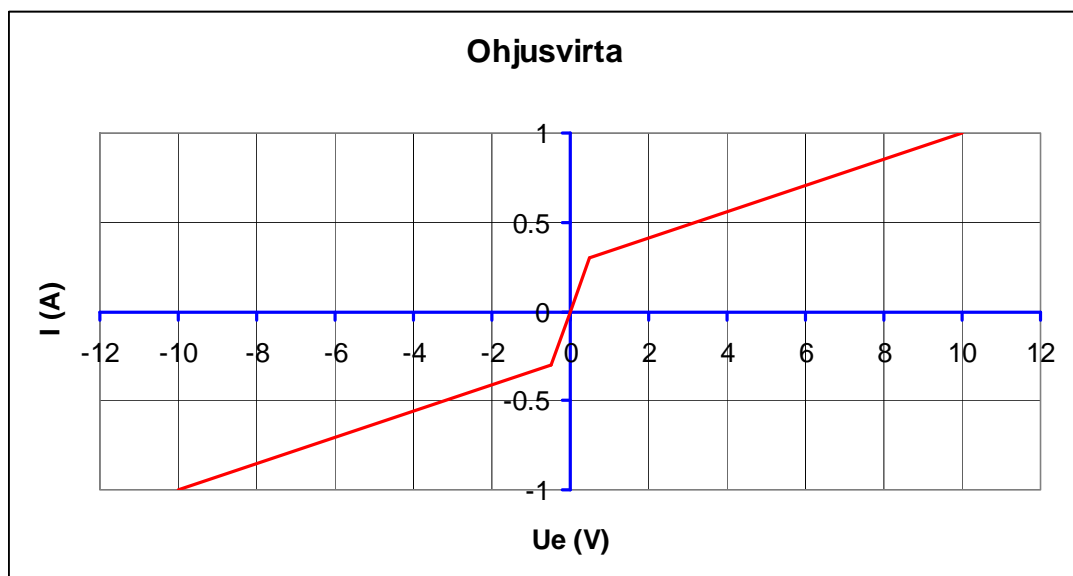
Tietotekniikan lisääntymisen johdosta järjestelmissä saattaa olla runsaasti erilaisia uusia säätökohteita. Tässä yhteydessä käsitellään kuitenkin tarkemmin vain edellä mainittuja kolmas kohdetta.

### 5.1 Minimitilavuusvirran säätö

Lähes kaikissa proportionaalivahvistimissa on ns. kuolleenalueen kompensointi. Sen johdosta venttiilille menevä ohjausvirta kasvaa alussa pienillä ohjausjännitteillä voimakkaasti, jotta kara siirtyisi nopeasti yli peittoalueen. Tämän ti siihen läheisesti liittyvän toiminnan avulla määritetään millä ohjausjännitteellä tai ohjauksauvan kulmalla toimilaitte lähtee liikkeelle.

Näin pienellä vivun liikkeellä päästään ohittamaan karan liikematkassa jopa 20...30 % suuruinen peittoalue.

Kuva 22 esittää suuntaventtiilin tyypillistä tilavuusvirran käytöstä ohjausjännitteen funktiona (negatiivisella jännitteellä virtaus siirtyy eri lähtöön). Laakea alue 0-pisteen ympärillä merkitsee venttiilin peittoaluetta (kuollut alue). Teollisuusventtiileissä 0-pisteen säätö (1) voi siirtää koko virtauskäyrää vaakatasossa. Mobileventtiilien vahvistimissa molemmat puoliskot liikkuvat erikseen. Minimivirtauksen säädöllä määritetään miten virtaus alkaa. Alkamiskohdan jännite on tyypillisesti 0,5...1 V. Sitä ennen tilavuusvirta ei voi alkaa. myöhäisemmäksi sitä voi säätää mutta ohjausvipua joutuu tällöin kääntämään enemmän. Minimivirtauksen säätö on tehtävä ensiksi, koska se vaikuttaa myös maksimivirtauksen arvoon.



Kuva 22. Ohjusvirta

## 5.2 Maksimitilavuusvirran säätö

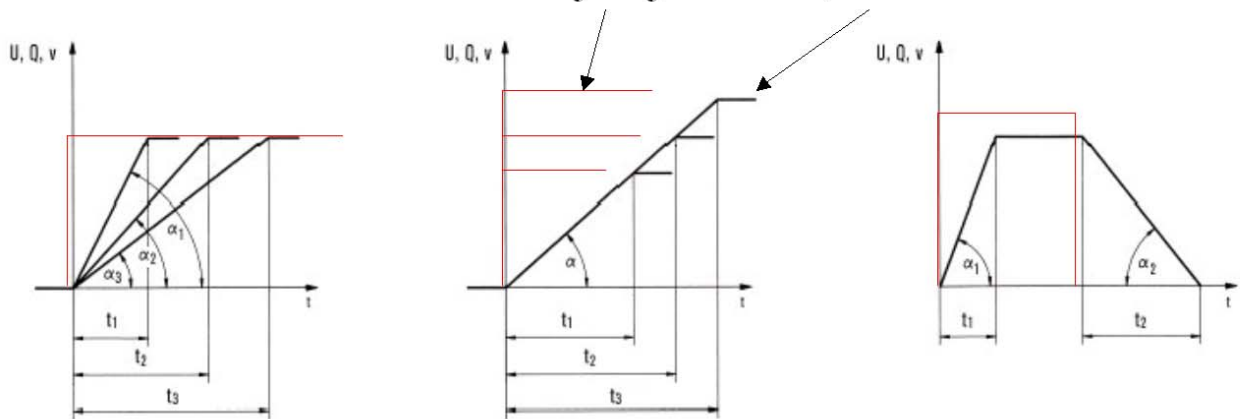
Maksimivirtauksen asetuksella säädetään karan suurin avautuma täydellä ohjausjännitteellä. Käytännön säätö tehdään ohjaamalla vipu maksimikulmaan ja määrittämällä mikä on suurin sallittu liikenoisuus l. tilavuusvirta. Säätö vaikuttaa virtakuvaajan kulmakertoimeen. Kummatkin liikesuunnat voidaan säätää erikseen. Minimi- ja maksimivirtauksen säädöillä pyritään saamaan ohjausalue mahdollisimman laajaksi huomioiden koneen käyttäjän vaatimukset.

## 5.3 Ramppien säätö

Rampeilla aikaansaadaan tietyllä kulmakertoimella askelmaista ohjausjännitteen muutosta seuraava ohjusvirta. Ramppien avulla suuntaventtiilin karan liikkeitä voidaan siis hidastaa ja saada toimilaitteen liikkeellelähtö ja pysähtyminen hallituiksi. Kuva 23 selventää ramppien merkitystä. Punaisella viivalla kuvataan ohjausjännitettä ja musta viiva kuvaa vahvistimelta venttiilille lähtevää ohjausvirtaa. Mobilesovellutusten ramppiajat ovat hyvin pieniä, jotta reaktioaika ei kasvaisi. Pysäytysramppia

ei yleensä ole lainkaan. Vivun kääntäminen on sinänsä eräänlainen ramppi. Kaikissa vahvistimissa ei ole rampeja lainkaan.

Punainen viiva kuvaa ohjausjännitettä, musta -virtaa



”Ramppiajan” säädöllä vaikutetaan venttiilin avautumisaikaan (kulmakertoimeen)

Ramppiaika muuttuu ohjausjännitteen muuttuessa, vaikka säätöarvoa ei muutettaisi

Kiihdytys- ja hidastusaika voidaan säätää erikseen (0-5 s). Vahvistinkorteissa erilaisia vaihtoehtoja

Kuva 23. Rampit

## 6. MOBILEVENTTIILIEN VALINTAAN LIITTYVIÄ PIIRTEITÄ

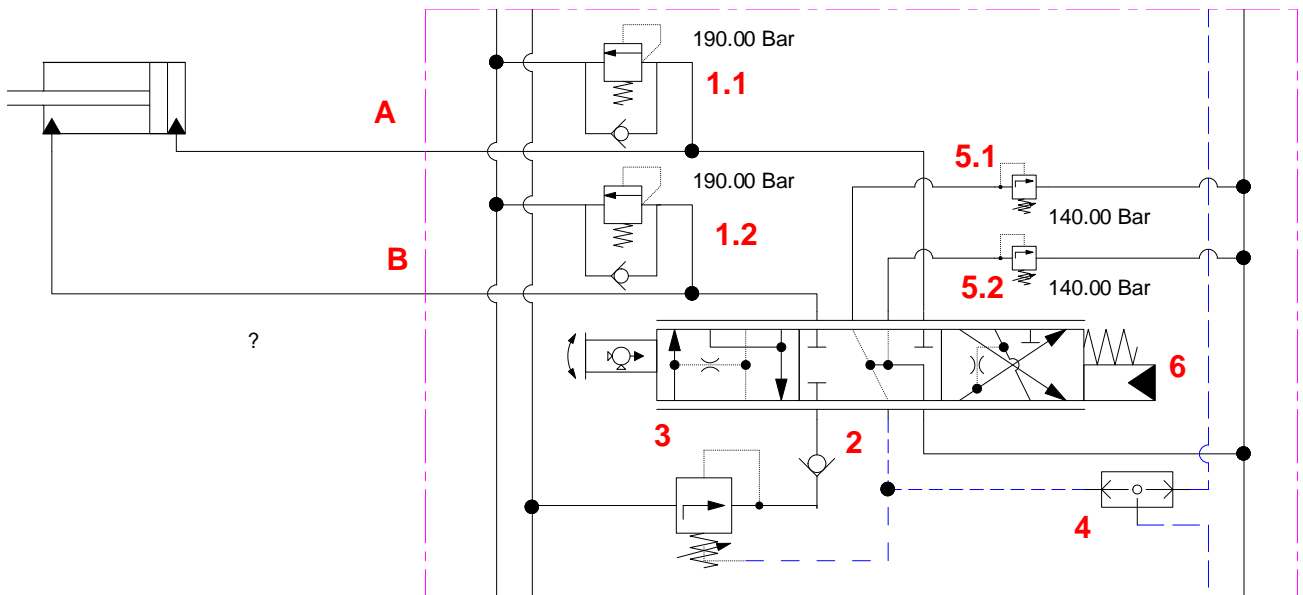
Työkoneiden venttiilit on mahdollista määritellä tarkasti sovellutuksen mukaan. Näin on mahdollista saavuttaa mm. hyvä ohjattavuus. Seuraavassa tarkastellaan määriteltäviä ominaisuuksia lähemmin. Mainittakoon, että venttiilin ”spesifiointi” näin laajasti ei ole aina mahdollista.

### 6.1 Lähtöporttien paineenrajoitus

Venttiilin lähtöportit (A ja B) voidaan varustella seuraavasti (kuva 24, osat 1.1 ja 1.2):

- paineenrajoitus-imuventtiilit (yleensä määritetään kiinteä avautumisarvo, jotta koneenkäyttäjä ei voisi tehdä omia ”jälkisäätöjä”)
- pelkät imuventtiilit (vastaventtiilit)
- umpinainen tulppa
- portti auki tankkiin (avoin tulppa)
- ei koneistusta varustelulle (halpa hinta).





Kuva 24. Karalohko ja sen varustelu

## 6.2 Painekompensaattori

Kunkin suuntaventtiilin syöttökanavassa on normaalisti syöttövastaventtiili (2). Syöttökanavaan voidaan sijoittaa haluttaessa myös painekompensaattori (3). Painekompensaattorin avulla saadaan paine-ero karan yli pysymään vakiona. Tällöin tilavuusvirta ei muutu vaikka syöttöpaineessa tai kuormanpaineessa tapahtuisi muutoksia. Venttiilin ohjattavuus paranee, kun tiettyä avautumaa vastaa tietty tilavuusvirta. Kompensaattorin määrittämä paine-ero riippuu jousen esikiristyksestä, joka aikaansaa tavallisesti 5...10 bar paine-eron. Paine-eroa voidaan säätää mm. muuttamalla kompensaattorin jousen alla olevien prikkujen määrää.

Kompensaattori pienentää karan maksimitilavuusvirtaa ja vaikuttaa haitallisesti myös kuormanlaskuun, jota selvitetään myöhemmin.

Eräissä venttiileissä (usein LS-venttiileitä) voidaan käyttää myös paineenalennustoimintaa (osat 5.1 ja 5.2). Suurinta kuormanpainetta rajoittamalla voidaan estää paineen nousu niin ylös, että venttiilit 1.1 tai 1.2 avautuisivat. Paineenalennusarvon on oltava pienempi (ainakin 10 bar) kuin paineenrajoituksen avautuminen. Paineenrajoitusventtiileitä (1.1 ja 1.2) ei silti voi kokonaan jättää pois. Niitä tarvitaan mm ulkoista ylikuormitusta varten. Paineenalennus toiminta hoituu pienen säädettävän paineenrajoitusventtiilin avulla, joka määrittää painekompensaattorille sallitun suurimman vahvistuspaineen. Paineenalennusvarustelu voi olla:

- molemmissa porteissa erikseen säädettävät paineenalennukset (kaksi lisäksi)
- yksi yhteinen paineenalennus molemmille lähtöporteille (yksi lisäksi)

Ei paineenalennusta (ei lisäksi)

## 6.3 Karojen valinta

Karan (6) valinta on tehtävä huolella, sillä se vaikuttaa merkittävästi ohjattavuuteen. Sovellus määrittää karan valinnan, huomioitavia asioita ovat:

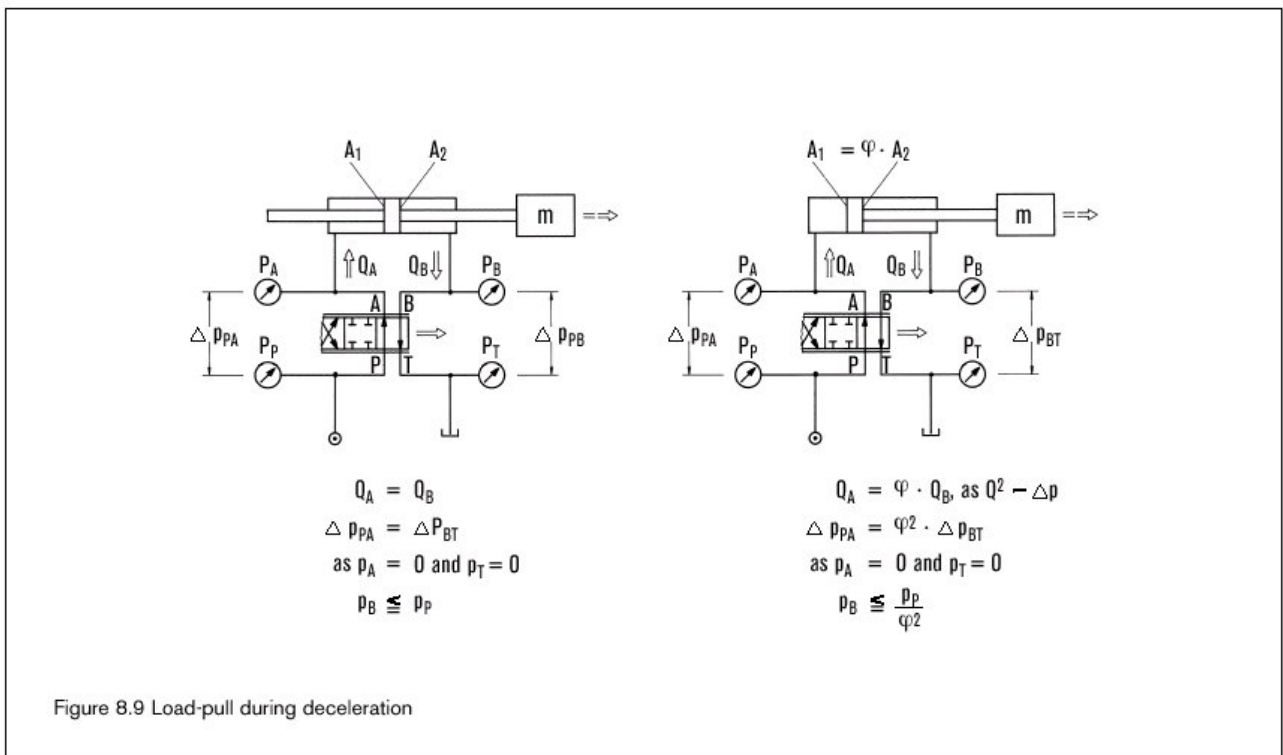
- karan hydraulinen toiminta (yksi/kaksitoiminen toimilaite, millainen keskiasento, sylinteri- vai moottorikäyttöön, regenatiivisuus, tarvitaanko ns. kelluvaa asentoa, millainen ohjaustapa)
- nimellisvirtaus (karan nimellisvirtaus valitaan käyttökohteeseen sopivaksi)

- epäsymmetrisyys (virtauspinta-alat sovitetaan sylinterin virtauspinta-alojen mukaan, tällöin huomioitava oikea kytkentä sylinteriin)
- painekompensaattorin käyttö alentaa maksimitilavuusvirtaa
- kuormanlaskun huomiointi (tästä enemmän luvussa 6.3.1)

### 6.3.1 Kuormanlasku

Lähes kaikissa nosturisovellutuksissa esiintyy tilanteita, joissa lasketaan taakkaa. Tällöin liikesuunta ja kuorman vaikutussuunta ovat samat. Ongelmalliseksi tilanteen tekee se, että sama kara säätää toimilaitteelle tulevaa ja sieltä poistuvaa virtausta. Kuormaa laskettaessa käy usein niin, että poistopuoli määrittää liikenoisuuden. Samalla on vaarana, että paluupuolelta poistuu enemmän öljyä, kun tulopuolelle pääsee karan yli tulemaan (seurauksena kavitaatio). Tässä tilanteessa painekompensaattori on haitallinen, sillä se rajaa tulopuolen paine-eron alhaiseksi ja rajoittaa samalla tilavuusvirtaa. Oletetaan venttiilin virtauspinta-alat sovitetuiksi vastaamaan sylinterin pinta-ajoja ja oletetaan painekompensaattorin paine-eroksi 10 bar. Edelleen oletetaan paluukanavan paine venttiilin jälkeen nolaksi. Tällöin tulo ja paluuvirtaus ovat tasapainossa, kun karan yli vaikuttaa sekä tulo- että paluupuolella sama paine-ero. Koska kompensaattori rajaa tulopuolen arvoon 10 bar, jää kuormaa kantaamaan vastaavasti 10 bar, mikä ei yleensä riittävä paine. Onneksi tulopuolelle saadaan tavallisesti lisää öljyä imuventtiilien kautta. Kuvassa 25 on selvitetty paine-eroja karan yli, kun ei

### Proportional technology, Load-pull during deceleration



Kuva 25. Kavitaatioehto

käytetä painekompensaattoria. Kummassakin tapauksessa venttiili on symmetrinen, eli virtauspinta-alat P-A ja B-T ovat yhtä suuret. Vasemmanpuoleisessa tapauksessa kavitaatioehtona on  $p_B \leq p_P$ . Oikeanpuoleisessa kuvassa vastaavasti  $p_B \leq p_P / \varphi^2$  ( $\varphi^2 = A_1/A_2$ ). Kompensaattoria käytettäessä paineen  $p_P$  tilalla on kompensaattorin määrittämä paine-ero  $\Delta p$ .

Tyypillisiä kuormanlaskun hallintakeinoja ovat:

- Kuormanlaskuventtiilit (yleisiä tai pakollisia tavara- ja henkilönostimissa).
- Karan virtauspinta-alojen määrittäminen niin, että poistopuolen vastapaine on tulo- puolta esim. 10 kertaa suurempi (käytetään mm. nopealiikkeisissä nosturissa, joihin kuormanlaskuventtiilit eivät sovellu värähtelyalttiuden takia). Karassa on mahdollisuus määrittää neljä erilaista virtauspinta-alaa: A- ja B-porttien tulot/paluut.
- Vastapaineventtiili venttiilin paluukanavassa (joskus jopa ohjattava, jotta vastapainetta voisi tilannekohtaisesti lisätä).
- Erikseen säädettävät tulo- ja poistopuolen venttiilit (harvinaisia käytännön sovelluksissa, katso luku 6.5).

Kuormanlaskuventtiilit ovat eniten käytetty ratkaisu, nopeisiin nostureihin ne eivät kuitenkaan sovellu. Karojen virtauspinta-alojen sovittaminen edellyttää venttiilivalmistajalta suurta kara valikointia. Lisäksi vastapainetta syntyy vaikka sitä ei tarvittaisi. Erilliskuristukset mukautuvat periaatteessa kaikkiin tilanteisiin mutta ratkaisu on kallis ja edellyttää tietotekniikkaan perustuvaa säätöä.

## 6.4 Muita valintoja

Edellisten lisäksi venttiilin varustelun voi kuulua vielä monia muita varustelukohteita, joista kukin voi sisältää edelleen useita vaihtoehtoja. Seuraavassa on eräitä näistä mainittu luettelomaisesti:

- kuormatakaisinkytketyn karan käyttö
- paineensyöttö erillisestä keskilohkosta
- kuormanpaineen vahvistusventtiili
- paluulinjan vastaventtiili
- esiohjauksen suodatus.

Kuorman takaisinkytkentä voidaan toteuttaa johtamalla lisäkuristuksilla kuormanpainetta karojen ohjauuspäättyihin tai ns pinnikarojen avulla. Pinnikaroissa on tavallaan mäntä joka aikaansaa karaan vastavoiman. Kumpikin menetelmä muodostavat tavallaan painetakaisinkytkennän, joka vaimentaa värähtelyjä. Käytännössä se pyrkii myös hieman sulkemaan karaa, jolloin voidaan tarvita normaalia suurempi nimellisvirtaus.

Paineensyöttö keskilohkosta jakaa virtauksen tasaisemmin ja pienemmin painehäviöin karalohkoille. Mahdollistaa suuremman maksimitilavuusvirran.

Kuormanpaineen vahvistusventtiili varmistaa kuormanpaineen LS-linjassa, vaikka siellä esiintyisi normaalia suurempi säätövuoto.

Paluulinjan vastaventtiili pitää venttiilin paluukanavissa hieman ylipainetta, jolloin imuventtiilin kautta saadaan enemmän nestettä sylinteriin kavitaatiotilanteissa.

Esiohjauksen suodatus varmistaa, että pienivälyksiset esiohjausventtiilit toimivat häiriöttä.

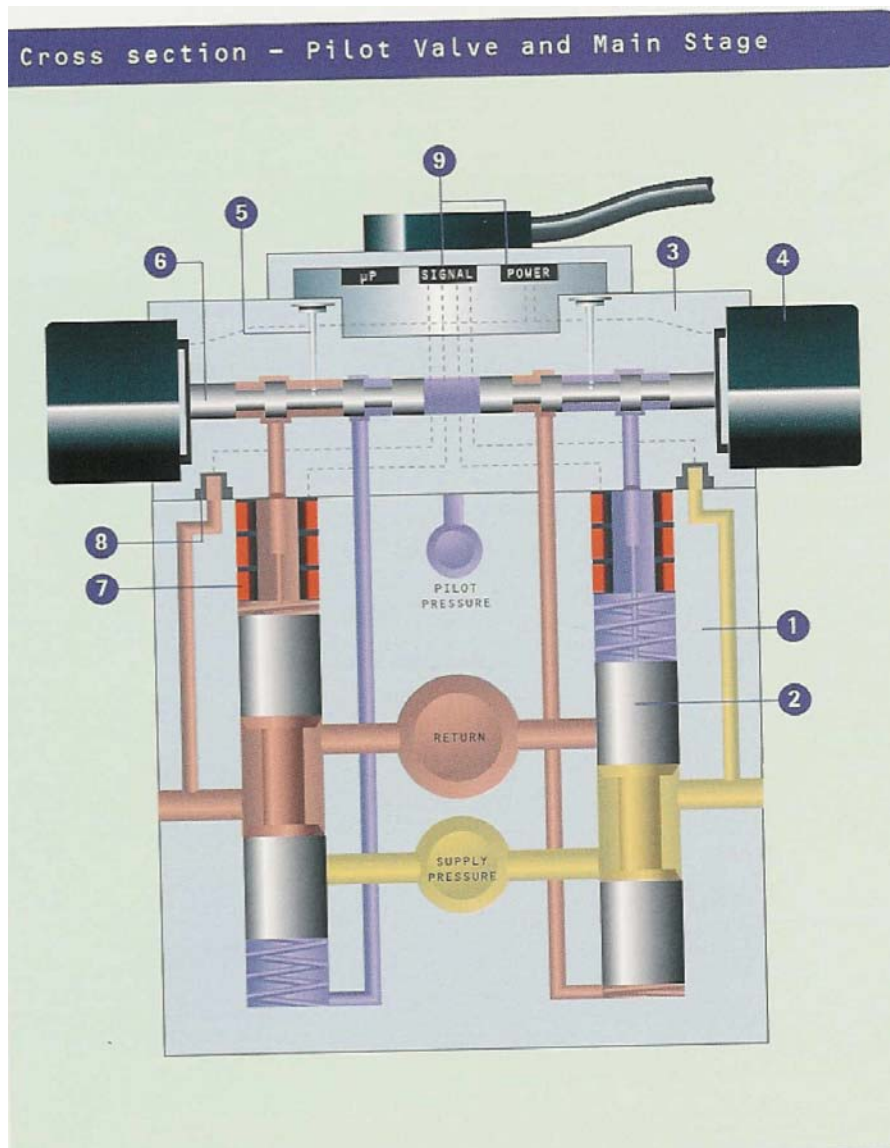
## 6.5 Kuormanlaskun hallinta erilliskuristusta käyttäen

Erikseen säädettävän tulo- ja poistokuristuksen käyttäminen tarjoaa mahdollisuuden kuormanlaskun hallintaan ilman kavitaatiota sekä pienillä häviöillä.

Yhden karan käyttäminen tarkoittaa, että tulo- ja poistokuristuksia säädetään samassa suhteessa ja kavitaation estämiseksi tarvitaan kuormaa kantava vastapaine. Tämä on mahdollista aikaansaada karojen virtauspinta-alojen sopivilla suhteilla. Ongelmana on, että näin aikaansaatu vastapaine vaikuttaa aina, myös silloin kun sitä ei enää tarvittaisi. Ylimääräinen vastapaine merkitsee ylimääräisiä tehohäviöitä (lämpöä järjestelmään).

Jotta erilliskuristuksilla päästäisiin hyvään ratkaisuun, tarvitaan tietoa sylinterissä vallitsevista paineista sekä kykyä laskea tietojen avulla oikeat venttiilien avautumat. Tämä edellyttää käytännössä sopivia tietokonepohjaisia laskenta-algoritmeja.

Kahden venttiilikaran käyttäminen on kallis ratkaisu. Kuvassa 26 on Ultronicin integroitu venttiili-ratkaisu. Venttiilin yksi lohko sisältää kaksi erillisesti ohjattavaa karaa, toinen männän puolelle ja toinen varren puolelle. Lähtöporttien paineiden mittaamiseksi venttiiliin on integroitu kaksi pientä paineanturia. Karojen tarkan asemoinnin mahdollistavat asema-anturit. Kaikki mitatut tiedot sekä venttiilille tulevat ohjeavrot siirtyvät CAN-väylän välityksellä.

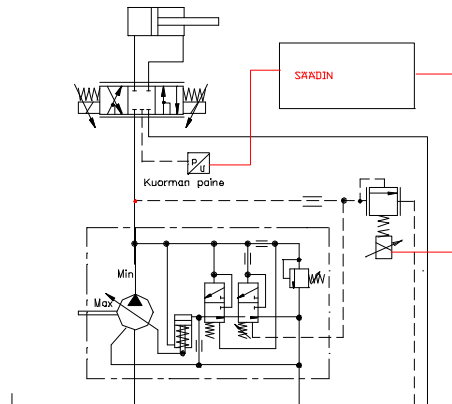


Kuva 26. Erilliskuristettu venttiili

## 6.6 ELS-järjestelmä

Kun LS-järjestelmän hydraulinen kuormanpainelinja korvataan sähköisesti, saadaan sähköisesti toteutettu LS-järjestelmä (Electric Load Sensing). LS-järjestelmä on alttiimpi värähtelyille kuin esi-

merkiksi ympärpumppausjärjestelmät. Usein käytetty keino värähtelyjen vaimentamiseen on kuormanpainelinjaan lisätty kuristin. Kuristimen käytön haittapuolena on vasteaikojen kasvu. Osaltaan kuristimen oikean säädön löytämistä vaikeuttavat nesteen viskositeetti muutokset.

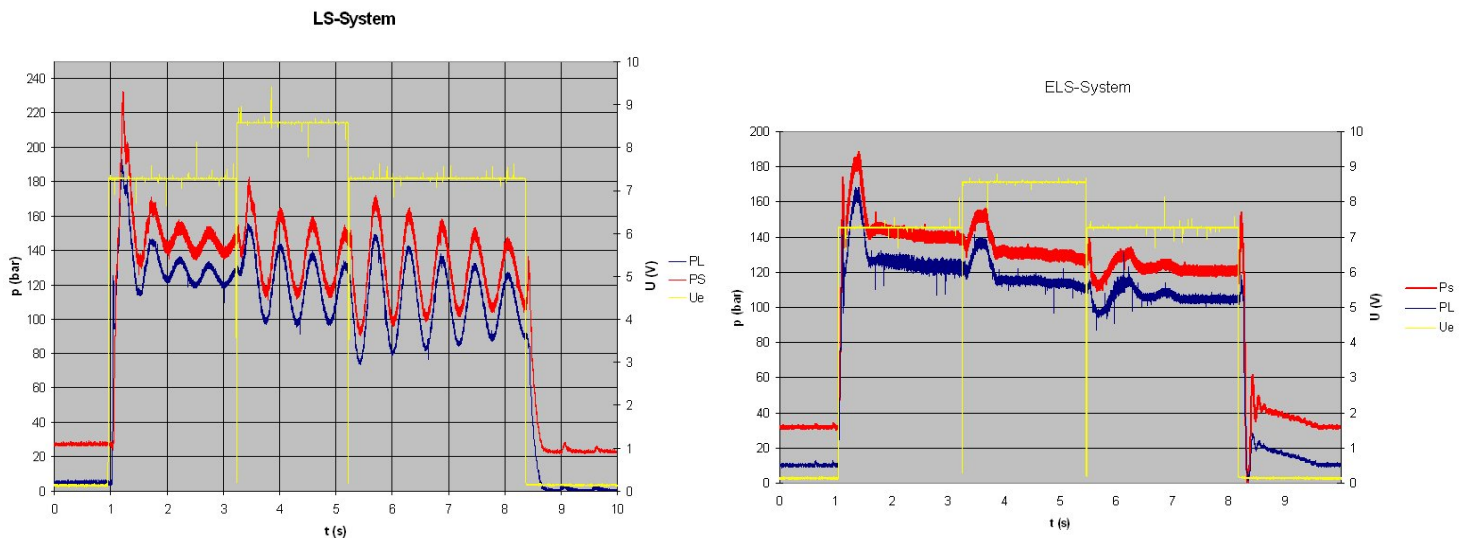


**Kuva 27. ELS-järjestelmän periaate**

Hydraulinen LS-linja voidaan muuttaa sähköiseksi käyttämällä paineanturia, mikroprosessoria ja proportionaalipaineenrajoitusventtiiliä kuvan 27 mukaisesti. On myös olemassa pumppuja, joissa sähköinen säätö on sisäänrakennettuna.

ELS-järjestelmässä sähköisestä kuormasignaalista alipäästösuodatetaan pois värähtely ja pumppua ohjataan suodatetulla signaalilla. Kuvassa 28 on esitetty millaisia tuloksia värähtelyjen vaimentumisessa on saavutettu. Vasen kuva vastaa normaalia LS-järjestelmää ja oikea ELS-järjestelmää. Keltainen viiva kuvissa esittää millaisen ohjauksen venttiilit ovat saaneet.

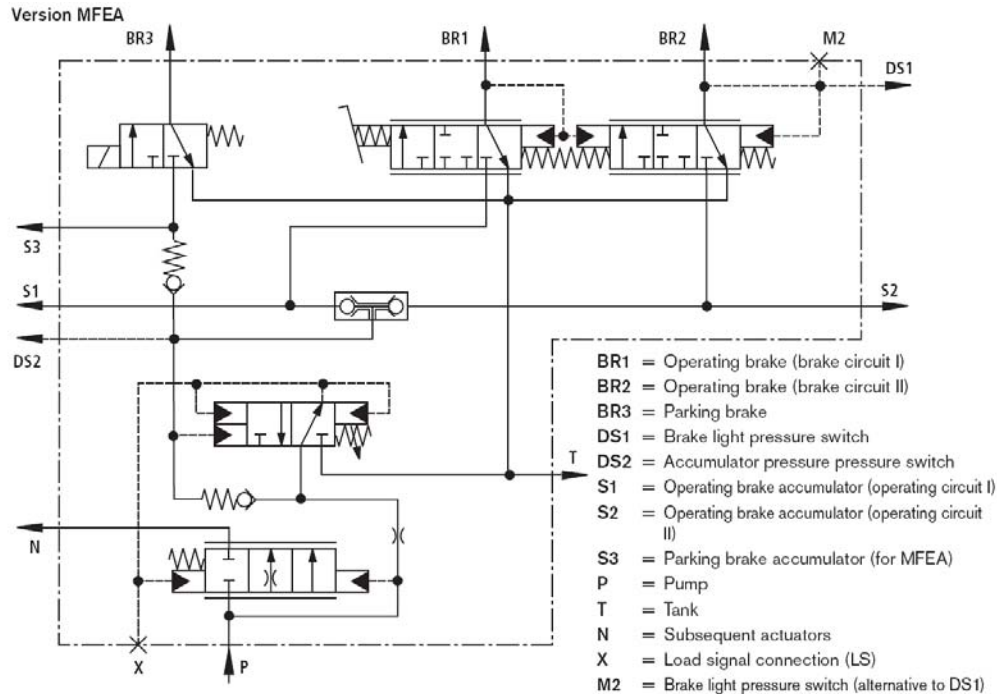
ELS-järjestelmä nostaa järjestelmän kustannuksia ja on tämän johdosta melko harvinainen käytännön sovellutuksissa. ELS-järjestelmän avulla pumpun syöttöpaine saadaan stabiloitua mutta painekompensaattorin käyttö saattaa heikentää toimilaitteeseen kohdistuvaa vaimennusta, koska painekompensaattori tavallaan eristää syöttöpaineen ja kuormanpaineen toisistaan.



**Kuva 28. LS- ja ELS järjestelmä vertailussa**

## 7 JARRUJÄRJESTELMÄT

Hydraulisten jarrujen käyttö työkoneissa on tavallista. Jarrutusenergia tulee pumpulta ja koneenkäyttäjä ohjaa sitä jarruventtiilien avulla. Jarrujärjestelmän paine otetaan työhydrauliikkapiiriltä tai omalta jarrupiiriltä.



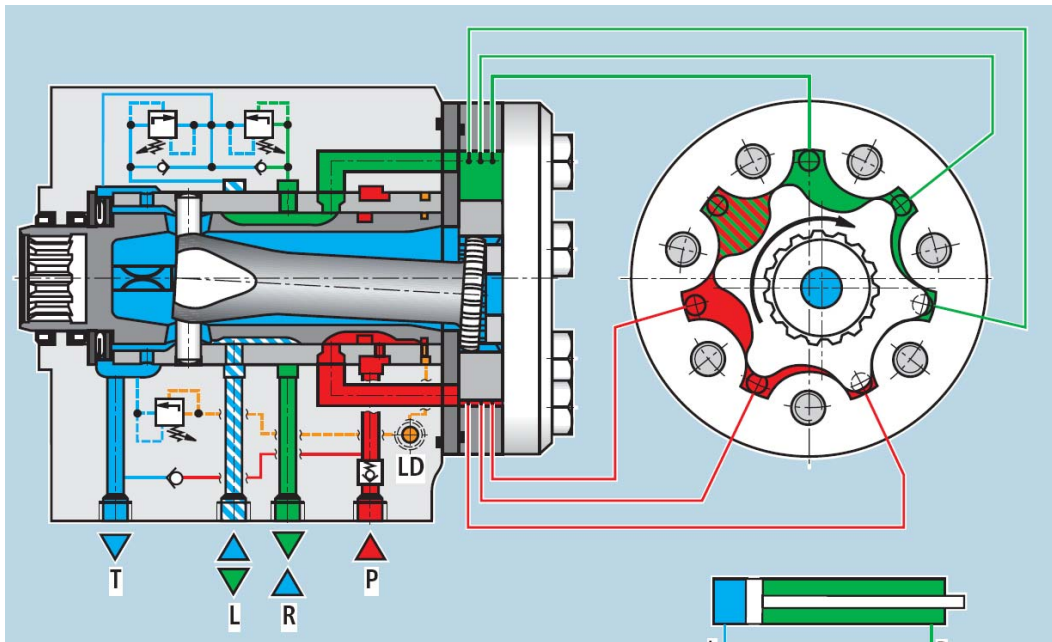
**Kuva 29: Jarruventtiili**

Kuvassa 29 näkyy eräs jarruventtiili, jonka tapaista käytetään, kun jarrutusenergia otetaan työhydrauliikkapiiristä. Venttiili soveltuu kytkennästä riippuen ympäripumppausjärjestelmään (CFO) tai LS/CFC järjestelmiin. CFO järjestelmässä alin venttiili kuristaa vapaakiertoa ja tuottaa tilavuusvirtaa S1, S2 ja S3 liittymöissä oleviin painevaraajiin jarrutusenergian laskiessa alle sallitun minimin. Paineita valvotaan toiseksi alimmalla venttiilillä. Vastaavasti LS tai CFC järjestelmissä x-liittymästä saadaan kuormantunto signaali, kun jarrupiirit tulee ladata. Jarruventtiilin eteen saattaa olla tarpeen kytkeä myös paineenalennusventtiili, mikäli jarrupiiri ei kestä täyttöjärjestelmäpainetta.

## 8. HYDROSTAATTINEN OHJAUS

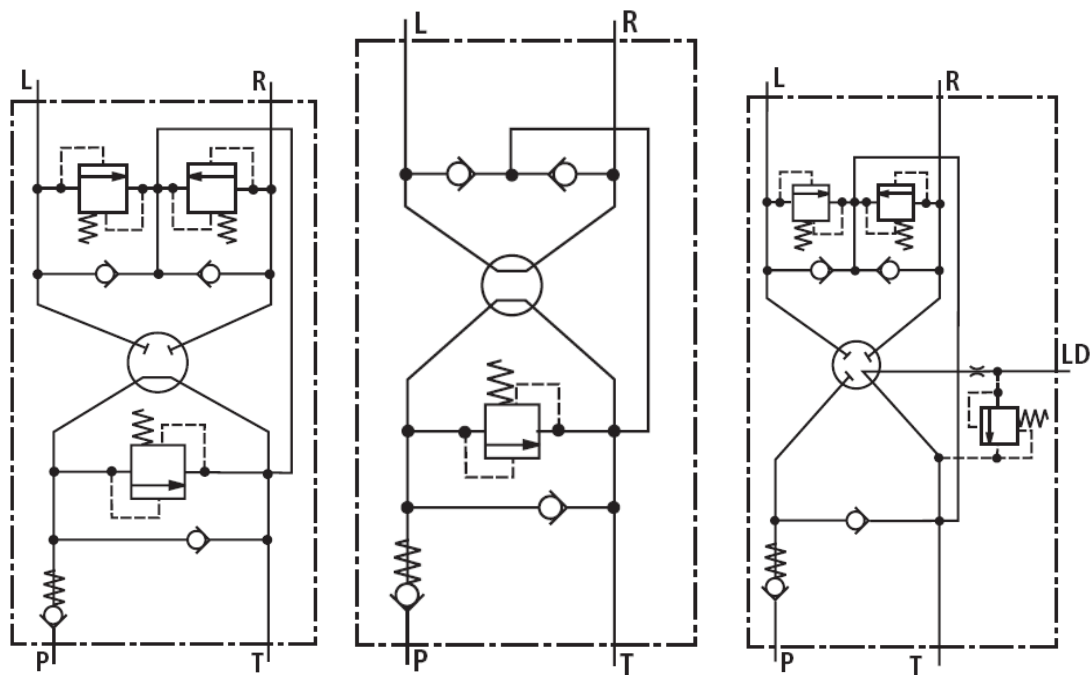
Työkoneiden yhteydessä käytetään sekä tehostettua ohjausta, että täyshydraulista ohjausta. Täyshydraulisen ohjauksen käyttö on sallittua vain työkoneiden liikenopeuksissa (maksimi 50 km/h). Täysin hydraulisessa ohjauksessa ohjausvoima tulee pääasiassa hydrauliikkapiiriltä ja mekaanista yhteyttä pyöriin ei ole. Hydraulisen ohjauksen ytimenä toimii annosteluventtiili ja pumpun yhdistelmä, jota kutsutaan usein Orbitrol-venttiiliksi (kuva 30). Ohjauspyörän kääntäminen kiertää kahta sisäkkäistä venttiilikaraa toisiinsa nähden ja avaa syöttöpaineen annostelupumpulle. Pumppuosa pyörii kevyesti syöttöpaineen johdosta ja annostelee samalla tilavuusvirran ohjaussyylintereille. Ohjaus-

pyörää kiertämällä saadaan tilavuusvirtaa ilman syöttöpainettakin mutta kääntäminen on erittäin raskasta.



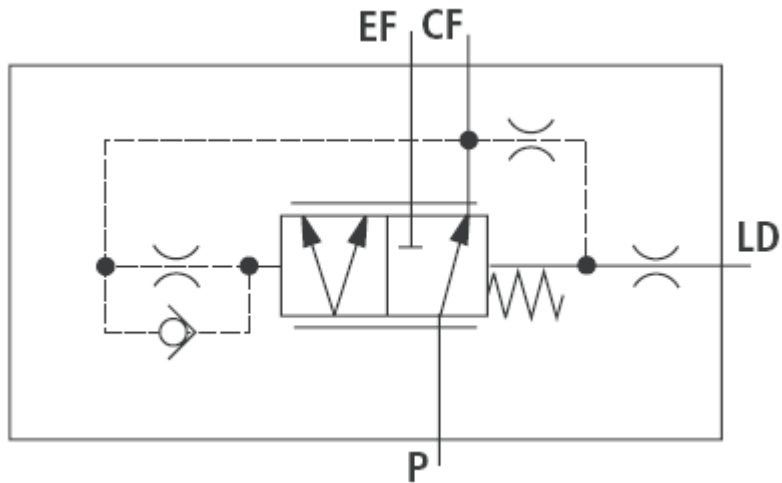
**Kuva 30: Orbitrol venttiili**

Ohjausventtiilimallista riippuen pyörissä vaikuttava ohjausvoima tuntuu ratissa tai sitten ei (kuva 31). Venttiilejä on myös erilaisiin järjestelmiin. Kuvan 31 vasen ja keskimmäinen venttiili sopivat kiinteälle pumpulle ja oikea puolestaan LS-järjestelmään.



**Kuva 31: Ohjausventtiili ilman ohjaustuntoa (vasen) ja ohjaustunnolla (kesk.), LS-tyyppi oikealla**

Kun ohjauksen paine otetaan työhydrauliikkapiiristä, tarvitaan kuvan 32 mukainen prioriteettiventtiili. Ohjausventtiili kytetään CF liittymään ja sen kuormantuntokanavaa voidaan käyttää LD - liittymän ohjaamiseen.



- P = Pump
- CF = Steering
- EF = Work hydraulics
- T = Tank
- LD = Load signal (dynamic)
- R; L = Cylinder

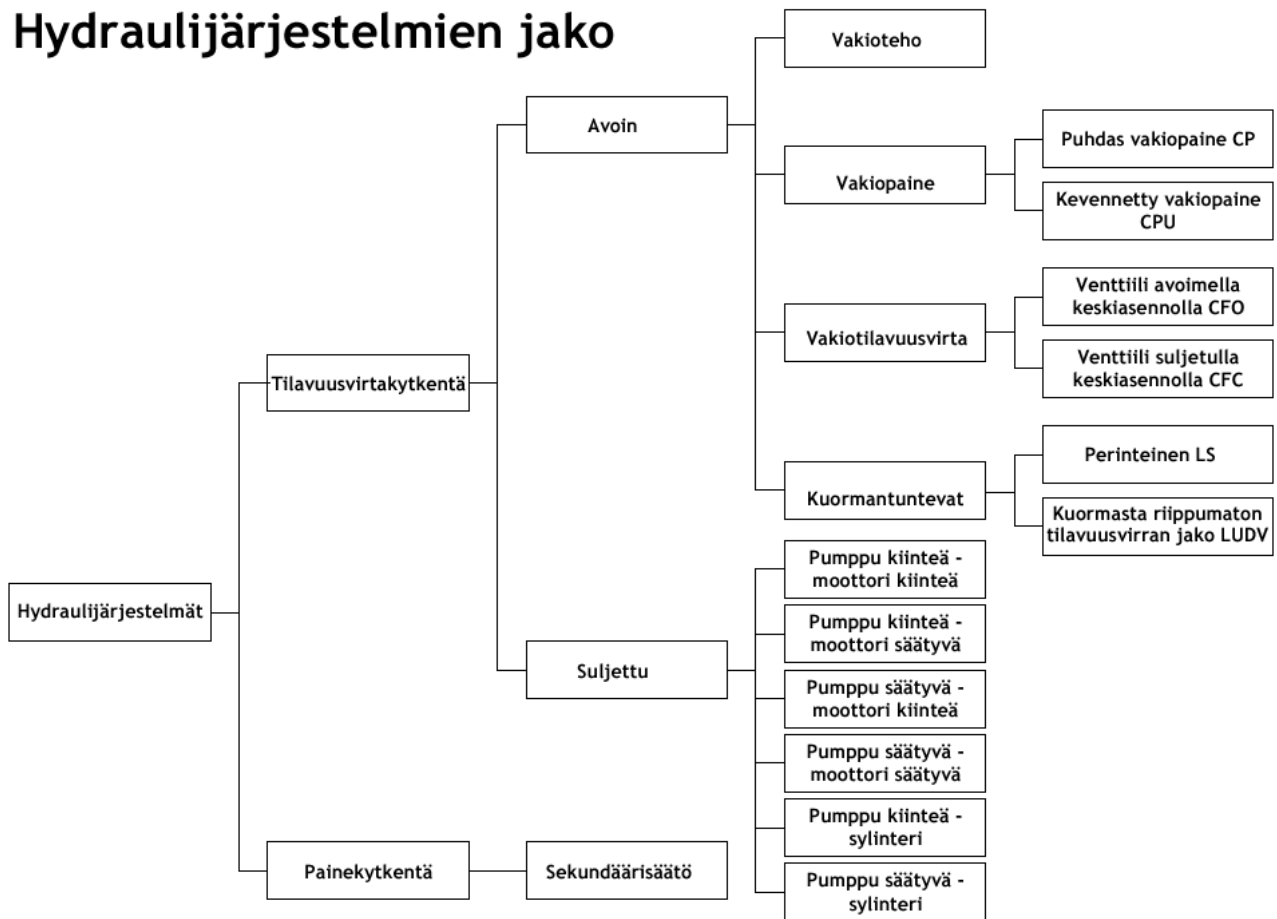
**Kuva 32: Prioriteettiventtiili**



## 9. JÄRJESTELMÄTYYPIT

Hydraulijärjestelmät voidaan jakaa kuvan 33 mukaisesti. Kurssin alkuosa on käsitellyt avoimia järjestelmiä. Nyt vuorossa suljetut järjestelmät.

### Hydraulijärjestelmien jako



Kuva 33.

*Tilavuusvirtakytkennässä (flow coupling)* toimilaitteelle tuleva tilavuusvirta määräytyy primääriyksikössä (hydraulipumppu) ja toimilaitteen (sylinteri tai hydraulimoottori) kuorman suuruus määrää järjestelmän painetason

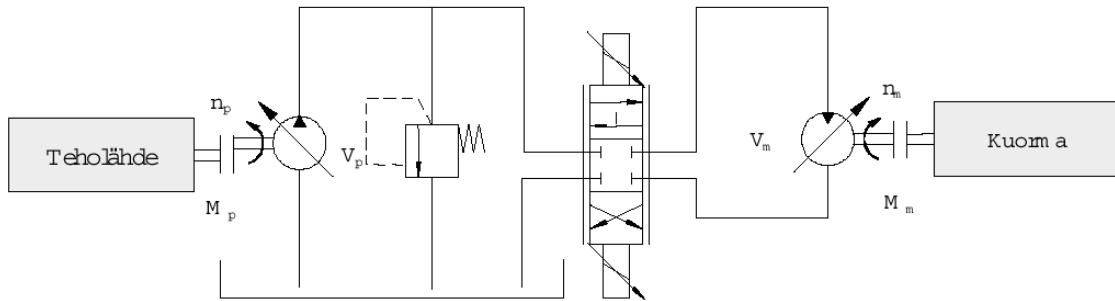
*Painekeykennässä (pressure coupling)* primääriyksiköllä (hydraulipumppu) vaikuttaa vakiopaine ja toimilaitteen (sylinteri tai hydraulimoottori) kuorman suuruus vaikuttaa toimilaitteen saamaan tilavuusvirtaan

### 9.1 Avoin hydraulijärjestelmä

Avoimessa hydraulijärjestelmässä, kuva 34, väliaine (esim. hydraulioöljy) palaa toimilaitteelta mahdollisten venttiilien kautta säiliöön, josta pumppu jälleen imee sen. Avoimelle hydraulijärjestelmälle on ominaista:

- järjestelmä on yksinkertaisempi, halvempi ja yleisempi kuin suljettu

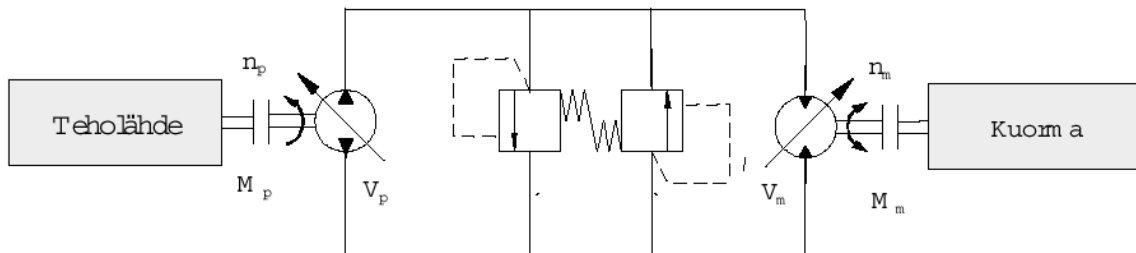
- toimilaitteen suunnanvaihto suoritettava venttiileillä, pumppu yksisuuntainen
- tilava säiliö (3-5 kertaa pumpun tilavuusvirta/minuutti; mitoitusohje)
- luonnollinen jäähdytys ison säiliön avulla
- suodatus helppo järjestää
- pumpulla ei voi jarruttaa



Kuva 34.

## 9.2 Suljettu hydraulijärjestelmä

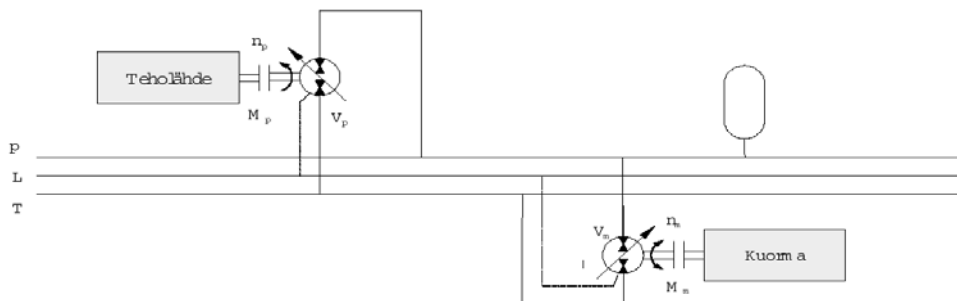
Suljetussa järjestelmässä, kuva 35, toimilaitteelta palaava väliaine johdetaan suoraan pumpun imu- puolelle eikä säiliöön. Toimilaitteena on yleisimmin hydraulimoottori. Järjestelmässä käytetään erillistä syöttöpumppua ja huuhtelujärjestelmää jäähdytykseen ja vuotojen kompensoimiseksi. Toimilaitteen suunnan vaihto ja nopeuden säätö aikaansaadaan säätövätilavuuksisen hydraulipumpun avulla muuttamalla tilavuusvirran suuntaa ja suuruutta.



Kuva 35.

## 9.3 Sekundäärisäädetty tehonsiirto

Sekundäärisäädössä, kuva 36, teholaähde tuottaa vakio paineen syöttölinjaan. Kuorma ottaa käyttöön siitä tarvitsemansa paineen ja tilavuusvirran. Kuorman laskeminen voi tuottaa järjestelmään tehoa.



Kuva 36.

## 9.4 Suljetun järjestelmän toimintaperiaate

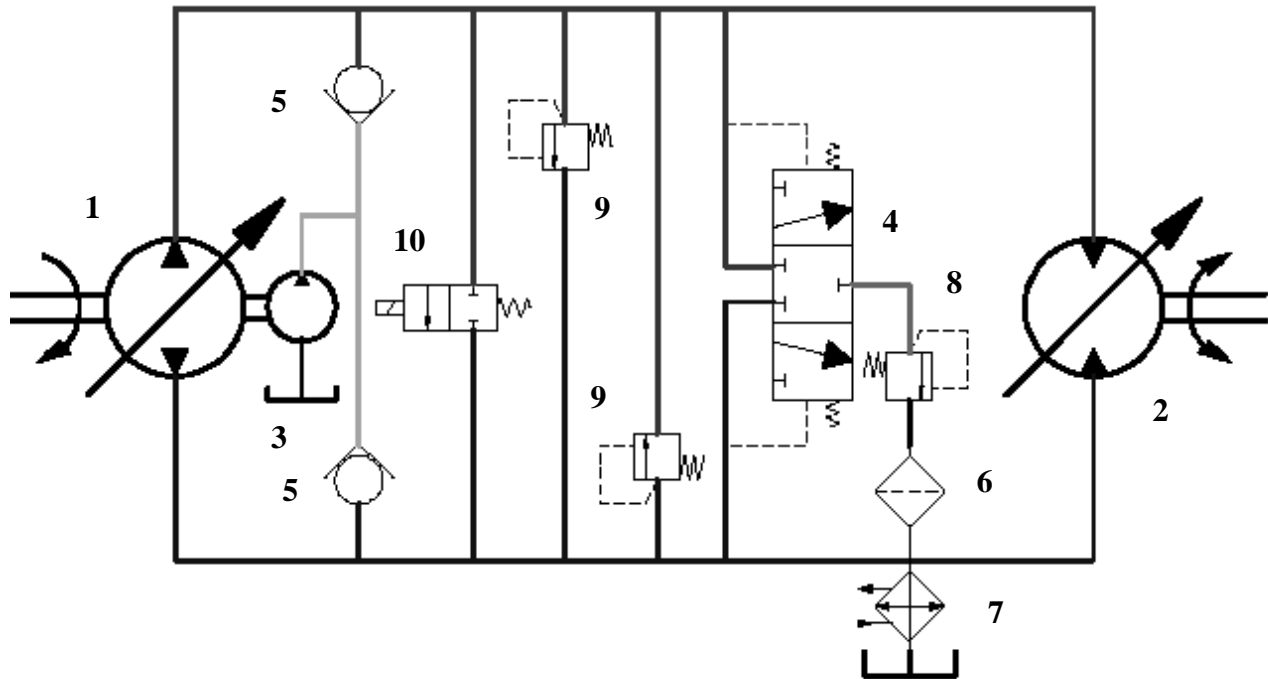
Apupumppu, jota kutsutaan tavallisesti syöttöpumpuksi, tarvitaan vuotojen ja huuhteluventtiilin lämpimenevän tilavuusvirran kompensoimiseksi. Syöttöpumppu aikaansaa myös tarvittavan syöttöpaineen (pääpumppu ei ole itse imevä), hoitaa jäähdytystä, suodatusta sekä tarvittaessa myös järjestelmän ohjaamista.

Järjestelmään (kuva 37) kuuluvat korkea- ja matalapainelinjat. Matalapainelinjassa on tyypillisesti lähes vakioaine (15-30 bar). Korkeapainelinjan paine määräytyy kuormituksen mukaan. Tyypillisesti maksimipaine on n. 420 bar. Toimilaitteelle tuleva tilavuusvirta on riippuvainen pumpulta saatavasta

tilavuusvirrasta, tilavuusvirtaa ohjataan siis pumpun avulla. Paineenrajoitusventtiilit määrittävät molemmille linjoille maksimipaineen.

Huuhteluventtiili tarvitaan öljyn ”huoltokiertoa” varten (suodatus ja jäähdytys).

Suljettu piiri on käytössä lähinnä mobilekoneiden ajovoimansiirroissa.



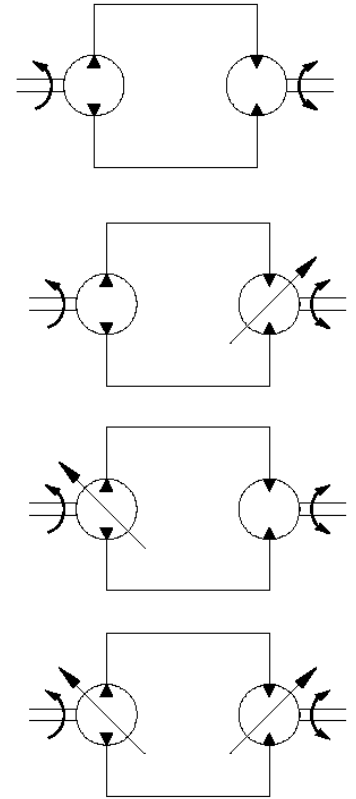
Kuva 37.

1. Pääpumppu (korkeapainepumppu), yleensä säädettävä
2. Hydraulimoottori, säädettävä tai kiinteä kierrostilavuus
3. Syöttöpumppu
4. Huuhteluventtiili
5. Vastaventtiili
6. Suodatin
7. Jäähdytin
8. Syöttöpumpun paineenrajoitusventtiili
9. Pääpiirin paineenrajoitusventtiilit

## 10. Vapaakiertoventtiili (esim hinausta varten)

### 9.4.1 Erilaiset kytkentäperiaatteet

- **Vakio pumppu - vakio moottori**
  - vakio pyörimisnopeuden ja momentin suhde moottorin ja pumpun välillä
- **Vakio pumppu - säätyvä moottori**
- **Säätyvä pumppu - vakio moottori**
- **Säätyvä pumppu - säätyvä moottori**



Kuva 38.

Kuvassa 38 on esitetty erilaisia tapoja toteuttaa suljettu järjestelmä. Kaksi ylintä ovat harvinaisempia. Säätyvää moottoria tarvitaan, kun muuntosuhteen tulee olla suurempi.

## 9.5 Ajovoimansiirto

Tyypillinen suljetun järjestelmän käyttökohde on liikkuvien työkoneiden ajovoimansiirtojärjestelmät. Kuvassa 39 on erilaisia työkoneita, joissa käytetään hydrostaattista ajovoimansiirtoa.

### 9.5.1 Ominaisuuksia

- portaattomasti säädettävä ulostulonopeus
- jäykkyys
- joustavuus komponenttien sijoiteltavuudessa
- ylikuormitussuoja paineenrajoitusventtiilien avulla
- mahdollisuus energian varastointiin
- hyvä säädettävyys
- Jarrutettavuus (30% ajotehosta voidaan absorboida hydraulimoottoreiden kautta, loput mekaanisilla jarruilla)



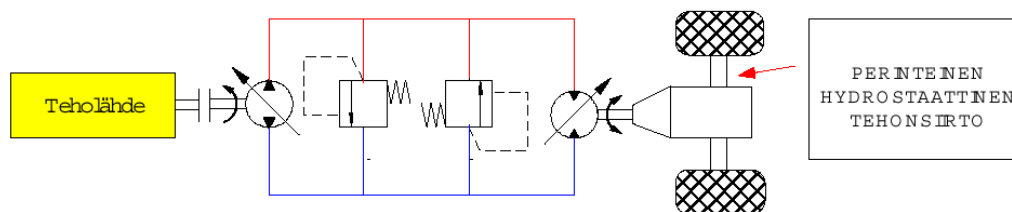
Kuva 39.

### 9.5.2 Ajovoimansiirron osat ja järjestelmäratkaisuja

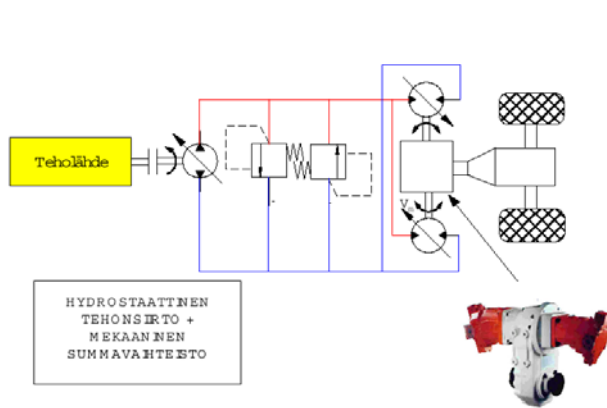
Hydrostaattinen ajovoimansiirto lyhennetään usein HST (Hydrostatic Transmission). Järjestelmään sisältyvät yleensä seuraavat osat:

- Käyttömoottori (yleensä dieselmoottori)
- Hydraulipumppu (yksi tai useampia)
- Hydraulimoottori (yksi tai useampia)
- Apupumppu (suljettu hydraulijärjestelmä)
- Paineenrajoitusventtiili (yksi tai useampia)
- Huuhteluventtiili (suljettu hydraulijärj.)
- Suodatus, jäähdytys, tankki
- Ohjaukseen / säätöön tarvittavat komponentit.

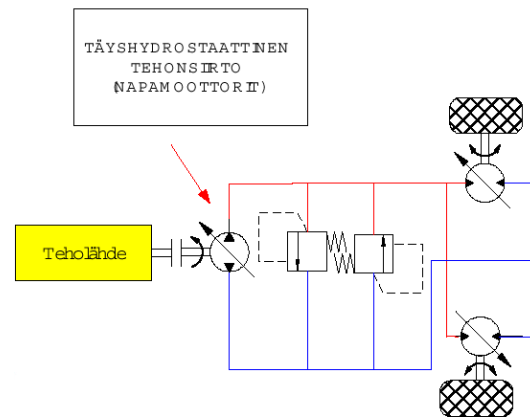
Järjestelmäratkaisuja kuvissa 40, 41 ja 42.



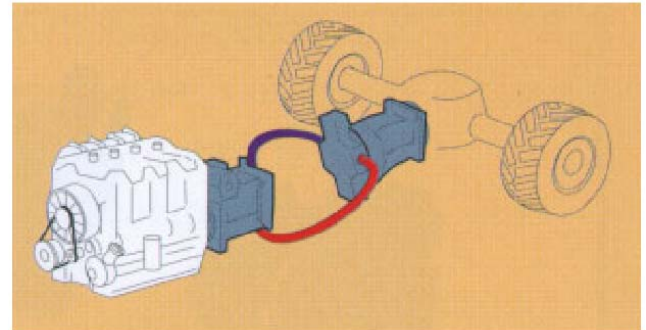
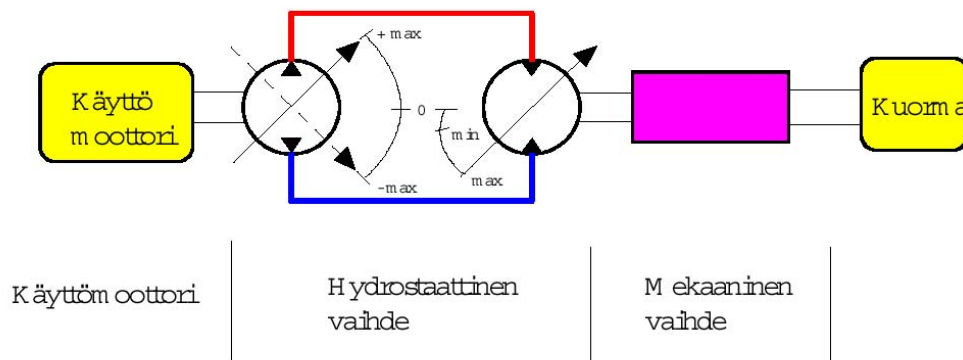
Kuva 40.



Kuva 41.



Kuva 42.



Kuva 43.

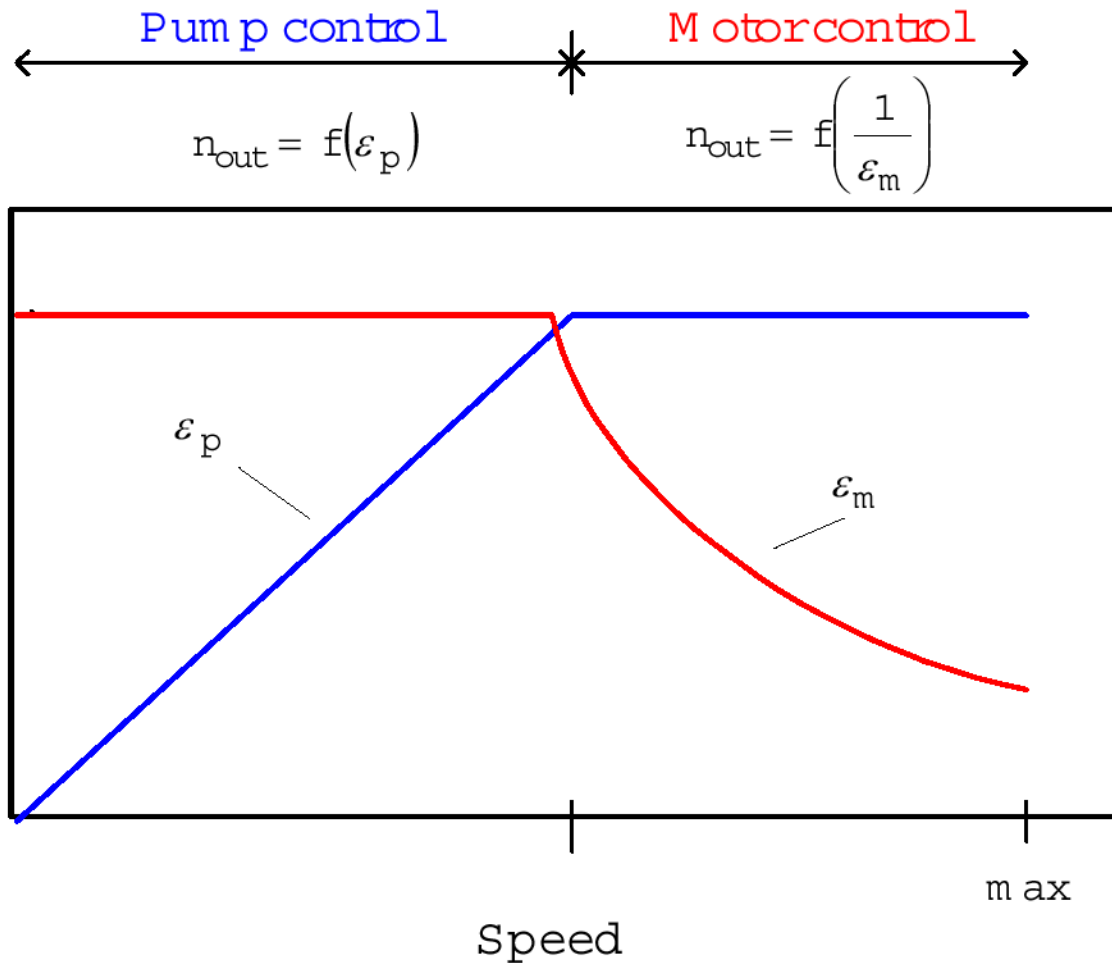
Kuvassa 43 ovat järjestelmän osat sellaisina, kun laitteissa esiintyvät. Vasemmalla alhaalla pumppu on oikealla ja hydraulimoottori vasemmalla.

## 9.6 Ajovoimansiirron ohjaaminen

Periaatteessa ajovoimansiirtoa voidaan ohjata hyvin monella tavalla. Kuva 44 esittää tavanomaisen säätöperiaatteen, jossa välityssuhdetta kasvatetaan säätämällä aluksi pumpun kierrostilavuutta suuremmaksi, moottorien kierrostilavuuden ollessa maksimissa. Vetopyöriltä on mahdollista saada täysi vääntömomentti vetomoottorien kierrostilavuuden ollessa suurimmillaan, mikäli käyttömoottorin te-

ho riittää täyden paineen tuottamiseen. Tämän jälkeen moottorien kierrostilavuutta aletaan pienentämään, jolloin välityssuhde edelleen kasvaa. Pumppu ja moottori on esisäädetty yhdessä käyttömoottorin kanssa toteuttamaan tämä toiminta.

Työkoneissa käytetään useimmiten ns. ajoautomaatiikkaa ohjaamaan pumpun ja moottorien säätämistä, jotta koneen käyttö olisi vaivatonta. Ajoautomaatiikkajärjestelmät ovat hydraulisia tai sähköisiä. Sähköisesti ohjatut järjestelmät ovat yleistymässä muunkin elektroniikan lisääntyessä. Ne mahdollistavat kuvaan 44 verrattuna monipuolisempia säätömahdollisuuksia.

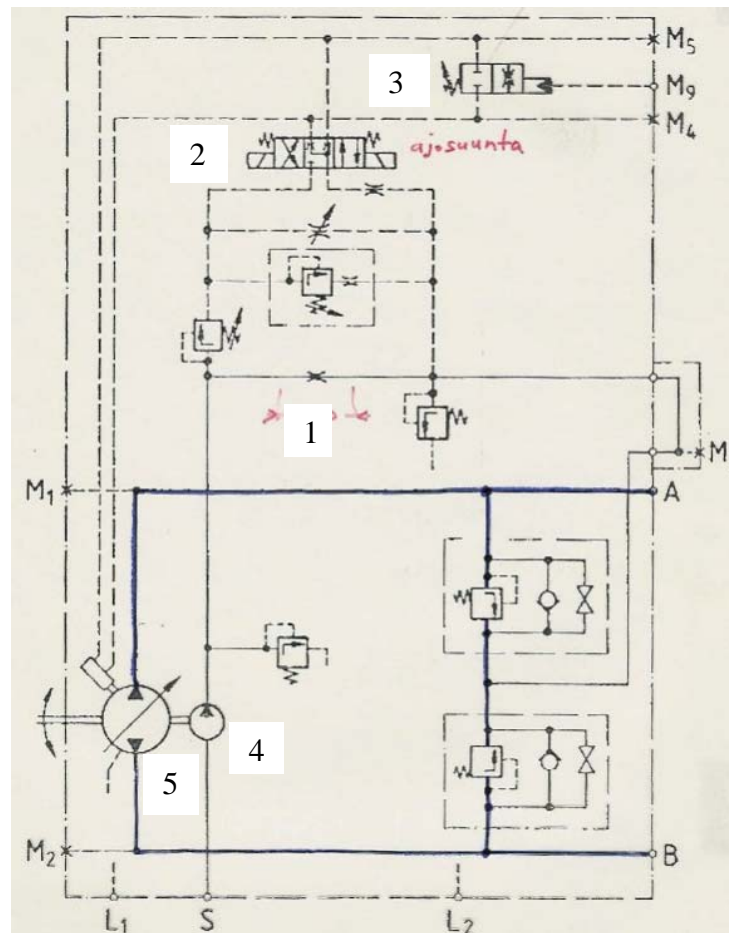


Kuva 44.

### 9.6.1 Hydraulisesti toteutettu ajoautomaatiikka

Kuvassa 45 on pumpun hydraulikaavio, jossa käytetään hydraulisesti toteutettua ajoautomaatiikkaa. Syöttöpumpun 4 tuottama tilavuusvirta on suoraan verrannollinen käyttömoottorin pyörimisnopeuteen. Pumpun 5 säätämiseen tarvittava paine-ero aikaansaadaan kuristuksella 1. Mitä suurempi tilavuusvirta sen läpi kulkee sitä suurempi paine-ero syntyy. Kuristuksen 1 yläpuolella sijaitsevat muut venttiilit ovat ajovoimansiirron ominaisuuksien säätämistä varten ja niitä tarvitaan myös erilaisten pumppu-käyttömoottori yhdistelmien oikeiden säätöjen aikaansaamiseksi. Ajosuunta tai ”vapaa” valitaan suuntaventtiilistä 2. Kuristimen 1 aikaansaama paine-ero pääsee sen läpi vaikuttamaan pumpun kierrostilavuuteen, kun eteen tai taakse ajo on valittu. Lisäventtiilien säädöllä voidaan vaikuttaa kuinka pumppu kasvattaa kierrostilavuuttaan. Jos säätöpaineen kasvu on liian nopeaa, tuntuu kuin

käytettäisiin liian suurta vaihdetta. Tämä johtuu siitä, että pumppu kuormittaa käyttömootoria voimakkaasti hidastaen sen pyörimisnopeuden kasvua. Venttiilin kolme avulla saadaan aikaan ryömintäajo, eli hidas liikenopeus suurella pyörimisnopeudella. Tämä mahdollistaa suuren vääntömomentin saannin.

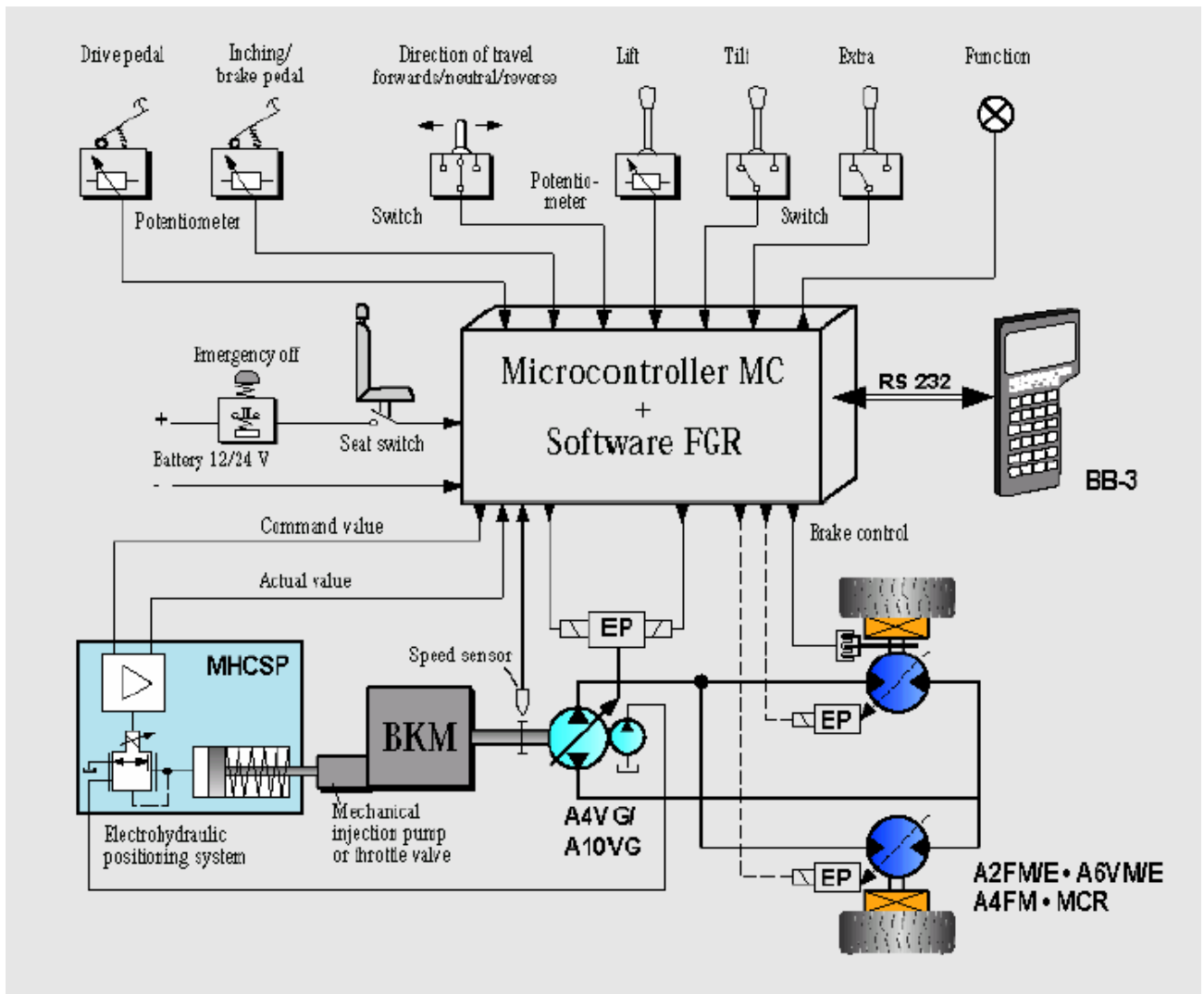


Kuva 45.

### 9.6.2 Sähköinen ajoautomaatiikka

Sähköisen mikroprosessoripohjaisen ajoautomaatiikan avulla voidaan toteuttaa huomattavasti monipuolisempia säätöjä kuin perinteisellä hydraulisella säädöllä. Kuvassa 46 on eräs sovellutusesimerkki. Pumppua ja moottoreita ohjataan proportionaaliventtiileillä, jotka saavat syöttöpaineen syöttöpumpulta. Mikroprosessorin ohjelmoinnista riippuen pumppua ja moottoreita voidaan säätää toisiinsa riippumatta. Tavoitteena voi olla optimaalisen hyötysuhteen saanti, käyttömootorin pitäminen maksimimomentin tai -tehon pyörimisnopeudella tms.



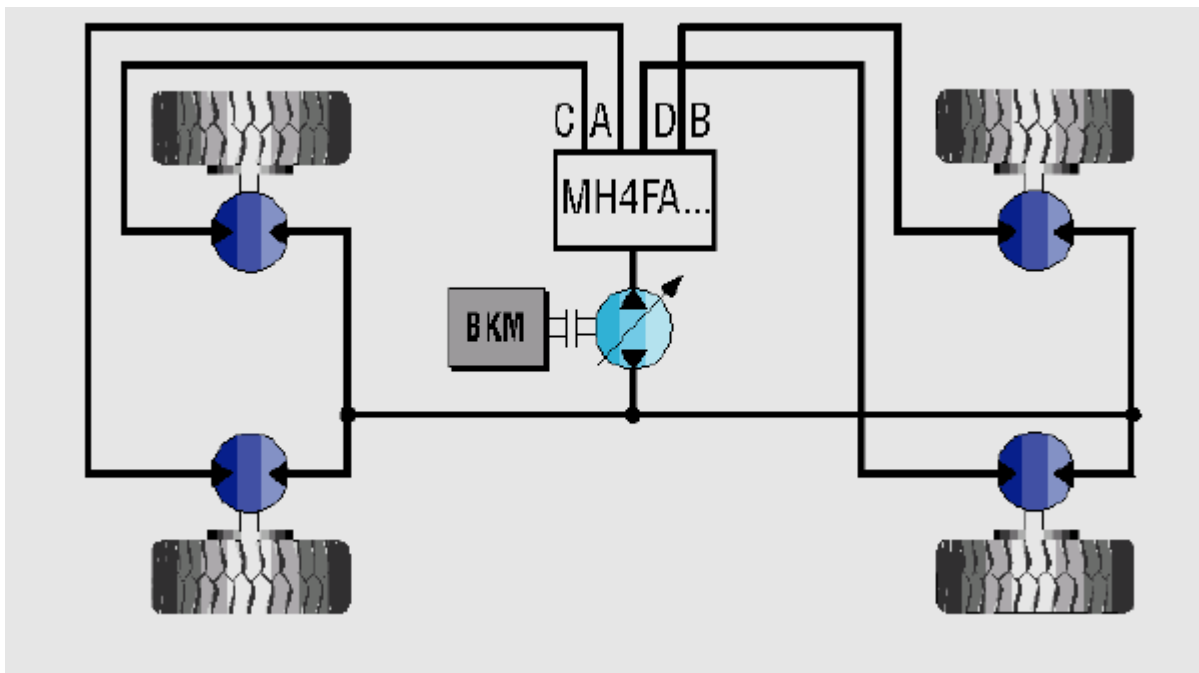


Kuva 46.

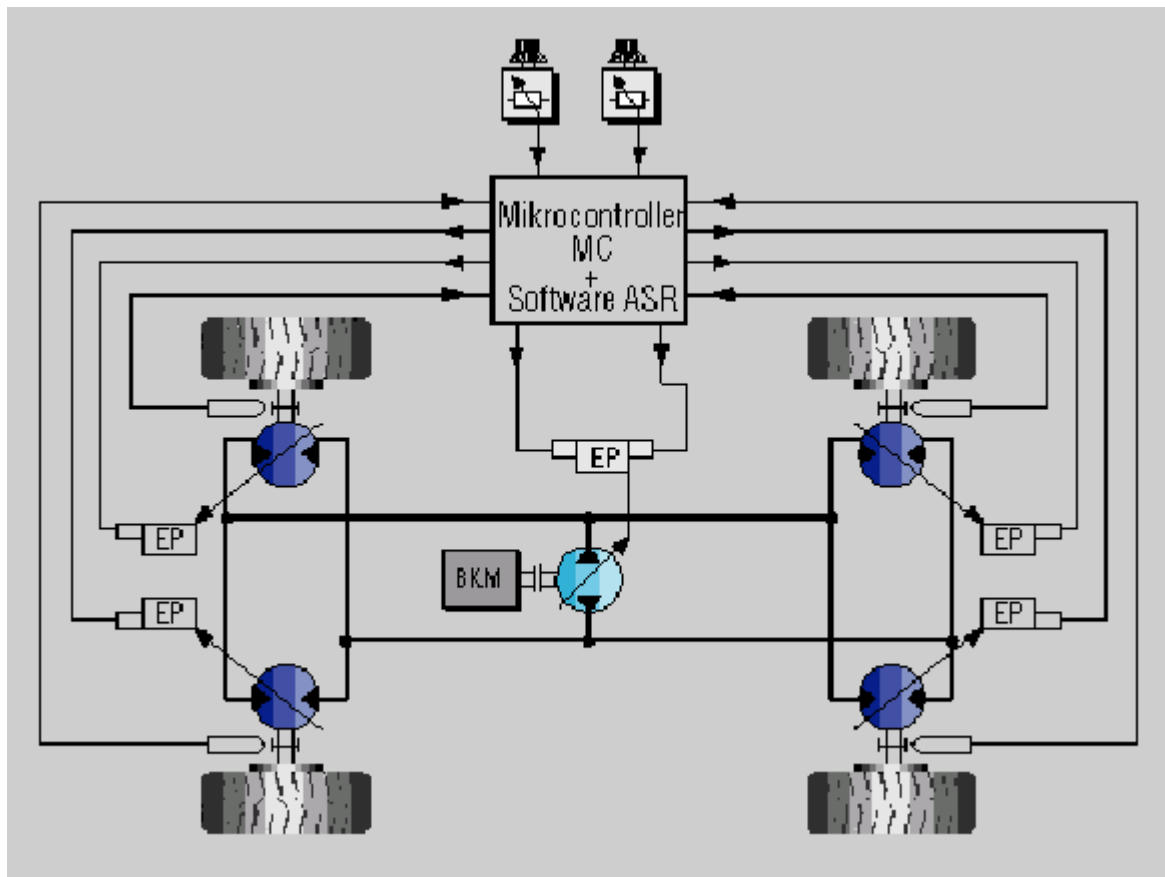
### 9.6.3 Luistonesto

Mekaanisen vaihteiston yhteydessä voidaan käyttää tavanomaisia ratkaisuja. Kun hydraulimoottoreita on kaksi tai useampia, pyrkii tilavuusvirta ohjautumaan vähemmän kuormitetuille moottoreille. Näin niiden pyörimisnopeus kasvaa (luisto) ja vetovoimaa ei saada kasvatettua. Tilavuusvirran jako voidaan aikaansaada pakotetusti virranjakoventtiilien avulla, kuva 47. Myös hydraulimoottorien kytkeminen sarjaan pakottaa pyörät samalle nopeudelle (huom paineentarve kasvaa).

Luistonesto voidaan toteuttaa myös kuvan 48 mukaisesti elektroniikkaa hyödyntäen. Vetopyörien pyörimisnopeus mitataan antureilla ja jos joku pyöristä alkaa luistaa eli pyörimisnopeus kasvaa, alentaa sähköinen järjestelmä, ASR, luistavan pyörän kierrostilavuutta, kunnes vääntömomentti ei enää riitä luistoon. Tällä järjestelmällä kustakin pyörä aikaansaa kitkasta riippuen parhaan vetovoiman. Hyvissä olosuhteissa vetovoimaa rajoittaa käyttömoottorin teho, maksimi paine sekä hydraulimoottorien kierrostilavuus.



Kuva 47.



Kuva 48.