

**Tielaitos**

# **Sorateiden kelirikkovaurioiden korjaaminen, väliraportti II**

**Prosessikipsin ja biotiitin materiaalitutkimukset**



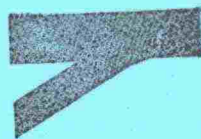
**Tiehallituksen  
sisäisiä  
julkaisuja**

**32/1992**

**Kuopio 1992**

**Kuopion  
tuotantotekninen  
kehitysyksikkö**

08 TIEL



**Tielaitos**  
Tiehallituksen kirjasto

Doknro: 920782  
Nidenro: 921080

Tiehallituksen sisäisiä julkaisuja  
32/1992

**Sorateiden kelirikkovaurioiden  
korjaaminen, väliraportti II**

Prosessikipsin ja biotiitin materiaalitutkimukset

**Tielaitos**  
Kuopion tuotantotekninen  
kehitysyksikkö

Kuopio 1992

Valtion painatuskeskus  
Pasilan VALTIMO  
Helsinki 1992

Julkaisua saatavana:  
Kuopion tuotantotekninen  
kehitysyksikkö

**Tielaitos**

Tiehallitus  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puh. vaihde (90) 148 721

Kuopion tuotantotekninen  
kehitysyksikkö  
PL 1117  
70101 KUOPIO  
Puh. (971) 199 754

Asiasanat kipsi, biotiitti, stabilointi, routa, routiminen, soratie

## TIIVISTELMÄ

Kemira Oy Siilinjärven Tehtaiden prosessikipsille ja biotiitille on tässä laboratoriotutkimuksessa tutkittu erilaisia jalostamismahdollisuuksia. Kipsiä on tutkittu sideaineenosana lujittamaan soratiessä olevia murske ja hiekka kerroksia. Kipsin ja biotiitin samoin kuin kipsi-biotiittiseoksen lujittamista on tutkittu eri sideaineilla. Lisäksi on tutkittu biotiitti-murskeen stabilointimahdollisuuksia. Lujittamisessa on käytetty sideaineina sementtiä, hienoksijauhettua masuunikuonaa, poltettua kalkkia ja Vuorikemian Finnstabi-tuotetta sekä näistä tehtyjä erilaisia seoksia.

Tutkimuksen ensivaiheessa tehtiin usealle erilaiselle sideainevaihtoehdolle esikokeet lujuuskokeina, joiden perusteella valittiin sideaineet varsinaiseen tutkimukseen. Lujuustutkimus on sisältänyt valituissa rajoissa sideainelaadun ja määrän sekä aikalujittumisen tutkimukset. Lujuus-muodonmuutosominaisuuksien lisäksi materiaaleilla on tutkittu dynaaminen lujuus, kosteuden vaikutus lujuuteen, jäätymis-sulamiskäyttäytyminen, routiminen, lämmönjohtavuudet ja vedenläpäisevyydet sekä liukenevuudet vesi- ja typpihappouutoilla.

Tutkimukset osoittavat, että prosessikipsille ja biotiitille on löydettävissä hyötykäyttösovellutuksia tierakennuskohteissa. Erityisesti kipsin käyttö murskeen stabilointiin, kipsin ja biotiitin seos 1:1 sekä biotiitti-murskeseos osoittautuivat lupaaviksi. Tämän tutkimuksen perusteella valitaan koerakentamiskohteissa käytettävät massat. Parhaimmiksi osoittautuneiden massojen seosten optimointitutkimus tulisi tehdä koerakentamisen kokemusten jälkeen, jonka pohjalta sovellutusten perusteellisempi teknis-taloudellinen analysointi voidaan tehdä.

## ALKUSANAT

Prosessikipsin ja biotiitin materiaalitutkimukset liittyvät Sorateiden kelirikkovaurioiden korjaaminen-tutkimukseen. Prosessikipsiä ja biotiittia syntyy sivutuotteena Kemira Oy Siilinjärven tehtaalla. Vuosittain syntyvän biotiitin määrä on yli 5 miljoonaa tonnia ja prosessikipsin määrä noin 1,4 miljoonaa tonnia.

Tutkimuksella on pyritty selvittämään mahdollisimman monipuolisesti prosessikipsin ja biotiitin käyttömahdollisuudet tien rakennekerroksissa. Tutkimuksessa esitetyt koerakenteet toteutetaan Juukan ja Kiu-ruveden tiemestaripiirien alueilla kesän 1992 aikana.

Tutkimuksen ovat tilanneet Suomen Geotutkimus SGT Oy:ltä Kemira Oy ja tielaitoksen Kuopion tuotantotekninen kehitysyksikkö.

Kuopiossa toukokuussa 1992

Kemira Oy ja tielaitoksen Kuopion tuotantotekninen kehitysyksikkö.

## Sisältö

Tiivistelmä	3
Alkusanat	5
Sisällysluettelo	7
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>9</b>
<b>2 MATERIAALIEN ESITUTKIMUKSET</b>	<b>10</b>
2.1 Materiaalikuvaukset	10
2.2 Indeksikokeet	10
2.2.1 Kipsi	10
2.2.2 Biotiitti	11
2.2.3 Murske	11
<b>3 LUJUUSTUTKIMUKSET</b>	<b>13</b>
3.1 Esikokeet	13
3.1.1 Kipsin kovettaminen	13
3.1.2 Biotiitin jalostaminen	15
3.1.3 Murskeen stabilointi	16
3.2 Aikalujittuminen ja kosteuden vaikutus lujuuteen	17
3.2.1 Kipsi	17
3.2.2 Biotiitti+kipsi -seos	19
3.2.3 Biotiitti+murske -seos	20
3.2.4 Murske	21
3.3 Lujuustulosten tarkastelu	22
3.3.1 Kipsi	22
3.3.2 Biotiitti+kipsi -seos	24
3.3.3 Biotiitti+murske -seos	25
3.3.4 Murske	25
<b>4 VEDENLÄPÄISEVYYSKOKEET</b>	<b>28</b>
4.1 Koejärjestely	28
4.2 Tutkimuksiin valitut runko- ja sideaineet	28
4.3 Tulosten tarkastelu	29
4.3.1 Kipsi	29
4.3.2 Biotiitti+kipsi -seos	29
4.3.3 Biotiitti+murske -seos	29
4.3.4 Murske	30

<u>5</u>	<u>JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOKEET</u>	<u>31</u>
5.1	Tutkimuksen tavoite	31
5.2	Koejärjestely	31
5.3	Tulokset ja tulosten analysointi	32
5.3.1	Kipsi	33
5.3.2	Biotiitti+kipsi -seos	34
5.3.3	Biotiitti+murske -seos	35
5.3.4	Murske	36
<u>6</u>	<u>LÄMMÖNJOHTAVUUS</u>	<u>37</u>
<u>7</u>	<u>LIUKENEVUUSKOKEET</u>	<u>39</u>
<u>8</u>	<u>JOHTOPÄÄTÖKSET</u>	<u>42</u>

Liitteet:

- Liite 1. Esitutkimukset, kipsi
- Liite 2. Esitutkimukset, biotiitti+kipsi -seos
- Liite 3. Esitutkimukset, murske
- Liite 4. Aikalujittuminen, kipsi
- Liite 5. Sideaineen vaikutus lujuuteen ja sideainemäärän vaikutus lujuuteen, kipsi
- Liite 6. Kosteuden vaikutus lujuuteen, kipsi
- Liite 7. Sitoutumisen vaikutus lujuuteen, kipsi
- Liite 8. Aikalujittuminen, biotiitti+kipsi -seos
- Liite 9. Sideaineen vaikutus lujuuteen, biotiitti+kipsi -seos
- Liite 10. Kosteuden vaikutus lujuuteen, biotiitti+kipsi -seos
- Liite 11. Aikalujittuminen ja kosteuden vaikutus lujuuteen, biotiitti+murske -seos
- Liite 12. Aikalujittuminen, murske
- Liite 13. Sideaineiden vertailu, murske
- Liite 14. Kosteuden vaikutus lujuuteen, murske
- Liite 15. Vedenläpäisevyyskokeet, kipsi ja biotiitti+kipsi -seos
- Liite 16. Vedenläpäisevyyskokeet, biotiitti+murske -seos
- Liite 17. Vedenläpäisevyyskokeet, murske
- Liite 18. Jäätymis-sulamiskoe (14 sivua)



## 1 JOHDANTO

Kemira Oy Siilinjärven Tehtaat ja tielaitos/Kuopion tuotantotekninen kehitysyksikkö ovat tilanneet Suomen Geotutkimus SGT Oy:ltä Kemira Oy Siilinjärven Tehtaiden prosessikipsin ja biotiitin hyötykäyttöön liittyvät materiaalitutkimukset. Tutkimukset liittyvät tielaitoksen Sorateiden kelirikkovaurioiden korjaaminen -projektiin, jossa on eräisiin koerakennuskohteisiin esitetty käytettäväksi jalostettuja jätemateriaaleja. Koerakennuskohteista on yksi biotiitti- ja kaksi kipsikoerakennetta.

Tutkimustyöhön ovat osallistuneet DI Pentti Lahtinen, tekn.tri Pertti Nieminen ja DI Elina Parkkinen sekä fil.lis Jukka Palko. Tutkimukset käynnistyivät elokuussa 1991. Tämä on loppuraportti suoritetuista materiaalitutkimuksista.

## 2 MATERIAALIEN ESITUTKIMUKSET

### 2.1 Materiaalikuvaukset

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää prosessikipsin ja biotiitin hyötykäyttöä tien rakennekerroksissa. Kipsiä tutkitaan sekä kovetettuna kipsimassana että sideaineen osana. Biotiitista pyritään saamaan ja-lostamalla maarakentamiseen kelpaavaa materiaalia.

Tutkimuksissa on käytetty runkoaineena Siilinjärven Tehtaiden biotiittia ja dihydraattimuotoista prosessikipsiä sekä tielaitoksen Pohjois-Karjalan piirin toimittamaa Juuan mursketta. Sideaineena on stabi-loituvuus- ja kovettumistutkimuksissa käytetty runkoaineesta riippuen sementtiä, poltettua kalkkia, hienoksi jauhettua masuunikuonaa, Kemira Oy Vuorike-mian Finnstabilia ja prosessikipsiä sekä näiden seok-sia.

### 2.2 Indeksikokeet

#### 2.2.1 Kipsi

Kipsistä tehtiin vesipitoisuusmääritys kuivaamalla kipsiä uunissa, jonka lämpötila oli 110 °C. Kuumen-uksen jälkeen 75% kipsin kidevedestä oli haihtunut ts. dihydraattikipsi oli muuttunut hemihydraatiksi ja vesipitoisuudeksi saatiin:  $w = 48,2 \%$ . Tätä arvoa on käytetty laskettaessa kipsin kuivapainoa. Tarkis-tusta varten kipsiä kuivattiin vielä 60 °C lämpöti-lassa yksi vuorokausi, missä vesipitoisuudeksi saa-tiin  $w = 31,4 \%$ . Tämä oli tutkimuksissa käytetyn kipsin (dihydraattimuotoisen kipsin) todellinen vesipitoisuus.

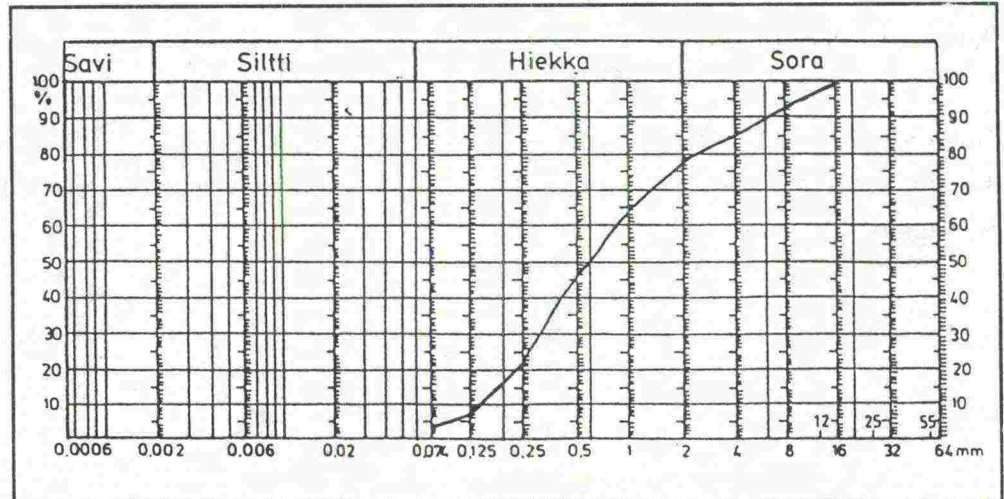
Kipsin kuivatilavuuspaino stabiloiduissa ja tiivistetyissä koekappaleissa oli noin  $12 \text{ kN/m}^3$  (koekappaleet tiivistetty parannetun Proctorkokeen mukaisesti).

### 2.2.2 Biotiitti

Vesipitoisuusmäärityksillä biotiitin vesipitoisuudeksi saatiin:  $w = 9,6\%$ . Tätä arvoa käytettiin hyväksi biotiitin kuivapainoa määritettäessä.

### 2.2.3 Murske

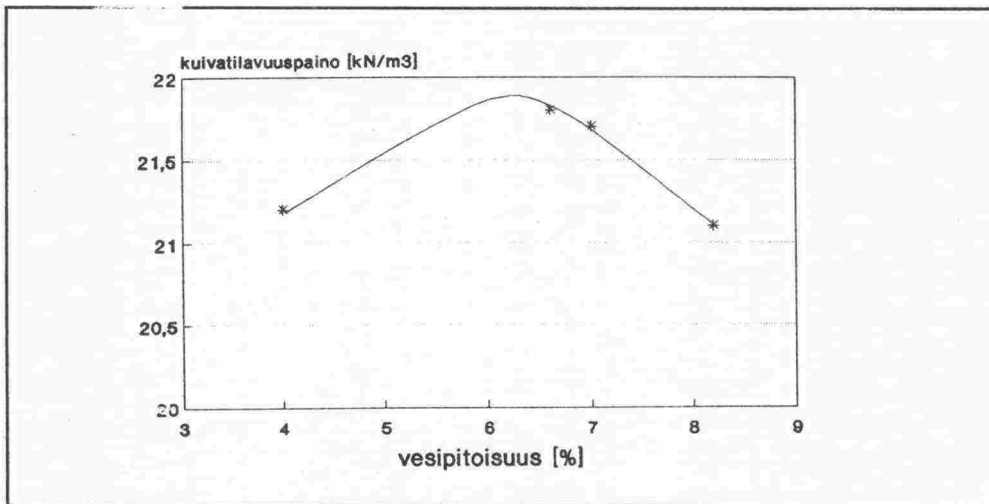
Juuan murskeesta selvitettiin materiaalin rakeisuus kuivaseulonnalla ja optimivesipitoisuus Proctor-sulonnalla. Rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Murskeen rakeisuuskäyrä.

Rakeisuuskäyrä paljastaa, että materiaali on melko hienoa. Tämä johtuu siitä, että murskeeseen, joka on otettu tierakenteesta, on sekoittunut pohjamaata joukkoon ja näin materiaalin hienoainesmäärä on lisääntynyt.

Kuvassa 2 on esitetty murskeen optimivesipitoisuus, joka on  $w_{opt} = 6-6,5\%$ . Määrittäminen on tehty neljällä Proctor-sullonnalla vesipitoisuuden ja kuivatilavuuspainon funktiona.



Kuva 2. Murskeen optimivesipitoisuus.

Murskeen stabilointiselvityksissä murske on kostutettu optimivesipitoisuuteen mahdollisimman hyvän tiivistymisen takaamiseksi.

### 3 LUJUUSTUTKIMUKSET

Lujuustutkimukset jakaantuvat esikoetutkimuksiin ja varsinaisiin lujuustutkimuksiin. Esikoetutkimuksilla oli tarkoitus alustavasti selvittää eri sideaineiden soveltuvuus jätemateriaalien lujittamiseen siten, että niiden pohjalta voitiin valita parhaimmat sideaineet varsinaisiin lujuuskokeisiin. Lujuustutkimuksilla selvitettiin materiaalien lujuuksia, lujuudenkehitystä ajan funktiona sekä kosteuden vaikutusta eri materiaalien lujuustuloksiin.

Materiaalit tiivistettiin näytesylinteriin (Proctorsylinteri: D x H = 102 mm x 100 mm) ja näytteiden annettiin lujittua koestushetkeen asti 90-100% suhteellisessa kosteudessa. Aikalujittumisseurantaa varten valitut materiaalit koestettiin 30 vrk ja 90 vrk lujuuskokein. Kosteustarkasteluja varten valituista materiaaleista osa upotettiin vesialtaaseen 30 vrk pituisen säilytysajan päätteeksi. Näytteet pidettiin vesihauteessa muutama vuorokausi, jonka jälkeen näytteet koestettiin ja materiaalien vesipitoisuudet määritettiin. Vertailunäytteet koestettiin säilytysajan jälkeen normaalisti kuitenkin niin, että myös näiden näytteiden osalta selvitettiin materiaalin vesipitoisuus.

#### 3.1 Esikokeet

##### 3.1.1 Kipsin kovettaminen

Kipsin alustavia kovettamistutkimuksia varten valittiin seuraavat sideaineet:

1. Sementti 10%
2. CaO 10%
3. Masuunikuona+sementti -seos 1:1 10%

4. Masuunikuona+CaO -seos 1:1 10%

5. Sementti+CaO -seos 1:1 10%

Sideainemäärät laskettiin kipsin kuivatilavuuspainon perusteella. Näissä kokeissa käytetty sideainemäärä laskettiin olettaen kipsin vesipitoisuudeksi 48 %. Tämän vuoksi todellinen sideainemäärä kipsikoeleissa oli 9 %.

Edellä mainittujen viiden sideaineen lisäksi selvitetiin Kemira Oy Vuorikemian kehittälemän Finnstabin stabilointikykyä kipsin kovettamiskokeissa. Koekilussa Finnstabi sekoitettiin CaO:n kanssa kahdella eri suhteella (1:1 ja 1:2) ja kahdella eri sideainepitoisuudella (10 % (9 %) ja 15 % (14 %)). Saadut tulokset on esitetty myös liitteessä 1.

Koekappaleet valmistettiin parannetulla Proctor-sullonnalla, missä runkoaineen ja sideaineen seos tiivistettiin näytesylinteriin viitenä kerroksena 25 iskua/kerros. Tämän jälkeen näytteet säilytettiin ilmatiiviisti huoneenlämpötilassa ja vähintään 95% suhteellisessa kosteudessa koestushetkeen asti. Koestukset tehtiin 7 vrk ja 28 vrk puristuskokein.

Koekappaleita tehtiin yhteensä 10 kpl eli 2 kpl/sideainetyyppi. Näistä puolet koestettiin puristuskokein 7 vrk ikäisinä ja loput 28 vrk ikäisinä. Tulokset on esitetty suhteellisina liitteessä 1.

Kuvaajista voidaan todeta, että parhaimmat lujuustulokset 7 vrk kokeissa on saatu sementillä, sementti+CaO -seoksella ja Finnstabi+CaO 15% -seoksella.

28 vrk lujittumisajan jälkeen koestettujen näytteiden lujuustuloksista nähdään, että parhaimmat puristuslujuudet 28 vrk ikäisille näytteille saavutetaan

sementillä ja masuunikuonaseoksilla stabiloitaessa. On kuitenkin huomattava, että Finnstabi+CaO -seoksella stabiloitujen näytteiden lujuustuloksia ei esitutkimusvaiheessa tehty.

### 3.1.2 Biotiitin jalostaminen

Biotiitin jalostusmahdollisuuksia kokeiltiin sekä prosessikipsiin että murskeeseen sekoitettuna eri sideaineilla stabiloituna.

Biotiitti+kipsi -seos valmistettiin sekoittamalla materiaalit keskenään paino-osissa 1:1 (kuivapaino-ja). Saatu seos stabiloitiin seuraavilla sideaineilla:

1. Sementti 10%
2. CaO 10%
3. Masuunikuona+sementti 1:1 10%
4. Masuunikuona+CaO 1:1 10%
5. Sementti+CaO 1:1 10%

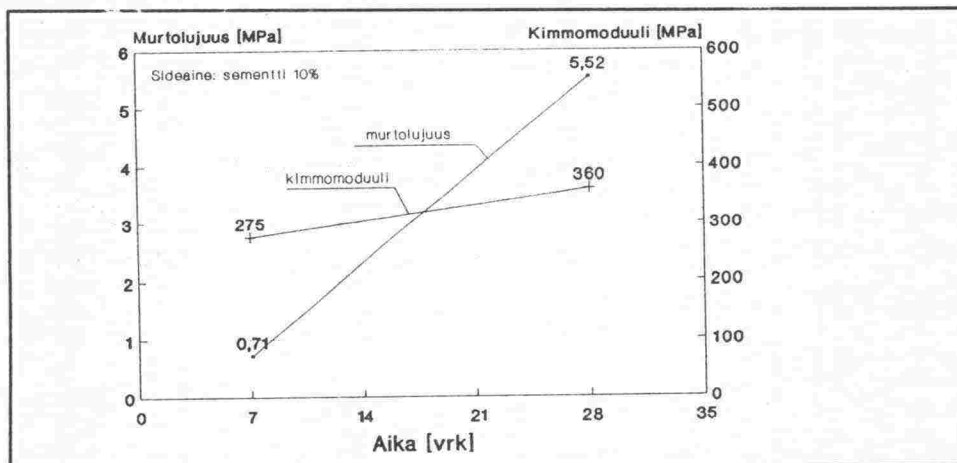
Koekappaleet valmistettiin, säilytettiin ja koestettiin samoin kuin kipsikoekappaleet. Saadut puristuslujuudet on esitetty suhteellisina lujuuksina liitteessä 2.

7 vrk tuloksista voitiin todeta, että biotiitti+kipsi -seos lujittui parhaiten sementillä ja CaO+sementti -seoksella. 7 vrk tulosten perusteella tehtiin sideainevalinnat jatkotutkimuksia varten.

28 vrk puristuslujuustulokset on esitetty myös liitteessä 3. 28 vrk tulosten mukaan sementillä ja masuunikuonaseoksilla on saavutettu parhaimmat lujuudet. Vastaavasti sementti+CaO -seoksella stabiloidun

koekappaleen lujuus on jäänyt samalle tasolle kuin 7 vrk lujuus.

Biotiitti+murske -seos valmistettiin samoin 1:1 -paino-osissa (kuivapainoja). Seoksen stabilointiin käytettiin sementtiä sideainemäärän ollessa 10%. Näytteet koestettiin 7 vrk ja 28 vrk ikäisinä. saadut tulokset on esitetty kuvaajassa 1.



Kuvaaja 1. Biotiitti+murske -seoksen lujuudet.

### 3.1.3 Murskeen stabilointi

Murskeen alustava stabilointi suoritettiin optimivesipitoisuuteen ( $w = 6,5 \%$ ) kostuttamisen jälkeen seuraavilla sideaineilla:

1. Kipsi+sementti 2:1 15%
2. Kipsi+sementti 1:1 10%
3. Kipsi+CaO 1:1 10%
4. Kipsi+CaO 1:1 15%
5. Kipsi+CaO+sementti 1:1:1 15%
6. Kipsi+Finnstabi+CaO 1:1:1 15%
7. Kipsi+masuunikuona+CaO 2:1:1 15%



Sideainemäärät laskettiin murskeen kuivapainon perusteella. Myös kipsiä lisättiin seokseen kipsin kuivapainon mukaan.

Kaikista koekappaleista suoritettiin lujuuskokeet 7 vrk ikäisinä lukuunottamatta kipsi+masuunikuona+CaO-seoksella stabiloituja koekappaleita, joiden lujuuskokeet tehtiin 28 vrk lujittumisajan jälkeen. Saadut tulokset on esitetty suhteellisina lujuuksina liitteessä 3.

Tuloksista voidaan todeta, että 7 vrk lujittumisajan jälkeen paras murtolujuus on saatu kipsi+sementti 1:1 -seoksella.

Masuunikuonaseoksella stabiloitaessa tarvitaan pidempi lujittumisaika kuin esim. sementillä stabiloitaessa. 28 vrk lujuuskokeen mukaan masuunikuonaseoksella stabiloitaessa koekappaleen murtolujuudeksi saatiin noin 20% parempi tulos kuin 7 vrk ikäisellä kipsi+sementti-koekappaleella.

### 3.2 Aikalujittuminen ja kosteuden vaikutus lujuuteen

Lujuustutkimuksia varten tehtiin alustavat sideainevalinnat osin 7 vrk kokeiden perusteella, koska tulosten valmistumisella oli niin kiire, että kaikkia 28 vrk tuloksia ei ehditty odottaa. Joidenkin näytteiden osalta sideainevalintoja täydennettiin 28 vrk tulosten valmistuttua.

#### 3.2.1 Kipsi

Kipsin stabilointia varten valittiin 7 vrk tulosten perusteella seuraavat sideaineet:

1. Sementti+CaO 1:2 10%
2. Sementti+CaO 1:1 10%
3. Finnstabi+CaO 1:1 10%
4. Sementti+CaO 1:2 15%
5. Finnstabi+CaO 1:2 15%

Lisäksi 28 vrk kokeiden jälkeen valittiin yhdeksi sideaineeksi vielä sementti.

#### 6. Sementti 15%

Kolmella ensimmäisellä em. sideaineella stabiloitiin näytteet, joiden koestusajankohdiksi valittiin 30 vrk ja 90 vrk. Lujuustutkimuksilla haluttiin selvittää eri sideaineilla kovetetun kipsin lujuudenkehitys eri ajanhetkinä. Tulokset on esitetty liitteessä 4.

Eri sideaineiden vaikutuksia materiaalin lujuuteen on selvitetty 30 vrk kokeilla kaikilla kuudella em. sideaineella. Saadut tulokset on esitetty liitteen 5 kuvassa 1.

Sideainemäärän vaikutusta materiaalin lujittumiseen selvitettiin kahden eri sideainemäärän avulla (10% ja 15%) kahdella sideaineella (sementti+CaO 1:2-seos ja sementti). Lujuuskokeet tehtiin 30 vrk ikäisille näytteille ja saadut tulokset on esitetty liitteen 5 kuvassa 2.

Sementillä stabiloituja koekappaleita valmistettiin yhteensä kuusi kappaletta, joista osa (2 kpl) puristettiin 7 vrk ikäisinä ja loput (4 kpl) 30 vrk ikäisinä. 30 vrk ikäisten koekappaleiden vesipitoisuutta muutettiin lujuuden ja vesipitoisuuden välisen yhteyden selvittämiseksi. Saadut tulokset on esitetty liitteessä 6.

Näiden lisäksi tehtiin vielä sementillä stabiloitu kipsiseos, missä käytetty sideainemäärä oli 10% (9%). Seoksen annettiin sitoutua löyhänä 30 vrk. Tämän jälkeen seoksesta valmistettiin neljä koekappaleita, jotka koestettiin 7 vrk ja 30 vrk lujittamisen jälkeen. Tällä menettelyllä haluttiin selvittää lujuuseroja kahdella eri tavalla sitoutuneen näytteen (löyhä ja tiivis seos) välillä. Tulokset näiden kahden eri tavalla sitoutuneen, mutta samalla sideaineella stabiloidun näytteen osalta on esitetty liitteessä 7.

Liitteessä 7 on esitetty myös 15% - sideainepitoisuudella stabiloidun sementtinäytteen lujuustulokset, jotta voitaisiin tarkastella sideainemäärän vaikutusta materiaalin lujuuteen.

### 3.2.2 Biotiitti+kipsi -seos

Biotiitti+kipsi -seoksen stabilointia varten valittiin aikalujittumistutkimuksia varten kipsi-seoksen stabilointiin hyvin sopineet sideaineet:

1. Sementti+CaO 1:2 10%
2. Finnstabi+CaO 1:1 10%
3. Finnstabi+CaO 2:1 15%

Lisäksi sideainemäärän ja kosteuden vaikutuksen seuraamiseksi valittiin esikokeiden perusteella seuraavat sideaineet:

4. Masuunikuona+sementti 1:2 15%
5. Masuunikuona+CaO 1:2 15%
6. Sementti 15%

Ajan vaikutusta materiaalin lujuuteen tutkittiin kahtena ajankohtana (30 vrk ja 90 vrk). Saadut tulokset on esitetty liitteessä 8.

Liitteen 9 kuvassa 1 on esitetty lujuustutkimuksiin valittujen kaikkien em. kuuden sideaineen lujuustulokset 30 vrk ikäisten näytteiden osalta. Liitteen 9 kuvassa 2 on vertailua varten esitetty kosteustarkastelua varten valittujen kolmen sideaineen (sideaineet 4, 5 ja 6) 7 vrk tulokset.

Kosteustarkasteluun valittujen sideaineiden koestukset tehtiin 30 vrk ikäisille näytteille vesipitoisuutta vaihdellen. Kokeilla haluttiin selvittää, miten materiaalin lujuus muuttuu, kun kosteus muuttuu. Saadut tulokset on esitetty liitteessä 10.

### 3.2.3 Biotiitti+murske -seos

Biotiitti+kipsi -seoksen lisäksi biotiitin hyötykäyttöä tutkittiin myös murskeeseen sekoitettuna. Biotiittia ja mursketta sekoitettiin keskenään paino-osissa 1:1. Seoksen stabilointiin valittiin esikokeiden lisäksi seuraavat sideaineet:

1. Sementti 10%
2. Sementti 15%
3. Masuunikuona+sementti 1:2 15%

Sideaineiden vaikutuksia biotiitti+murske -seoksen stabilointiin on selvitetty 7 vrk ja 30 vrk lujuuskokein. Lisäksi on tehty 90 vrk lujuuskokeet näytteelle, joka oli stabiloitu sementillä sideainemäärän ollessa 10%. Saadut tulokset on esitetty liitteen 11 kuvassa 1.

Kosteuden vaikutusta materiaalin lujuuteen tarkasteltiin sementillä ja masuunikuona+sementti -seoksella stabiloiduilla näytteillä. Sideainemäärä oli kaikilla näytteillä 15%. Tulokset on esitetty liitteen 11 kuvassa 2.

### 3.2.4 Murske

Esikokeiden perusteella valittiin jatkoselvityksiä varten seuraavat sideaineet:

1. Kipsi+Finnstabi+CaO 1:1:1 15%
2. Kipsi+sementti+CaO 2:1:2 15%
3. Kipsi+sementti+CaO 1:1:1 15%
4. Kipsi+sementti+CaO 2:2:1 15%
5. Kipsi+sementti 1:1 10%
6. Kipsi+sementti 1:1 15%
7. Kipsi+masuunikuona+sementti 2:1:1 15%
8. Sementti 15%

Edellä olevista sideaineista viidellä ensimmäisellä (sideaineseokset: 1, 2, 3, 4, ja 5) haluttiin selvittää stabiloidun murskeen lujuudenkehitys eri ajanhetkinä. Koestusajanhetkiksi valittiin 30 vrk ja 90 vrk. Osa koekappaleista koestettiin lisäksi 7 vrk ikäisinä. Saadut tulokset on esitetty liitteessä 12.

Eri sideaineiden stabilointikykyä on vertailtu 30 vrk ikäisille näytteille tehtyjen lujuuskokeiden avulla. Tulokset näistä on esitetty liitteessä 13. Saatujen tulosten avulla voidaan vertailla mm. seuraavia asioita:

- miten eri sideaineet eroavat toisistaan
- miten seossuhteiden muutokset vaikuttavat lujuuteen
- miten sideainemäärän vaihtelu vaikuttaa lujuuteen
- miten kipsin lisäys sideaineseokseen vaikuttaa lujuuteen

Kosteuden vaikutuksia materiaalin lujuuteen selvitettiin sideaineilla 6 ja 7 sekä vertailua varten sementillä. Koestukset suoritettiin 30 vrk ikäisille näytteille. Tulokset on esitetty liitteen 14 kuvassa

1. Liitteen 14 kuvassa 2 on lisäksi esitetty samoilla sideaineilla stabiloitujen koekappaleiden 7 vrk lujuustulokset.

### 3.3 Lujuustulosten tarkastelu

#### 3.3.1 Kipsi

Ajan vaikutusta stabiloidun materiaalin lujittumiseen tutkittiin kolmella eri sideaineseoksella. Kaikissa materiaaleissa sideainemäärä oli 10%. Tulosten mukaan sementti+CaO -seoksella stabiloitujen koekappaleiden lujuudet olivat lähes täysin kehittyneet 30 vrk lujittumisajan jälkeen. Lujuuden lisäys oli vain muutama prosenttiyksikköä. Finnstabi+CaO -seoksella stabiloitujen näytteiden lujuudet olivat 30 vrk jälkeen kasvaneet noin 15%.

Tulosten mukaan sementti+CaO 1:1 -seoksella saatiin parhaimmat lujuustulokset kaikkina ajanhetkinä. Näyttää kuitenkin siltä, että ajan kuluessa Finnstabi+CaO -seoksella stabiloitujen näytteiden lujuudet nousevat lähelle sementti+CaO -kappaleiden tuloksia.

Lisätarkasteluja sideaineiden ja sideainemäärien paremmuudesta voitiin tehdä 30 vrk tulosten perusteella (liite 5). Lujuustuloksista voitiin todeta, että pelkällä sementillä stabiloitujen näytteiden lujuus jää melko alhaiseksi, vaikka sideainemäärä olisi 15%. Parhaimmaksi sideaineeksi osoittautui Finnstabi+CaO 1:2 -seos, kun käytettiin 15% sideainemäärää. On kuitenkin huomattava, että sementti+CaO 1:1 -seosta, jolla saatiin 10% -sideainevertailussa paras tulos, ei kokeiltu 15% sideainemäärällä.

Sideainepitoisuuden vaikutuksia selviteltiin kahdella sideaineella: sementillä ja sementti+CaO 1:2 -seoksella. Sideainemääräksi oli valittu 10% ja 15%. Tuloksista voidaan todeta, että sideainemäärän lisäys 10 %:sta 15%:iin kaksinkertaistaa materiaalin murtolujuuden arvot.

Materiaalin herkkyyttä kosteusvaikutuksille tutkittiin sementillä stabiloidulla koekappaleella. Tulosten mukaan vesipitoisuuden lisäys 30%:lla alentaa murtolujuuden arvoa 40%.

Sitoutumisen vaikutuksia lujuuteen selvitettiin sementillä käyttäen sideainemääränä 10%. Käytännössä kipsi olisi tarkoitus stabiloida sideaineella ja seoksen annettaisiin sitoutua löyhänä rakennusvaiheeseen asti. Tämän vuoksi haluttiin tutkia, miten sitoutumistapa vaikuttaa kipsin lujuuteen. Tuloksista nähdään, että sideaineen lisäys materiaaliin jo muutamaa viikkoa rakennusvaihetta aikaisemmin saattaa parantaa tiivistetyn rakenteen lujuuksia sen sijaan, että sideaine sekoitettaisiin kipsiin vasta tiivistysvaiheessa.

Yhteenvedona kipsin kovettamisesta voidaan näiden tulosten perusteella sanoa, että sopivimpia sideaineita ovat sementti+CaO 1:1 -seos ja myös Finnstabi+CaO 1:2 -seos.

Selvästi parempiin lujuusarvoihin päästään jos sideainemääräksi valitaan 15% 10% sijaan.

Rakennusvaiheessa on tärkeää, että kipsi ei pääse kastumaan. Liika kosteus rakenteessa heikentää selvästi materiaalin lujuutta.

### 3.3.2 Biotiitti+kipsi -seos

Ajan vaikutusta stabiloidun materiaalin lujittumiseen tutkittiin kolmella eri sideaineseoksella. Kahdessa materiaalissa sideainemäärä oli 10% ja yhdessä 15%. Tulosten mukaan 10% sideainemäärällä stabiloitujen koekappaleiden lujuudet olivat lähes täysin kehittyneet 30 vrk lujittumisajan jälkeen. Lujuuden lisäys oli viidestä seitsemään prosenttiyksikköä (5-7%). 15% sideainemäärällä stabiloitujen näytteiden lujuus oli 30 vrk jälkeen kasvanut vielä noin 40%.

Lisätarkasteluja sideaineiden ja sideainemäärien paremmuudesta voitiin tehdä 30 vrk tulosten perusteella (liite 9). Lujuustuloksista voitiin todeta, että sideainemäärän vaikutus materiaalin lujuuteen on huomattava. Jo 7 vrk lujittumisajan jälkeen olivat 15% sideainemäärällä stabiloitujen näytteiden lujuudet samalla tasolla kuin 30 vrk ikäisten, 10% sideainemäärällä stabiloitujen näytteiden.

Sideaineista parhaimmiksi osoittautuivat sementti ja masuunikuona+sementti -seos. Näillä sideaineilla saavutettiin 30 vrk iässä noin 3000 kPa:n murtolujuuden arvot. Muilla sideaineilla jäätii tason 2000 kPa alle.

Materiaalin herkkyyttä kosteusvaikutuksille tutkittiin kolmella eri sideaineella stabiloidulla koekappaleella. Näytteiden sideainepitoisuus oli kaikkien kohdalla 15%. Tuloksista voidaan todeta, että masuunikuona+CaO -seoksella stabiloidut näytteet olivat erittäin herkkiä vesipitoisuuden muutoksille. Myös sementillä stabiloitujen näytteiden lujuus laski 20% vesipitoisuuden noustessa 1,5-kertaiseksi. Masuunikuona+sementti -seoksella stabiloitujen näyt-



teiden lujuudet pysyivät lähes samoina, vaikka vesipitoisuus nousi 46%.

Tutkimustulosten mukaan parhaiten biotiitti+kipsi -seoksen stabilointiin soveltuu masuunikuona+sementti -seos. Lujuudenkehitys on 7-30 vrk huomattava, sillä lujuus kasvaa tämän ajan kuluessa lähes nelinkertaiseksi. Kosteuden vaikutukset materiaalin lujuuteen ovat hyvin vähäisiä, kun materiaalin vesipitoisuus on alle 20%.

### 3.3.3 Biotiitti+murske -seos

Biotiitti+murske -seoksen lujittumista tutkittiin sementillä ja masuunikuona+sementti -seoksella.

Paras tulos 30 vrk ikäisten koekappaleiden osalta saatiin masuunikuona+sementti -seoksella.

Kosteustarkastelun perusteella voitiin kuitenkin todeta, että masuunikuona+sementti -seoksella stabiloitu näyte on sementillä stabiloitua näytettä selvästi herkempi kosteusvaihteluille. Kun sementillä stabiloidun näytteen lujuus alenee noin 26% vesipitoisuuden noustessa, pienenee masuunikuona+sementti -seoksella stabiloidun näytteen lujuus alle puoleen vastaavilla vesipitoisuuksilla.

Sideainemäärällä on melko vähän vaikutusta materiaalin lujuuteen, sillä lujuuden kasvu on vajaa 30%, kun sideainemäärää nousee 10%:sta 15%:iin.

### 3.3.4 Murske

Murskeen aikalujittumis seuranta varten valituilla sideaineilla saatiin melko yllättäviä tuloksia. Kipsi+sementti -seos oli ainoa sideainetyyppi, jossa

sideainemääränä oli 10%. Muiden sideaineiden osalta käytettiin sideainepitoisuutena 15%. Kipsi+sementti-seoksen osoittautui yhdessä kipsi+sementti+CaO 2:2:1 -seoksen kanssa parhaimmaksi stabilointiaineksi murskeen lujittamisessa. Muiden näytteiden kohdalla lujuudet jäävät 20-50% alhaisemmiksi.

Tarkasteltaessa kipsi+sementti+CaO -seoksilla stabiloitujen koekappaleiden lujuustuloksia voidaan todeta, että sideainesuhteella on huomattava merkitys saavutettavaan lujuustasoon. Tuloksista voidaan edelleen todeta, että kipsin määrällä ei ole suoraa vaikutusta materiaalin lujuuksiin, mutta sementin lisäys nostaa myös näytteen lujuuksia.

Eri sideaineiden vaikutuksia murskeen lujuuksiin selvitettiin 30 vrk koestuksien avulla. Saatujen tulosten mukaan parhaimmat lujuudet saatiin kipsi+sementti -seoksella ja kipsi+masuunikuona+sementti -seoksella. Seoksilla stabiloitujen näytteiden lujuudet olivat noin 30% alhaisemmat vertailumateriaalina käytetyllä sementillä stabiloidun näytteen lujuuteen verrattuna.

Tulosten perusteella (liite 13) voidaan myös todeta, että kipsi+sementti -seoksella stabiloitujen näytteiden lujuudet kasvavat samassa suhteessa sideainemäärän lisäyksen kanssa. Muilla sideaineseoksilla ei vastaavaa vertailua tehty.

Kosteuden vaikutuksia seurattiin kolmella sideaineella. Sideainemäärät olivat kaikkien sideaineiden kohdalla sama 15%. Näytteet säilytettiin neljä päivää vesihauteessa 30 vrk kestäneen lujittumisen jälkeen. Tuloksista voidaan todeta, että sementillä stabiloidun näytteen vedenimukyky oli selvästi alhaisempi kuin kipsiä sisältävillä seoksilla stabi-

loitujen näytteiden. Kipsi+masuunikuona+sementti -seoksella ja kipsi+sementti -seoksella stabiloitujen näytteiden vesipitoisuudet kaksinkertaistuivat vesisäilytyksen aikana. Vaikka vesipitoisuus nousi vain kahdeksaan prosenttiin (8%), laski kipsi+sementti -seoksella stabiloidun lujuus melkein puoleen alkuperäisestä lujuudesta. Kipsi+masuunikuona+sementti -seoksella stabiloidun näytteen lujuus heikkeni noin 25%.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kipsin käyttö sideaineseoksissa antoi lupaavia tuloksia. Erityisesti masuunikuona+sementti -seokseen tai sementtiin sekoitettuna saatiin 30 vrk lujittumisen jälkeen jo 20 MPa:n lujuusarvoja.

## 4 VEDENLÄPÄISEVYYSKOKEET

### 4.1 Koejärjestely

Näytteet valmistettiin näytesylintereihin, joiden koko oli 105 mm x 84,9 mm (korkeus H x sisähalkaisija ja  $\varnothing$ ). Näytteiden ylä- ja alapäähän asennettiin suodatinkankaat, jotta sylinterin ylä- ja alapään levyihin yhdistetyt letkut eivät tukkiutuisi kokeen aikana. Näytteeseen johdettiin letkuja pitkin vettä, jonka painekorkeutena pidettiin koko kokeen ajan 2 m. Näytteen läpi suotautunut vesi laskettiin jokaisen sylinterin alapuolella olleeseen mittalasiin, johon tullut vesi mitattiin tietyin aikaväleihin.

### 4.2 Tutkimuksiin valitut runko- ja sideaineet

Vedenläpäisevyyskokeisiin valittiin yhteensä kahdeksan näytettä, jotka oli valittu lujuustutkimusten perusteella. Näytteet olivat seuraavat:

1. Kipsi	+sementti	
2. Kipsi	+Finnstabi+CaO	1:2
3. Biotiitti+kipsi	+mas.kuona+sementti	1:2
4. Biotiitti+kipsi	+sementti	
5. Biotiitti+murske	+mas.kuona+sementti	1:2
6. Murske	+kipsi+sementti	1:1
7. Murske	+kipsi+mas.kuona+sementti	2:1:1
8. Murske	+kipsi+sementti+CaO	2:2:1

Kaikissa näytteissä käytettiin sideainemääränä 15% laskettuna runkoaineen kuivapainon perusteella.

Kipsi- ja biotiitti+kipsi -näytteiden läpi suotautuneen veden määrä oli niin runsasta, että näillä näytteillä koetta jatkettiin vain seitsemän tuntia. Saadut tulokset on esitetty liitteessä 15.

Muiden näytteiden osalta koetta jatkettiin 5-6 viikkoa, sillä näin voitiin samalla tutkia ajan myötä vedenläpäisevyyksissä tapahtuvia muutoksia. Biotiitti+murske -seoksen osalta saadut tulokset on esitetty liitteessä 16 ja murskeen osalta liitteessä 17.

### 4.3 Tulosten tarkastelu

#### 4.3.1 Kipsi

Kipsinäytteiden vedenläpäisevyys vaihteli hieman sideaineesta riippuen. Sementillä stabiloidun näytteen vedenläpäisevyys oli noin  $2 \times 10^{-6}$  m/s, kun vastaava arvo Finnstabi+CaO 1:2 -seoksella oli  $0,9 \times 10^{-6}$  m/s. Materiaalien tiiveydet olivat noin 90% maksimiirtotiheydestä.

Tuloksista voidaan todeta, että molempien näytteiden kohdalla lasketut vedenläpäisevyyden arvot vastaavat lähinnä silttimoreenin vedenläpäisevyyden arvoja.

#### 4.3.2 Biotiitti+kipsi -seos

Biotiitti+kipsi -näytteiden vedenläpäisevyydet vastasivat kipsinäytteiden kohdalla saatuja tuloksia. Vedenläpäisevyydet olivat masuunikuona+sementti -seoksella stabiloidulla näytteellä  $2,6 \times 10^{-6}$  m/s ja sementillä stabiloidulla näytteellä  $1,5 \times 10^{-6}$  m/s. Biotiitti+kipsi -näytteiden tiiveys oli hieman kipsinäytteiden tiiveyksiä suurempi ollen noin 95%.

#### 4.3.3 Biotiitti+murske -seos

Biotiitti+murske -seoksen vedenläpäisykokeisiin valittiin sideaineeksi masuunikuona+sementti 1:2-seos, jolla oli saatu hyviä tuloksia lujuuskokeissa.

Näytteen läpi 6 viikon aikana suotaunut vesimäärä jäi hyvin alhaiseksi ollen kokeen päättyessä vain 350 ml.

Läpäisykokeessa voitiin havaita selvä muutos 2 viikon koejakson jälkeen. Vedenläpäisevyyskertoimen arvoksi saatiin välillä 0-14 vrk noin  $2,4 \times 10^{-9}$  m/s ja 14 vrk jälkeen läpäisevyys alkoi selvästi laskea ollen 6 viikon kokeen jälkeen noin  $0,2 \times 10^{-9}$  m/s.

#### 4.3.4 Murske

Murskenäytteiden tuloksissa voitiin havaita selviä eroja eri sideaineiden kohdalla. Vähäisintä veden suoto oli kipsi+sementti -seoksella stabiloidun näytteen kohdalla ja suurinta kipsi+sementti+CaO -seoksella stabiloidun näytteen kohdalla. Tulokset on esitetty liitteen 17 kuvaajien lisäksi seuraavassa taulukossa.

Taulukko 1. Näytteen läpi suotautuneen veden määrä ja vedenläpäisevyyskertoimet.

NÄYTE	AIKA vrk	SUOTOVE- SIMÄÄRÄ dm <sup>3</sup>	VEDENLÄ- PÄISEVYYS- KERROIN $\times 10^{-10}$ m/s
Murske+			
kipsi+sementti+ CaO 2:2:1	0-4	4,2	1120
	4-39	4,4	128
kipsi+mas.kuona+ sementti 2:1:1	0-5	2,6	537
	5-39	1,4	47,4
kipsi+sementti 1:1	0-13	1,8	144
	13-39	0,5	28,9

mas.kuona = masuunikuona

## 5 JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOKEET

### 5.1 Tutkimuksen tavoite

Jäätymissulamiskokeilla haluttiin selvittää materiaalin routimista (routanousun suuruus ja näytteen läpötilajakauma) sekä materiaalin käyttäytymistä jäätymis-sulamis -sykliä aikana ja jälkeen.

Näiden kokeiden perusteella voidaan siten tarkastella materiaalin käyttäytymistä luonnon olosuhteissa ja arvioida rakenteessa tapahtuvia muutoksia pakkasten jälkeen.

### 5.2 Koejärjestely

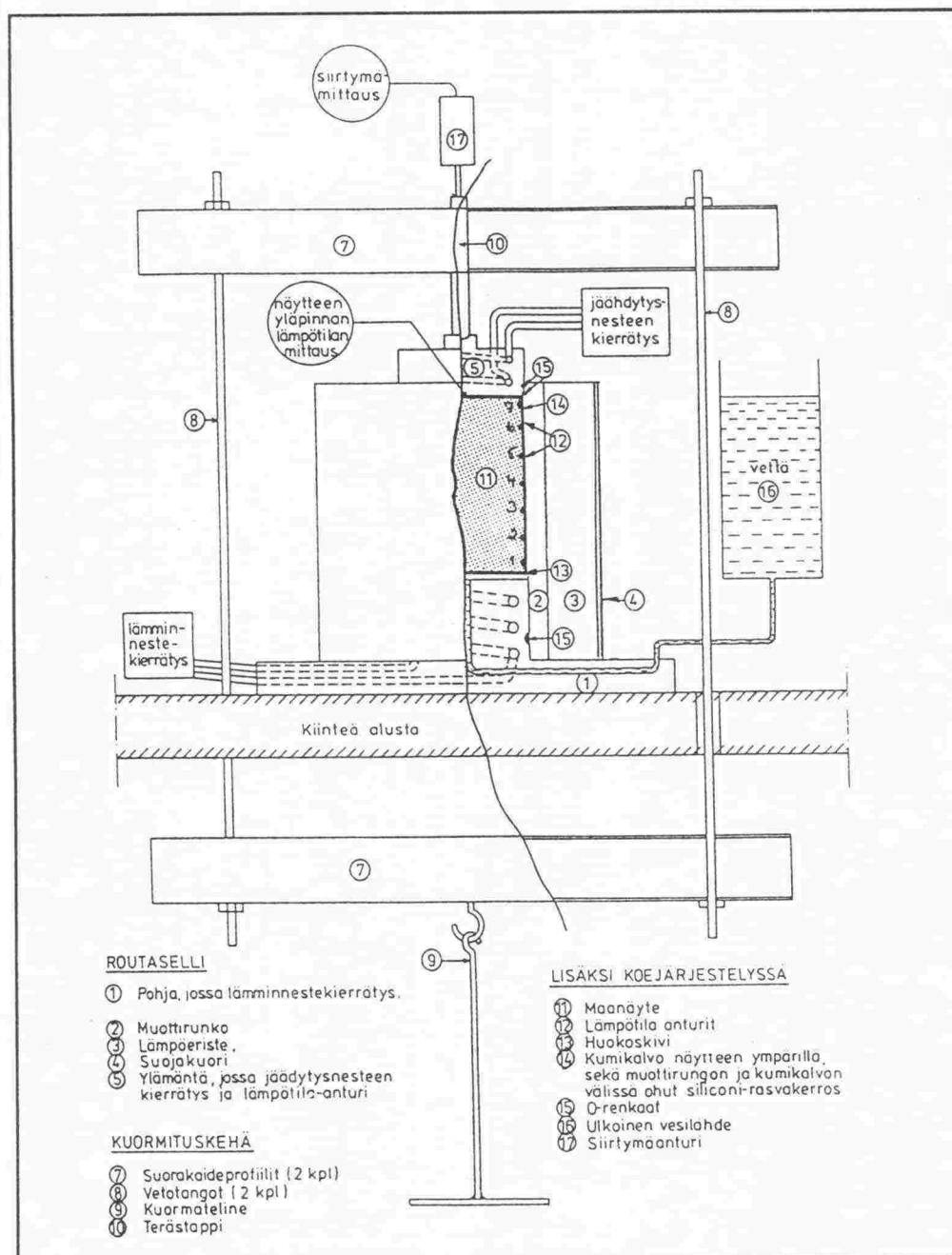
Jäätymis-sulamis -koe tehtiin kolmivaiheisena, missä vaiheet 1 ja 3 käsittivät normaalin routanousukokeen ja vaihe 2 käsitti jäätymis-sulamis -syklit.

Routanousukokeet (vaihe 1 ja 3) tehtiin vakiolämpötilakokeena, missä näyte sullottiin kerroksittain noin 90-95% tiiveyteen. Näytteen halkaisija oli 102 mm ja korkeus näytteestä riippuen noin 100-115 mm.

Koejärjestely oli kuvan 3 mukainen. Kokeen aluksi näytesylinteriin sullotun näytteen lämpötilan annettiin tasaantua +3°C-asteiseksi vuorokauden ajan. Tänä aikana näytettä kuormitettiin noin 20 kPa voimalla. Tasaantumisen jälkeen kuormitus laskettiin tasolle 3 kPa ja aloitettiin vaihe 1.

Kuormitus pidettiin päällä kaikissa kolmessa vaiheessa. Kokeen aikana suoritettiin lämpötila- ja siirtymämittaukset.

Routanousukokeissa näytteen yläpinnan lämpötilana pidettiin  $-3^{\circ}\text{C}$  ja alapinnan lämpötilana  $+1^{\circ}\text{C}$ . Tutkittava näyte oli huokoskiven välityksellä yhteydessä alapuoliseen vesitilaan.



Kuva 3. Routasellin rakenne ja koejärjestely



Kokeen kesto oli noin 3-8 vrk riippuen routanousun tasaantumisesta. Routanousukoe lopetettiin, kun routanousua ei enää tapahtunut.

Vaiheen 1 jälkeen siirryttiin vaiheeseen 2, missä näytteen yläpinnan lämpötila ja alapinnan lämpötila säädettiin vuorokaudeksi lämpötilaan  $-6^{\circ}\text{C}$ , jonka jälkeen näyte sulatettiin. Sama toistettiin toisen kerran.

Vaiheen 2 jälkeen suoritettiin vaihe 3, mikä oli koejärjestelyiltään vaiheen 1 kaltainen.

Kokeiden tulokset on esitetty liitteessä 18.

Liitteessä mainittujen näytteiden mittauspisteiden sijoitus on esitetty kuvassa 3.

### 5.3 Tulokset ja tulosten analysointi

#### 5.3.1 Kipsi

Jäätymis-sulamiskäyttäytymisen tarkastelu suoritettiin sementillä ja Finnstabi+CaO -seoksella stabiloiduilla kipsinäytteillä. Sementillä stabiloidun näytteen tulokset on esitetty liitteen 18 sivuilla 1-2 ja Finnstabi+CaO -seoksella stabiloidun näytteen tulokset sivuilla 3-4.

Tuloksista voidaan todeta, että kipsinäytteiden routanousu jäi hyvin alhaiseksi ollen alle 1% näytteen korkeudesta. Finnstabi+CaO -seoksella stabiloidun näytteen kohdalla oli ongelmia mittauskanavien kanssa, joten jäätymis-sulamis -koetta jouduttiin osin tarkastelemaan sementillä stabiloidun näytteen avulla.

Sementillä stabiloidun kipsinäytteen kohdalla vaiheen 1 routanousuksi saatiin 0,75 mm.

Vaiheen 2 jäätymisvaiheen aikana siirtymä kasvoi vielä 0,5 mm. Sulamisvaiheen aikana routanousu pieneni 0,1 mm.

Vaiheen 3 aikana siirtymä kasvoi 0,3 mm.

Kokeen aikana molemmat materiaalit imivät 184-191 g vettä ja näytteiden purkuvaiheessa voitiin todeta, että materiaalin rakenne oli kokeen aikana löyhtynyt. Tämä johtui näytteen vesipitoisuuden noususta ja sen seurauksena aiheutuneesta lujuuden heikkeneemisestä.

Tulosten mukaan stabiloitu kipsinäyte ei roudi (vaiheen 1 routanousu vajaa 1% näytekorkeudesta), mutta materiaalin joutuessa veden kanssa kosketuksiin aiheuttaa kastuminen kipsin löyhtymisen ja sitä kautta lujuuden heikkenemisen.

### 5.3.2 Biotiitti+kipsi -seos

Biotiitti+kipsi -seoksen jäätymis-sulamiskäyttäytymisen tarkastelu tehtiin masuunikuona+sementti -seoksella ja sementillä stabiloiduilla näytteillä. Sementillä stabiloidun näytteen tulokset on esitetty liitteen 18 sivulla 5-6 ja masuunikuona+sementti -seoksella stabiloidun näytteen tulokset sivuilla 7-8.

Tarkasteltaessa näytteiden routanousua vaiheen 1 aikana voitiin todeta, että siirtymät olivat noin 0,8 mm. Tämä vastasi alle 1% routanousua, kun näytteiden korkeudet olivat 115 ja 118 mm.

Näytteet käyttäytyivät samalla tavoin huolimatta siitä, oliko seos stabiloitu sementillä vai masuunikuona+sementti -seoksella.

Näytteet käyttäytyivät hyvin samalla tavoin kuin kipsinäytteet, sillä myös biotiitti+kipsi -näytteet imivät kokeen aikana keskimäärin 180 g vettä, mikä löyhdytti näytteen rakennetta huomattavasti. Sylinterien purkuvaiheessa näytteet hajosivat levymäiseksi massaksi.

Tuloksista voidaan tehdä samanlaiset johtopäätökset kuin kipsinäytteistä: Materiaali ei juurikaan roudi, mutta materiaalin kostuminen aiheuttaa rakenteen lujuuden heikkenemisen.

### 5.3.3 Biotiitti+murske -seos

Biotiitti+murske -seoksen jäätymis-sulamiskäyttäytymisen tarkastelu tehtiin masuunikuona+sementti -seoksella stabiloidulla näytteellä. Tulokset on esitetty liitteen 18 sivuilla 9-10.

Lämpötilaeroja näytteen ylä- ja alaosan välillä tarkasteltaessa voidaan todeta, että vaiheen 1 ja vaiheen 3 aikana mittapisteiden 1 ja 7 välinen ero säilyi samana ollen noin 2°C astetta. Materiaali näytti siten säilyttäneen tiiveytensä jäätymis-sulamisvaiheen jälkeen.

Vaiheen 1 aikana materiaali ei routinut ollenkaan, mutta jäätymis-sulamisvaiheen jälkeen routanousua tapahtui noin 0,2 mm, mikä on erittäin vähän. Tuloksen mukaan saattaa kuitenkin olla mahdollista, että materiaali alkaa routia vanhetessaan ollessaan alttiina kastumiselle ja jäätymiselle.

#### 5.3.4 Murske

Murskeen jäätymis-sulamiskäyttäytymisen tarkastelu tehtiin kahdella eri sideaineella stabiloiduilla näytteillä. Kipsi+sementti+CaO -seoksella stabiloidun näytteen tulokset liitteen 18 sivulla 11-12 ja kipsi+masuunikuona+sementti -seoksella stabiloidun näytteen tulokset sivuilla 13-14.

Tarkasteltaessa vaiheen 1 siirtymiä voidaan todeta, että routanousu vaihtelee sideaineesta riippuen 4-6 mm välillä. Tämä vastaa keskimäärin 4-6% routanousua rakenteen korkeuteen verrattuna. Näin ollen rakenne on routiva.

Jäätymis-sulamisvaiheen aikana kipsi+masuunikuona+sementti -seoksella stabiloidun näytteen sulamis-painumaksi saatiin 2 mm. Vastaavaa sulamispainumaa ei kipsi+sementti+CaO -seoksella stabiloidulla näytteellä havaittu. Purkuvaiheessa mitatut veden lisäykset näytteessä olivat vastaavasti 104 g (ki+ma+ku+se) ja 151 g (ki+se+CaO). Tuloksista voitiin siten todeta, että kipsi+masuunikuona+sementti -seoksella stabiloitu näyte ei sitonut kokeen aikana yhtä paljon vettä kuin kipsi+sementti+CaO -seoksella stabiloitu näyte, vaan osa vedestä pääsi purkautumaan sulamisvaiheessa näytteestä pois, mistä on osoituksena vaiheen 2 aikana tapahtunut 2 mm sulamispainuma.

Vaiheen 3 aikana routanousu oli kummallakin näytteellä 2 mm (= 2% näytteen korkeudesta).

Murske jää routivaksi rakenteeksi vaikka se stabiloitaisiin edellä kuvatuilla sideaineilla. Routanousun suuruus on sideaineseoksesta riippuen 4-6% kerrospaksuudesta.

## 6 LÄMMÖNJOHTAVUUS

Lämmönjohtavuusmittaukset suoritettiin näytesylintereihin sulletuista näytteistä lämmönjohtavuussondin avulla.

Lämmönjohtavuutta tutkittiin seitsemällä (7) näytteellä, missä sideainemäärä kaikilla näytteillä oli 15%.

Näytteiden ikä tutkimushetkellä oli noin 90 vrk. Näytteiden lujuus tutkimushetkellä oli kasvanut niin suureksi, että näytteiden kohdalla oli vaikeuksia asettaa lämmönjohtavuussondi näytteeseen. Tämän vuoksi näytteeseen jouduttiin poraamaan reikä, johon sondi asennettiin. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Lämmönjohtavuustulokset

Näyte	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]
1	0,544
2	0,541
3	0,549
4	0,475
5	0,401
6	0,725
7	0,806

Näytteet:

- 1 = Kipsi+sementti
- 2 = Kipsi+Finnstabi+CaO 1:2
- 3 = Biotiitti+kipsi-seos+mas.kuona+sementti 1:2
- 4 = Biotiitti+kipsi-seos+sementti
- 5 = Biotiitti+murske-seos+mas.kuona+sementti 1:2
- 6 = Murske+kipsi+sementti 1:1
- 7 = Murske+kipsi+sementti+CaO 2:2:1

Lämmönjohtavuudet mitattiin kolmeen kertaan samasta näytteestä eri kohtaa ja taulukon tulokset ovat näiden mittausten keskiarvoja. Hajonta saman näytteen eri tulosten välillä oli joidenkin näytteiden kohdalla huomattava johtuen todennäköisesti sondin ja mittausreiän väliin joutuneesta ilmasta. Tämän vuoksi näytteistä tehdään tarkistusmittauksia niin, että reiän ja sondin väliin asetetaan väliainetta mahdollisten ilmahuokosten aiheuttamien häiriöiden eliminoimiseksi. Näistä saadut tulokset esitetään jälkeinpäin erillisessä liitteessä (liite 25).

Taulukon 2 tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että näytteiden lämmönjohtavuus on melko suuri. Suurimmat lämmönjohtavuuden arvot saadaan murskenäytteillä, missä  $\lambda = 0,8 \text{ W/mK}$  ja alhaisimmat biotiitti+murske -näytteellä, jonka  $\lambda = 0,4 \text{ W/mK}$ .

## 7 LIUKENEVUUSKOKEET

Liukenevuuskokeisiin valittiin yhteensä kuusi (6) eri näytettä. Tutkittavat materiaalit on esitetty seuraavassa listassa (sideaineseospitoisuus oli kaikilla näytteillä 15%:

1. Kipsi	+Se	
2. Kipsi	+Finnstabi+CaO	1:2
3. Biotiitti+kipsi-seos	+Mas.kuona+Se	1:2
4. Biotiitti+kipsi-seos	+Se	
5. Murske	+kipsi+Se	1:1
6. Murske	+kipsi+Se+CaO	2:2:1

Tutkittavien materiaalien joukosta karsittiin pois biotiitti+murske -seos ja kipsi+masuunikuona+sementti -seoksella stabiloitu murske. Karsinnan perusteena oli mm. se, että biotiitti+kipsi -seoksella, joka oli stabiloitu masuunikuona+sementti -seoksella, saadaan osittain indikoitua näiden kahden karsitun materiaalin liukenevuuksia.

Biotiitti ei Kemira/Siilinjärven laboratorioselvitysten mukaan sisällä raskasmetalleja kuten kipsi, joten biotiitti+murske -seoksen raskasmetallipitoisuudet ovat luonnollisesti biotiitti+kipsi -seoksen liukenevuuksia alhaisempia.

Tutkimuksiin valituista materiaaleista selvitettiin kokonaisfosforipitoisuus (SFS 3025:n mukaisesti) ja fosforin liukenevuus veteen (vesiuutto, uuttosuhte 1:60, SFS 3025:n mukaisesti). Lisäksi näytteistä selvitettiin kuparin, sinkin ja mangaanin liukenevuudet sekä vesiuutolla että happouutolla. Vesiuutolla saadut liukenevuudet kuvastavat materiaalin välittömiä liukoisuuksia veteen. Happouutolla saadaan selvitettyä, kuinka suuri määrä materiaalista

maksimissaan voi liueta alkuainetta, jos materiaalin pH laskee huomattavasti. Happouuttolla saadaan melko tarkkaan arvioitua kyseisen alkuaineen kokonaismäärä näytteessä.

Saadut tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Fosforin, kuparin, mangaanin ja sinkin välittömät liukoisuudet veteen. Lisäksi materiaalista maksimissaan liukenevien aineiden määrä ( $\approx$ kokonaismäärä).

	Välittömät liukoisuudet [mg/kg]				Maksimaaliset liukoisuudet ( $\approx$ kokonaispitoisuudet) [mg/kg]			
	P	Cu	Mn	Zn	P	Cu	Mn	Zn
1	0.60	0.12	0.01	0.33	970	14	60	31
2	1.8	0.69	0.11	3.69	1023	10	36	32
3	0.90	0.18	0.04	0.75	1250	13	366	40
4	0.84	0.42	0.05	0.57	2150	15	266	49
5	<0.3	0.69	0.05	0.69	163	18	133	40
6	<0.3	0.60	0.04	0.33	300	17	129	37

Näytteet:

- 1 = Kipsi+Se
- 2 = Kipsi+Finnstabi+CaO 1:2
- 3 = Biotiitti+kipsi-seos+Mas.kuona+Se 1:2
- 4 = Biotiitti+kipsi-seos+Se
- 5 = Murske+kipsi+Se 1:1
- 6 = Murske+kipsi+Se+CaO 2:2:1

Tuloksista nähdään, että materiaalin fosforimäärä oli suurinta biotiitti+kipsi -näytteissä, johtuen biotiitin fosfaateista, joita on noin 1-2 % biotiitin kokonaismäärästä.

Välittömät liukenevuudet sen sijaan jäivät fosforin osalta hyvin alhaisiksi ollen suurimmillaan kipsi+



Finnstabi+CaO -näytteessä, missä välitön liukoisuus oli 1.8 mg/kg. Myös sinkin kohdalla Finnstabilla stabiloidun kipsinäytteen välittömät liukenevuudet olivat selvästi muiden näytteiden liukenevuuksia suuremmat.

Maksimaalisia liukenevuuksia tarkasteltaessa voitiin havaita, että sinkin ja kuparin liukenevuudet olivat kaikkien näytteiden kohdalla samansuuruisia. Kuparin liukenevuus vaihteli välillä 10-18 mg/kg ja sinkin välillä 31-49 mg/kg.

Mangaanin maksimiliukenevuudet vaihtelivat suuresti näytteestä riippuen. Mitä enemmän näytteessä on biotiittia sitä enemmän näytteestä myös voi liueta mangaania (biotiitti nostaa materiaalin mangaanipitoisuutta).

Liukenevuusanalyysit tehtiin jauhetusta näytteestä. Jos materiaali on tiivistetty eikä pääse veden kanssa kosketuksiin (vrt. vedenläpäisevyytulokset), ovat liukenevuudet luonnollisesti näitä arvoja alhaisemmat.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa on pyritty mahdollisimman monipuolisesti selvittämään prosessikipsin ja biotiitin käyttömahdollisuuksia tien kerrosrakenteena. Tutkimus on tuonut esille useita erilaisia mahdollisuuksia, joita tämän tutkimuksen rajallisuuden vuoksi ei ole voitu kehittää pidemmälle, mutta joiden jatkokehittäminen olisi mielekäästä. Tämän tutkimuksen pohjalta on soratieprojektin koerakennuskohteisiin kuitenkin valittu 3 erilaista prosessikipsi- ja biotiittisovellusta, jotka ovat:

1. Prosessikipsi+sementti (1:1 10%)-stabilointi
2. Biotiitti+prosessikipsin (1:1) stabilointi masuunikuona+sementti (1:2 12%) -seoksella
3. Biotiitti+murskeen (1:1) stabilointi masuunikuona+sementti (1:2 12%) -seoksella

Tutkimuksen johtopäätöksenä voidaan todeta:

### 1. Prosessikipsi sideaineena

-prosessikipsi soveltuu hyvin Juuan koekohteen tyyppisen materiaalin stabilointiaineeksi kun sen kanssa käytetään sopivaa sideainetta

-prosessikipsin kanssa tulisi käyttää masuunikuona+sementti -seosta tai sementtiä. Jo 10% kokonais-sideainemäärällä saavutetaan riittävän hyvä lujuus

-masuunikuona+sementti -seos on prosessikipsin kanssa pelkkää sementtiä lupaavampi, koska se säilyttää eri kosteudessa lujuuden paremmin, minkä lisäksi sen pitkäaikaislujuuskehitys on parempi

-vaikka prosessikipsillä stabiloitu murske osoittautui lievästi routivaksi, se tuskin muodostuu käytännössä ongelmaksi

-sementti+kalkki -lisäaineella saatiin lujittuminen myös onnistumaan, mutta lujuudet olivat alhaisempia, lujittuminen vaati enemmän aikaa sekä lisäksi materiaali imi vettä enemmän

-masuunisementtiä ja sementtiä käytettäessä materiaalista tulee suhteellisen tiivis ( $k = 10^{-8} \dots 10^{-9}$  m/s). Lämmönjohtavuusarvot ovat lähellä luonnonmateriaalin arvoja ( $\lambda = 0,7 \dots 0,8$  W/mK).

Jatkotutkimus olisi mielekäästä keskittää prosessikipsi+masuunikuona+sementti -sideaineen kehittämiseen.

Sideainesovelluksiin löytyisi aivan uusia mahdollisuuksia mikäli dihydraattimuodossa oleva kipsi muutettaisiin vaikka osittain hemihydraattimuotoon.

## 2. Prosessikipsin lujittaminen

-prosessikipsiä voidaan lujittaa useilla eri sideaineilla, esim. Finnstabi+CaO, Se+CaO, Maku+Se ja Maku+CaO -seoksilla

-kipsin lujittaminen vaatii sideainetta suhteellisen paljon. Merkittävä lujuuden kasvu saadaan, kun sideainepitoisuus nostetaan 10%:sta 15%:iin

-lujitettu kipsi imee helposti vettä samalla, kun lujuus putoaa merkittävästi. Esim. sementillä stabiloidun kipsin vesipitoisuuden kasvu 23%:sta 30%:iin alentaa lujuutta 43%

-routakokeissa sementillä stabiloitu kipsi osoittautui lähes routimattomaksi (routanousu < 1%)

-sementillä stabiloitu kipsi osoittautui usean jää-  
tymis-sulamiskerran jälkeen murenevaksi ja menettä-  
vän oleellisesti lujuuttaan

-lujitetun kipsin lämmönjohtavuus ( $\lambda = 0,54 \text{ W/mK}$ ) on  
selvästi esim. murskeen lämmönjohtavuutta pienempi.  
Materiaalin vedenläpäisevyysarvot ovat silttimoree-  
nin luokkaa ( $k = 10^{-6} \text{ m/s}$ )

Lujitetun kipsin käyttö Suomessa on ongelmallista,  
koska materiaali ei tahdo kestää erilaisissa kos-  
teusolosuhteissa tapahtuvia jäätyksiä ja sulamisia.  
Tähän ongelmaan samoin kuin lujuustason nostamiseen  
voi löytyä ratkaisu tutkimalla pitkällä aikavälillä  
tapahtuvan lujittumisen tuomia etuja hitaasti rea-  
goivilla sideaineilla (Finnstabi, masuunikuona).  
Toinen mahdollisuus olisi dihydraattimuotoisen kip-  
sin muuttaminen osittain hemihydraattimuotoon.

### 3. Biotiitti+prosessikipsi 1:1

-biotiitin ja prosessikipsin seos on lujitettavissa  
eri sideaineyhdistelmillä, joista parhaimmiksi  
osoittautuivat sementti sekä masuunikuona+sementti -  
seos. 30 vrk puristuslujuus näillä sideaineilla oli  
 $\geq 3000 \text{ kPa}$  (sideainemäärä: 15%)

-kosteuden vaikutus lujuuteen on ratkaisevasti eri-  
lainen riippuen siitä, mitä sideainetta käytetään.  
Kun sideaineena on Maku+CaO -seos, imee näyte run-  
saasti vettä (12% - 33%) samalla kun lujuuden pie-  
neneminen on noin 80%. Sementillä lujuus putoaa  
hieman eli noin 20%, mutta Maku+Se -seoksella stabi-  
loitu näyte säilyttää lujuutensa likipitään samana

-sementillä tai Maku+Se -seoksella stabiloitu bio-  
tiitti+prosessikipsi 1:1 -seos ei juurikaan roudi  
(routanousu  $< 1\%$ ). Useaan kertaan tapahtuva jääty-

minen ja sulaminen voi löyhdyttää rakennetta mikäli vettä on runsaasti saatavissa

-stabiloidun biotiitti+prosessikipsi 1:1 -seoksen lämmönjohtavuudet ovat kipsin luokkaa tai hieman pinemmät ( $\lambda = 0,48 \dots 0,55 \text{ W/mK}$ ). Vedenläpäisevyydet ovat myös kipsin luokkaa ( $k \sim 10^{-6} \text{ m/s}$ )

Biotiitti+prosessikipsi 1:1 -seoksesta on kehitettävissä tien rakennekerroksiin soveltuva materiaali kun sideaineena käytetään masuunikuona+sementti -seosta, joka parhaan lujuuden lisäksi säilyttää lujuuden myös kosteana. Suurin riski näyttäisi olevan useat jäätymis-sulamis -syklit, joiden vaikutukset nähdään paremmin koerakennetutkimuksessa. Jatko-tutkimuksessa tulisi selvittää Maku+Se -seoksen optimaaliset seossuhteet, sideainemäärä ja aikalujittuminen. Näiden tutkimusten perusteella pystyisi myös arvioimaan seoksen käytön taloudelliset mahdollisuudet.

#### 4. Biotiitti+murske (1:1)

-biotiitti+murske 1:1 -seos on varsin hyvin lujitettavissa eri sideaineilla. Hyvin toimiviksi sideaineiksi osoittautuivat sementti ja masuunikuona+sementti -seos. Käytettäessä 15% sideainemäärää puristuslujuus on 7 vrk kohdalla  $> 5 \text{ MPa}$  kasvaen siitä masuunikuona+sementti -seoksella stabiloidun näytteen kohdalla aina 30 vrk kohdalla tasolle  $> 9 \text{ MPa}$ . Aikalujittumisessa näkyy masuunikuonan aikaansaama parempi lujuudenkehitys ajan mukana, mikä jatkuu melko pitkään myös 30 vrk jälkeen

-kosteuden vaikutus stabiloitujen kappaleiden lujuuteen oli erilainen kuin biotiitti+kipsi -seoksessa. Sementtistabiloinnissa lujuus putosi vähemmän kuin Maku+Se -seoksella. Vedellä kyllästettynä puristus-

lujuuden erot 30 vrk ikäisillä materiaaleilla eivät olleet kuitenkaan ratkaisevan suuria (sementillä 5,4 MPa ja Maku+Se -seoksella 4,4 MPa). Koska Maku+Se -seoksen aikalujittuminen on parempi, voi 90 vrk tilanne olla päinvastainen

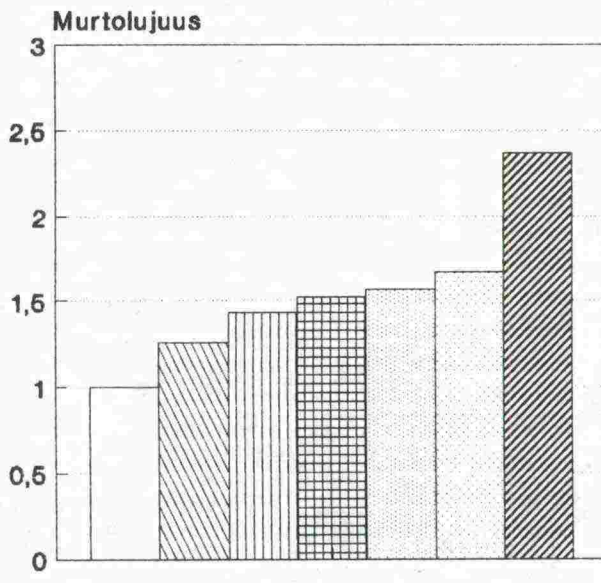
-lämmönjohtavuusmittauksissa Maku+Se -seoksella stabiloidun biotiitti+murske -seoksen lämmönjohtavuus oli tutkittavista materiaaleista alhaisin ollen luokkaa  $\lambda = 0,40$  W/mK. Seoksen vedenläpäisevyys osoittautui myös varsin pieneksi ( $k = 10^{-9}$  m/s)

-masuunikuona+sementti -seoksella stabiloitu biotiitti+murske 1:1 -seos osoittautui lähes routimattomaksi (routanousu  $> 0,2\%$ ). Useampi jäätymis-sulamiskerta ei näyttänyt vaikuttavan havaittavasti materiaalin lujuuteen

Biotiitin ja murskeen sekoittaminen vaikuttaa erittäin mielekkäältä. Hyviksi sideainevaihtoehdoiksi osoittautuivat sekä sementti että masuunikuona+sementti -seos, joista jälkimmäistä voitaneen pitää hyvän pitkäaikaislujuuskehityksen vuoksi parempana. Riskejä lujuuden ratkaisevaan pienenemiseen kosteuden tai jäätymis-sulamisen seurauksena ei näyttäisi olevan.

Tutkimuksessa käytetyillä sideainemäärillä saadaan suuria lujuuksia. Jatkotutkimuksessa tulisi optimoida sideainemäärä, seossuhteet ja aikalujittuminen.

## ESITUTKIMUKSET 7 vrk



Lähtötasoksi on valittu arvo 1, joka vastaa Maku+Se -seoksen 7 vrk tulosta. Muiden näytteiden tuloksia on verrattu tähän arvoon.

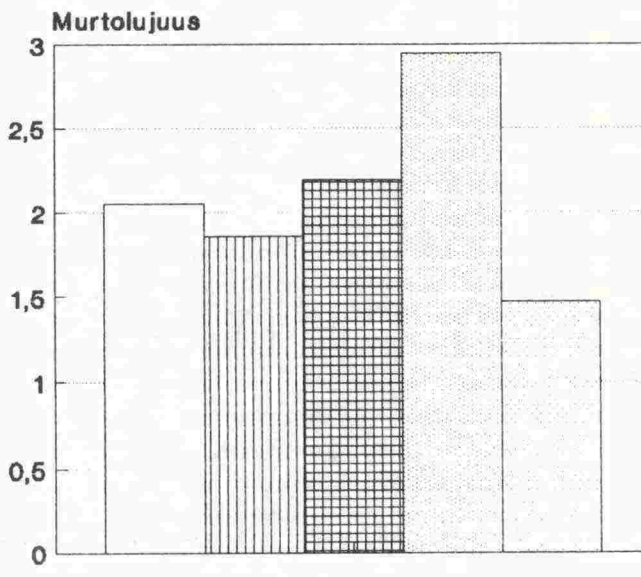
### sideaine

- Maku+Se 1:1 10%
- Finnstab+CaO 1:1 10%
- CaO 10%
- Maku+CaO 1:1 10%
- Se 10%
- Se+CaO 1:1 10%
- Finnstab+CaO 1:2 15%

Maku-masuunikuona  
Finnstab-Finnstabi  
CaO-poltettu kalkki  
Se-sementti

Kipsi

## 28 vrk



Lähtötasoksi on valittu arvo 1, joka vastaa Maku+Se -seoksen 7 vrk tulosta. Näiden näytteiden tuloksia on verrattu tähän arvoon. Verrattaessa 28 vrk tuloksia 7 vrk tuloksiin havaitaan, että masuunikuonaa käytettäessä materiaalin lujuudenkehitys on hitaampaa kuin muita sideaineita käytettäessä.

### sideaine

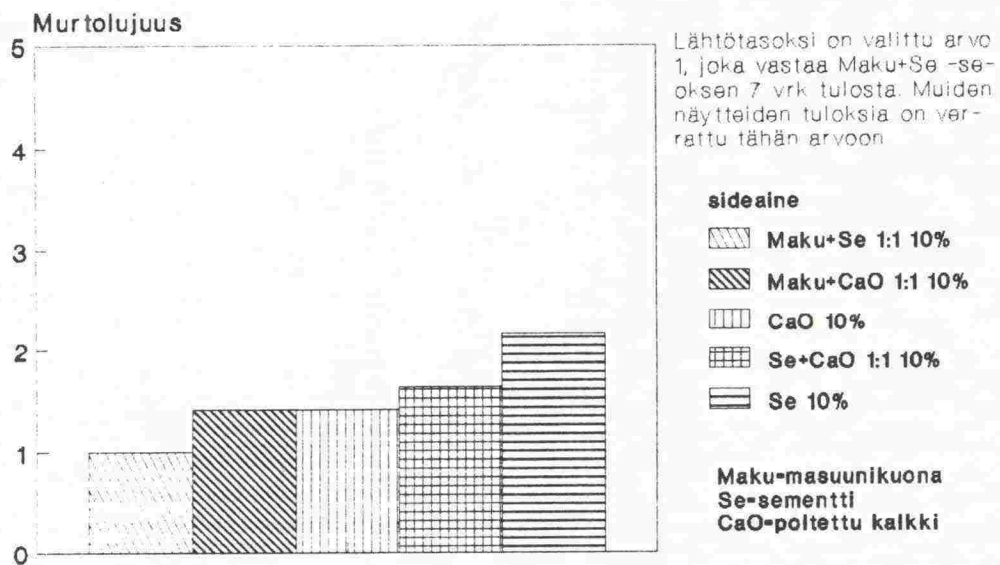
- Maku+Se 1:1 10%
- CaO 10%
- Maku+CaO 1:1 10%
- Se 10%
- Se+CaO 1:1 10%

Maku-masuunikuona  
CaO-poltettu kalkki  
Se-sementti

Kipsi

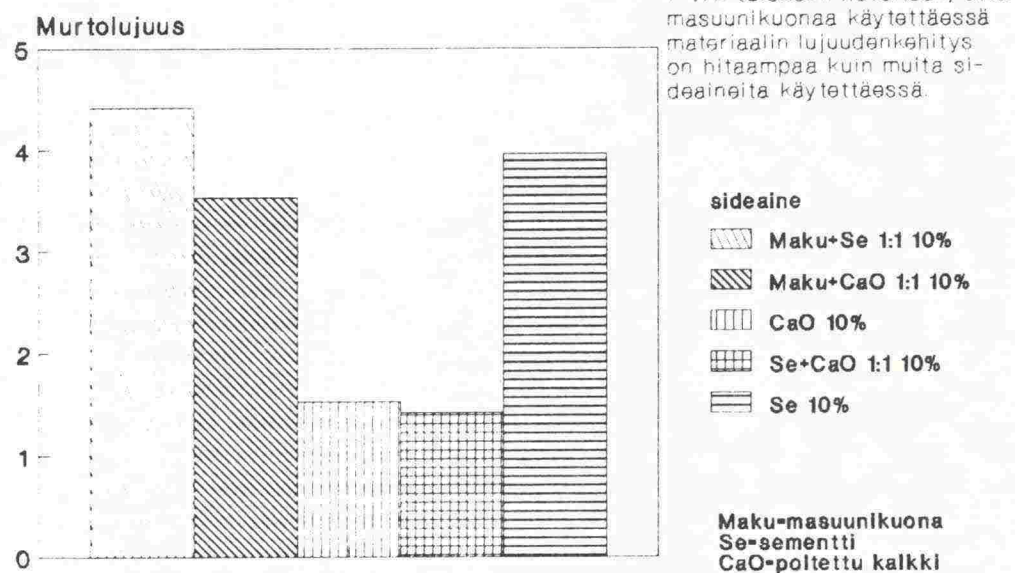
# ESITUTKIMUKSET

## 7 vrk



Biotiitti+kipsi -seos

## 28 vrk

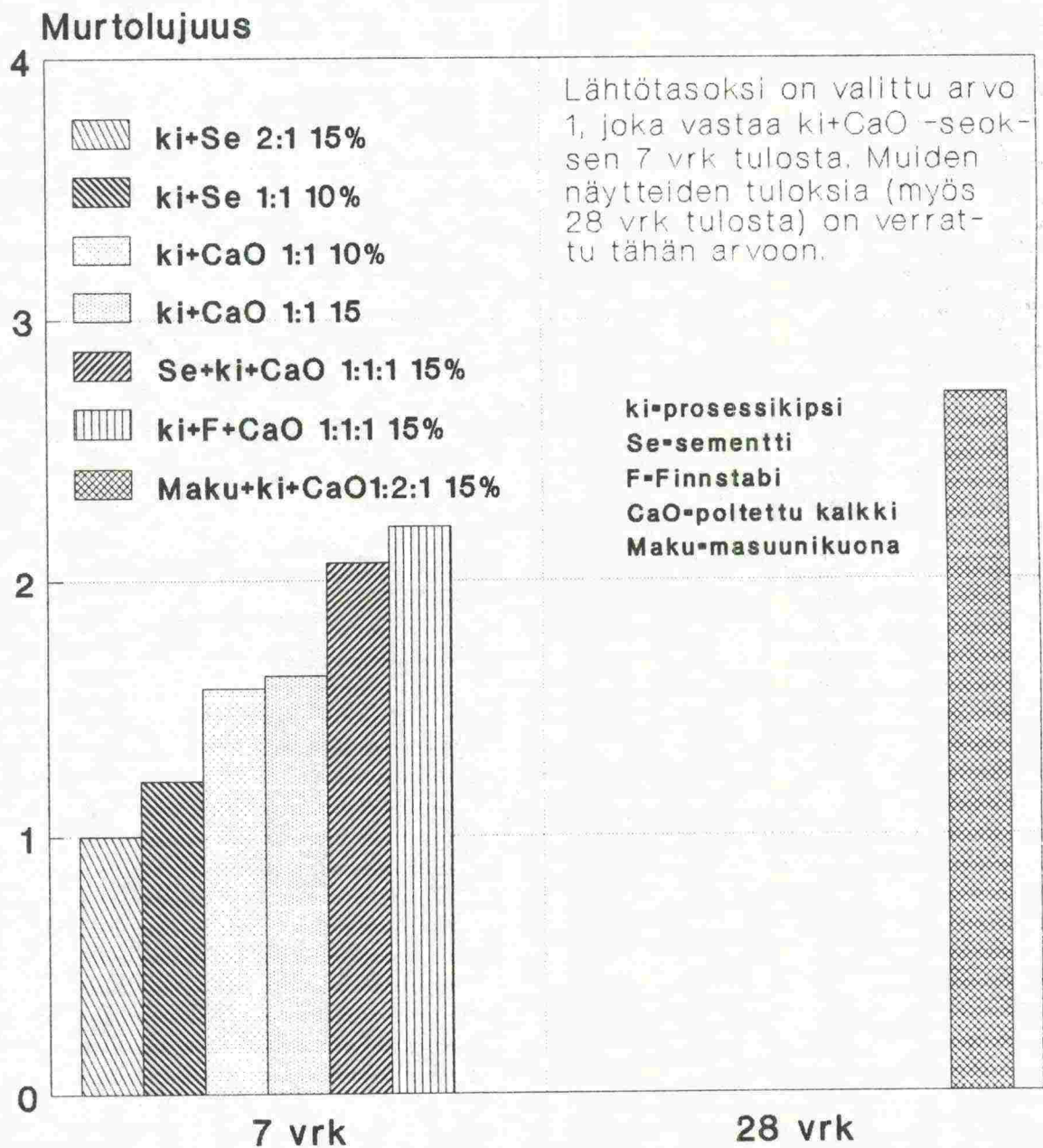


Biotiitti+kipsi -seos



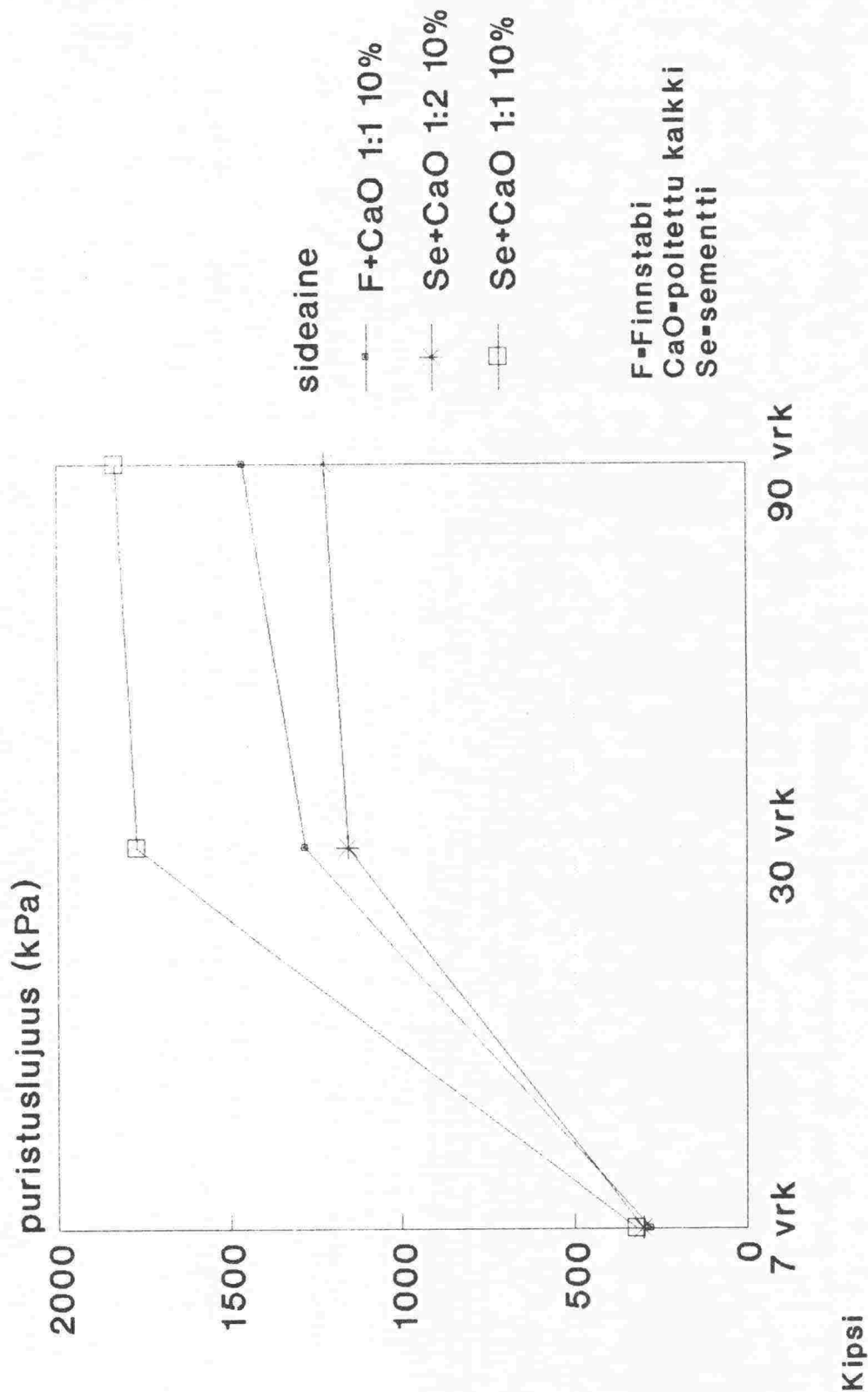
# ESITUTKIMUKSET

## 7 vrk ja 28 vrk



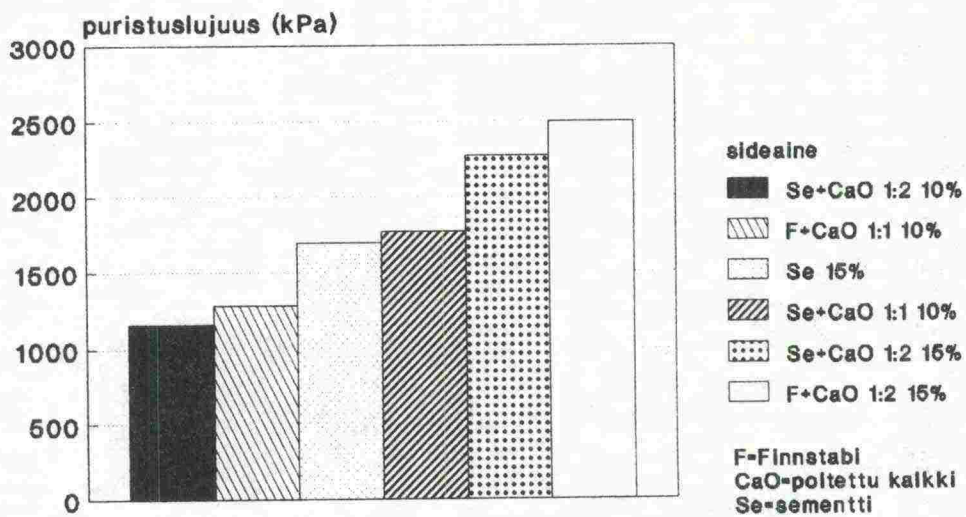
# LUJUUSKOKEET

## Aikalujittuminen



# LUJUUSKOKEET

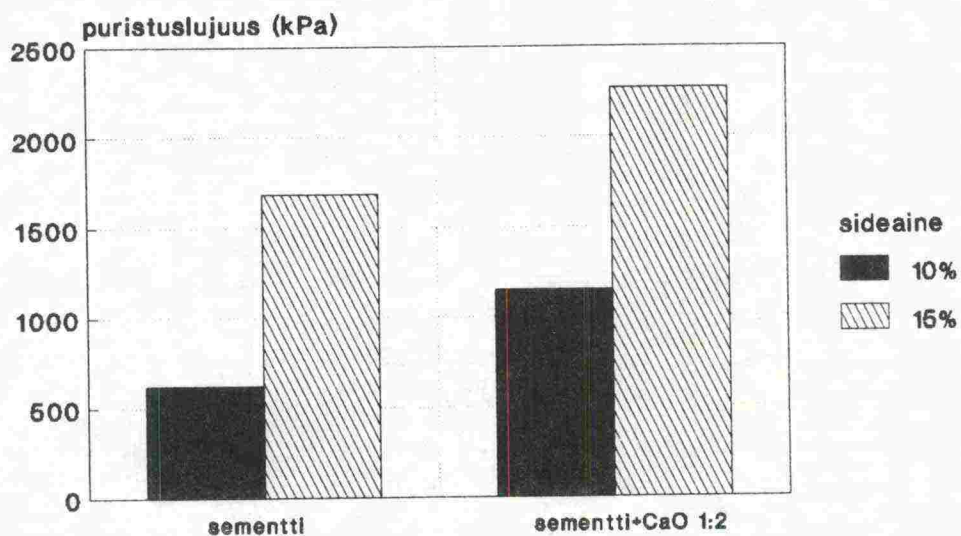
## Sideaineen vaikutus lujuteen 30 vrk



Kipsi

Kuva 1.

## Sideainemäärän vaikutus lujuteen 30 vrk

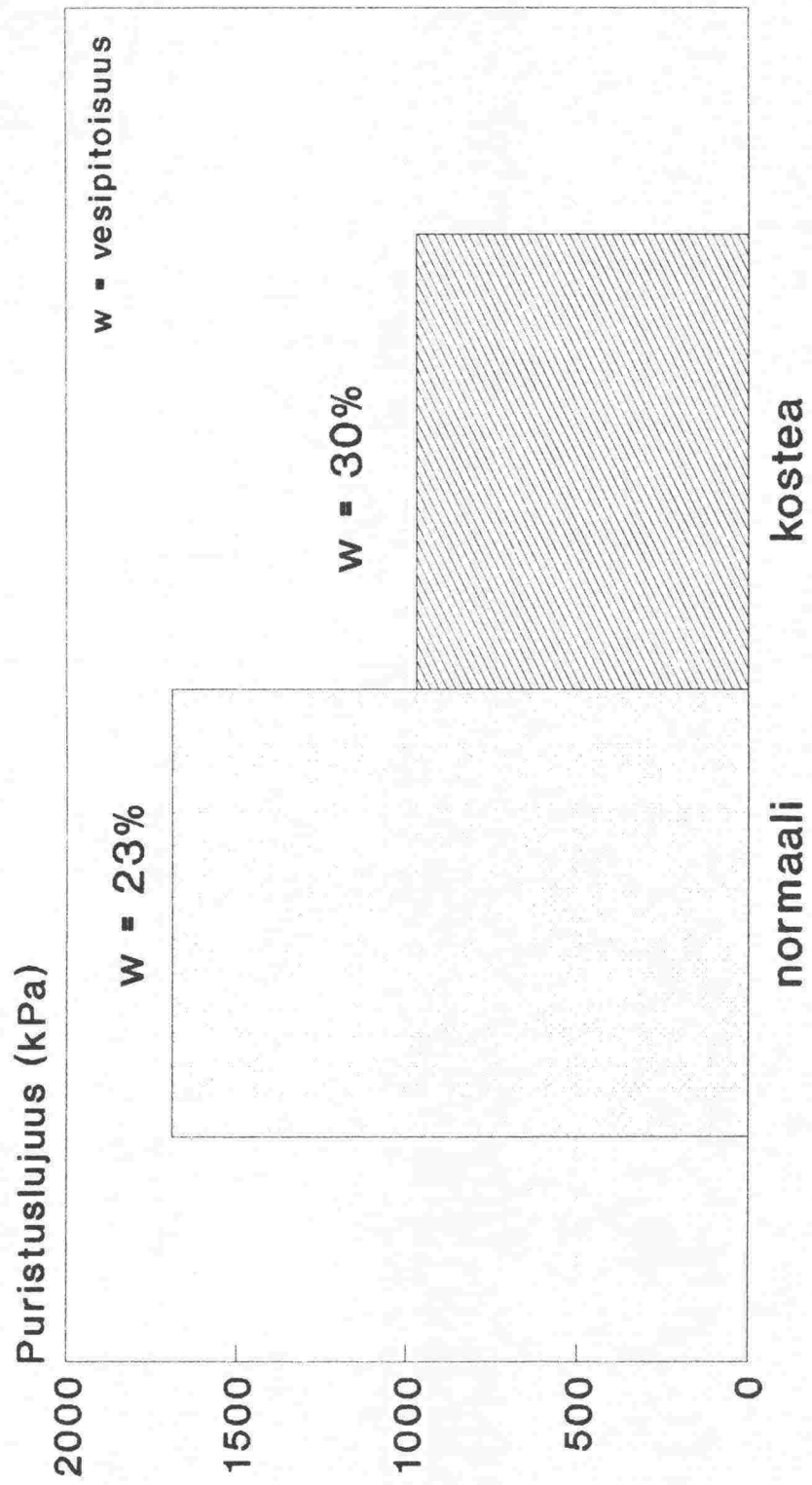


Kipsi

Kuva 2.

# LUJUUSKOEET

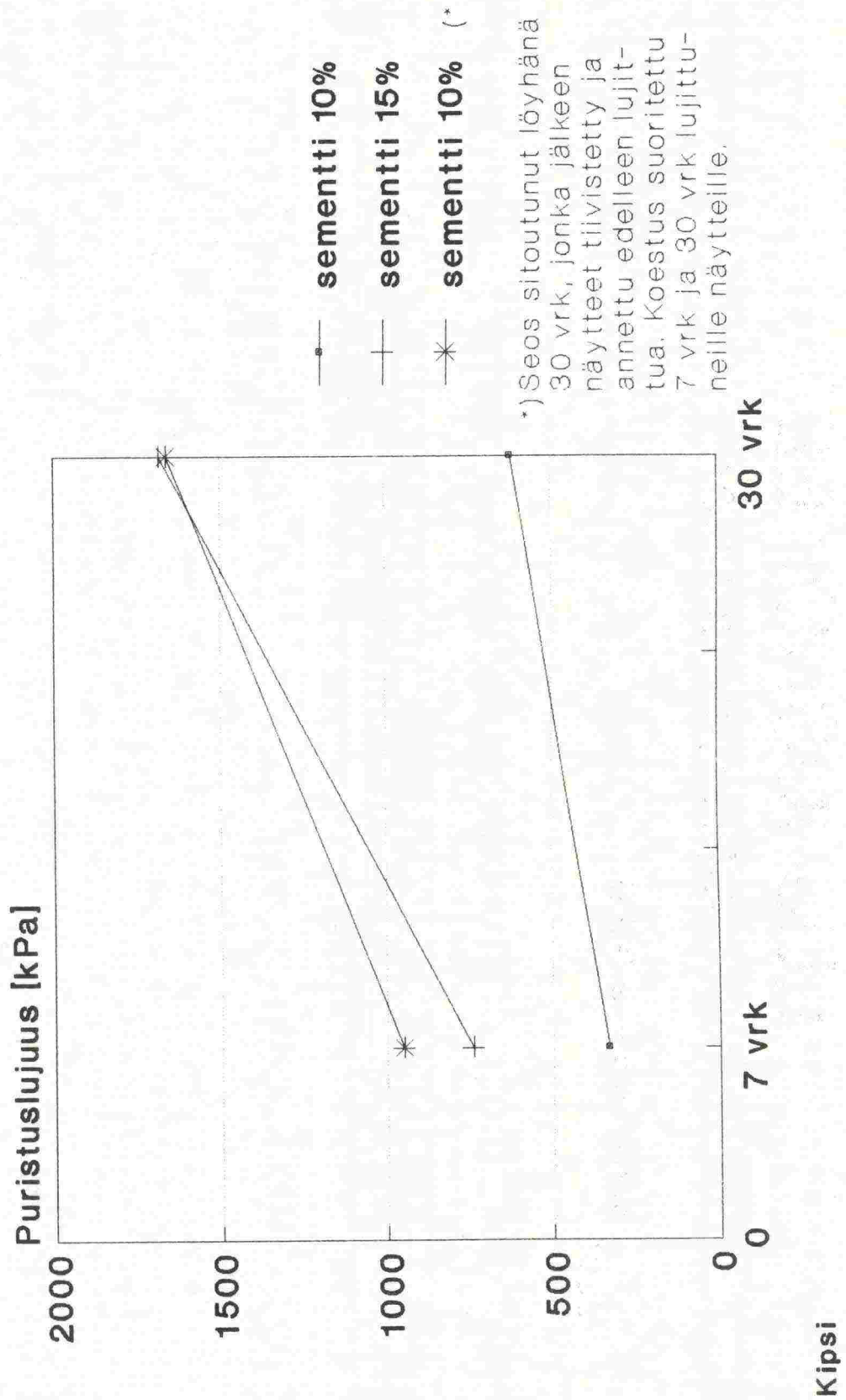
## Kosteuden vaikutus lujuuteen 30 vrk



Kipsi+sementti 15%

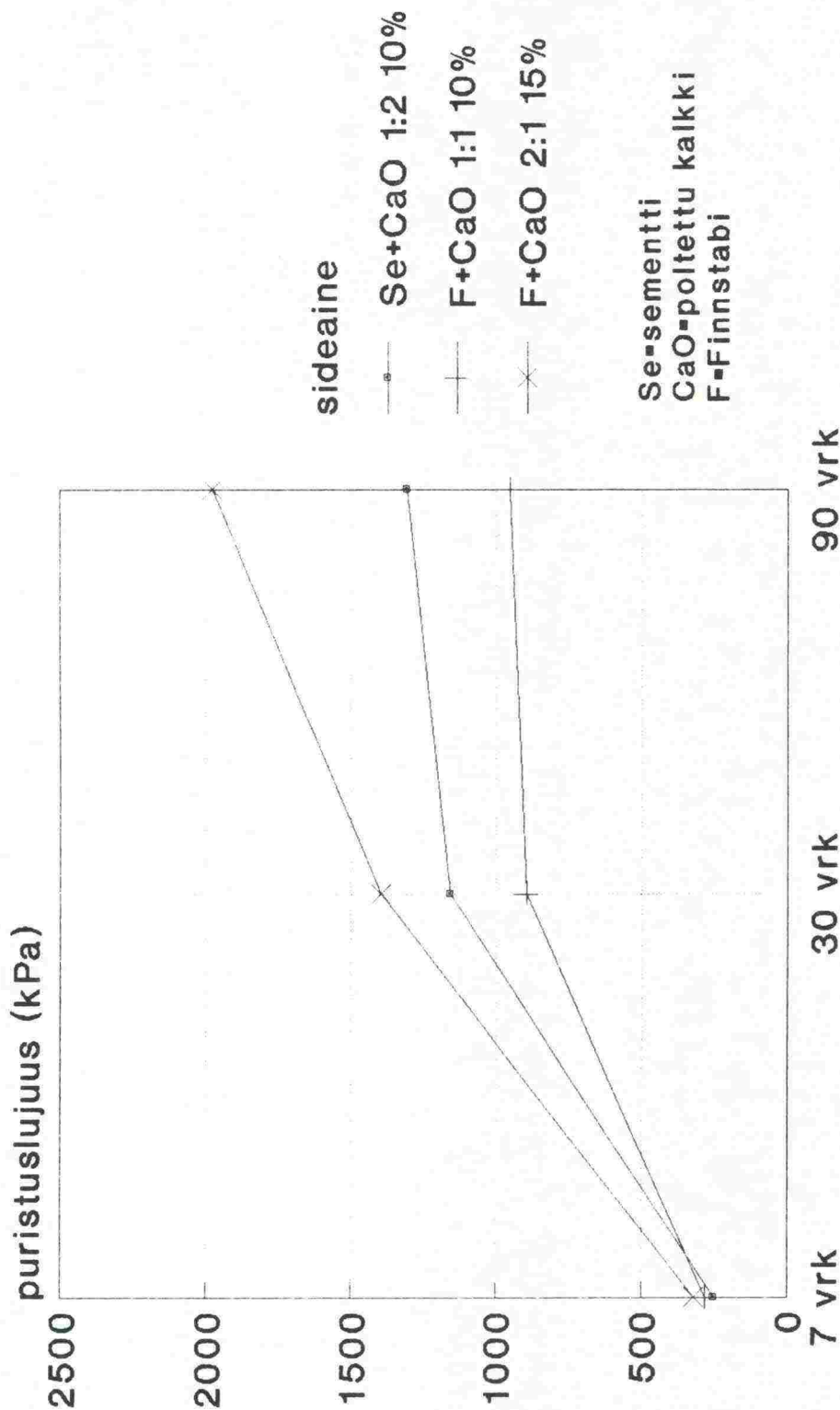
# LUJUUSKOEET

## Sitoutumisen vaikutus lujuuteen



# LUJUUSKOEET

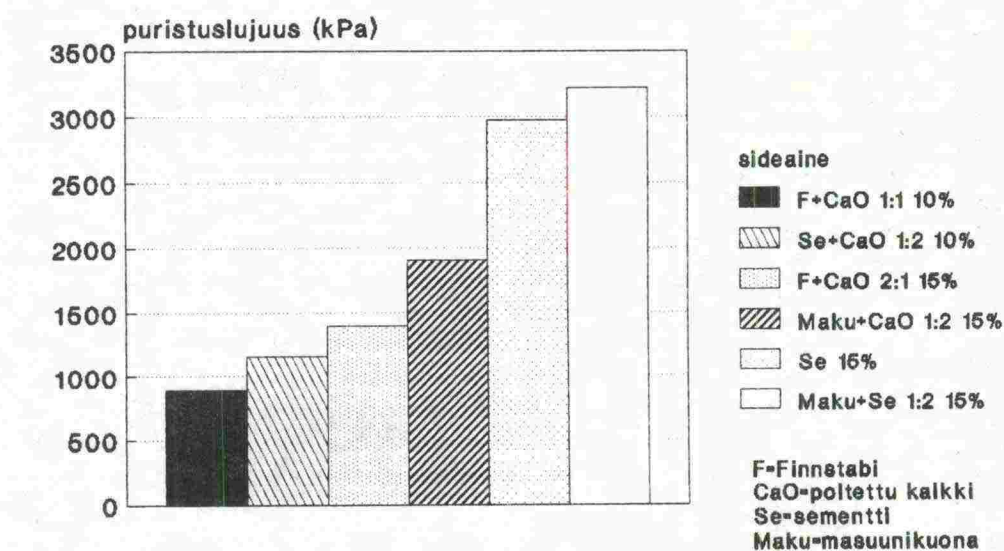
## Aikalujittuminen



Biotiitti+kipsi -seos

# LUJUUSKOKEET

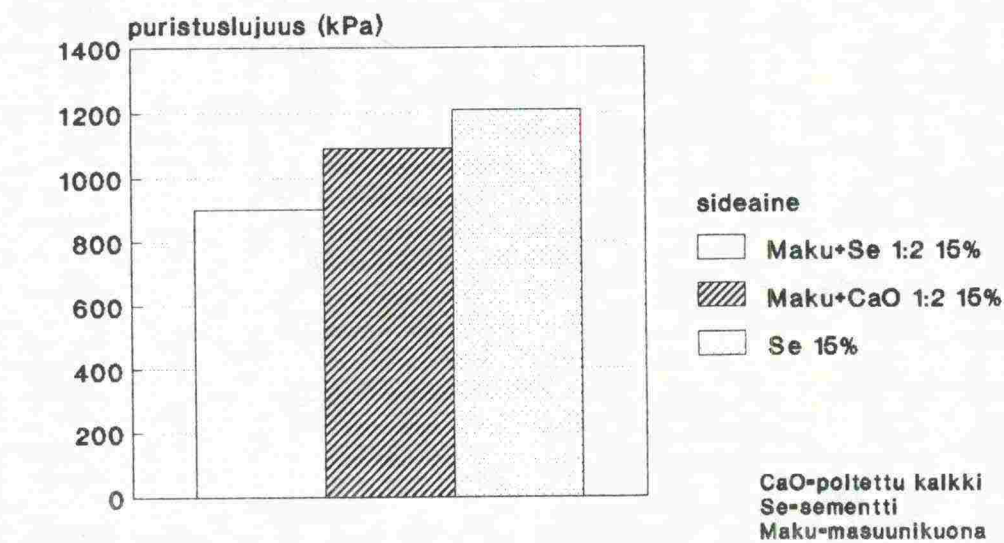
## Sideaineen vaikutus lujuteen 30 vrk



Biotiitti+kipsi -seos

Kuva 1.

## 7 vrk

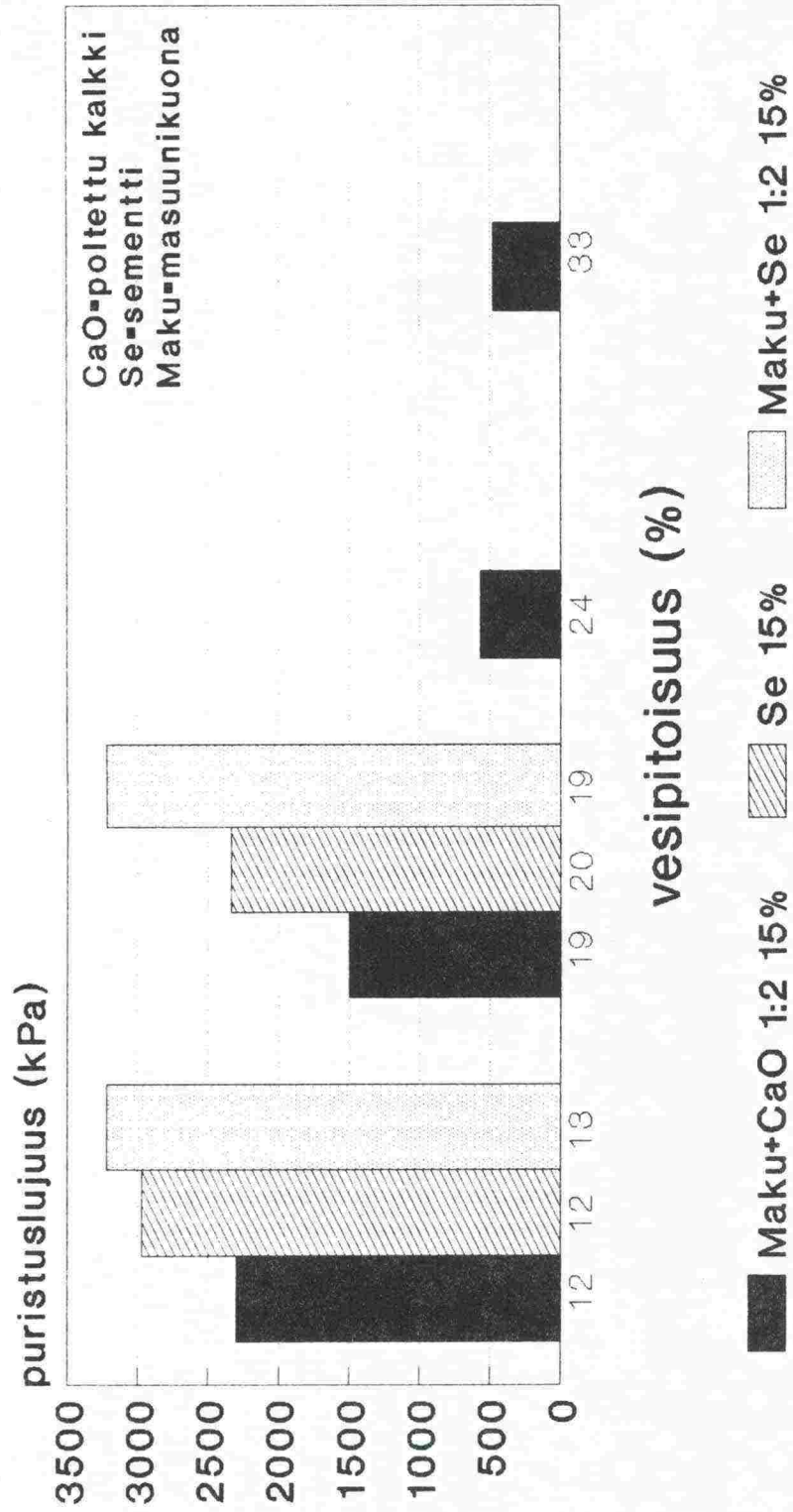


Biotiitti+kipsi -seos

Kuva 2.

# LUJUUSKOKKEET

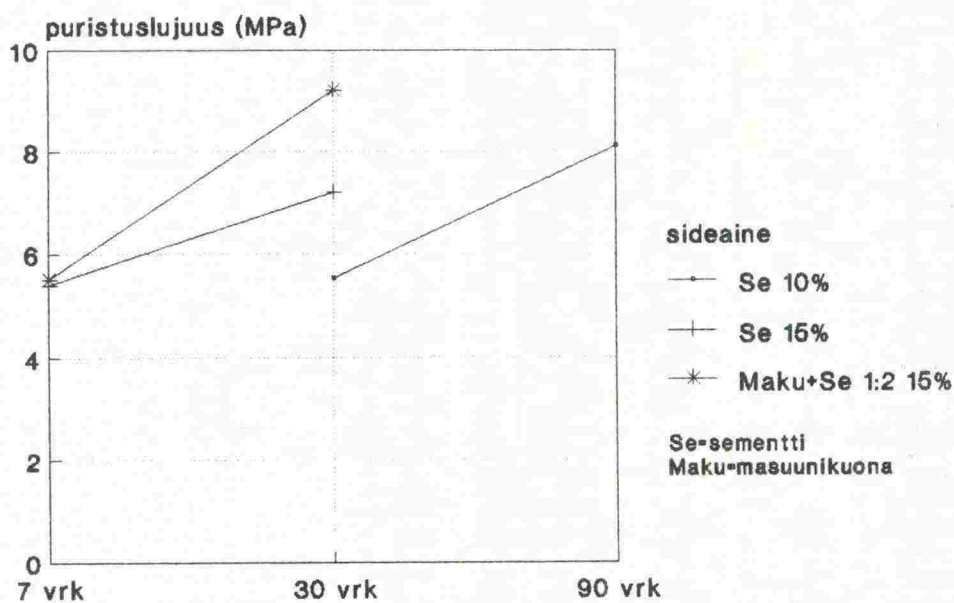
## Kosteuden vaikutus lujuuteen 30 vrk



Biotiitti+kipsi -seos



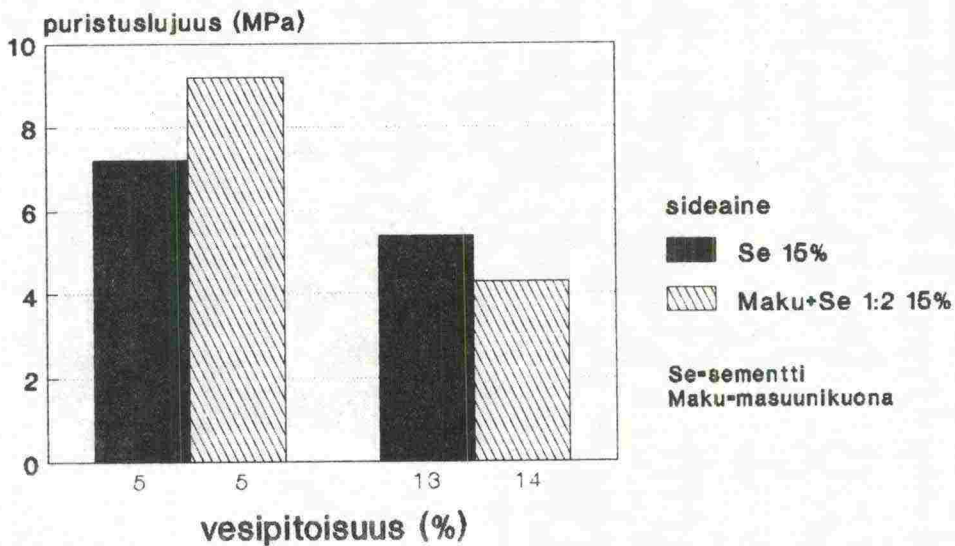
## LUJUUSKOKEET Aikalujittuminen



Biotiitti+murske -seos

Kuva 1.

## Kosteuden vaikutus lujuuteen 30 vrk

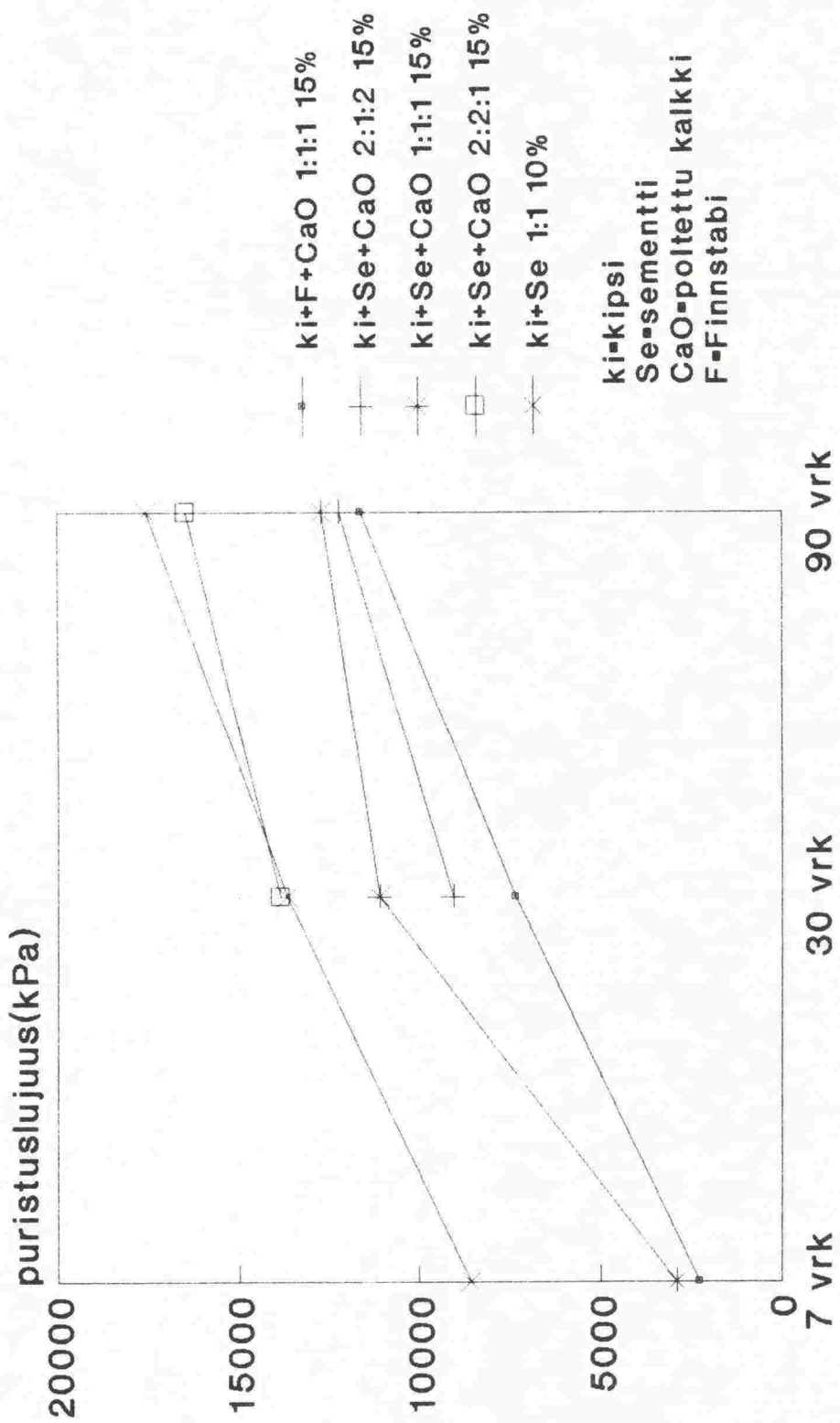


Biotiitti+murske -seos

Kuva 2.

# LUJUUSKOKEET

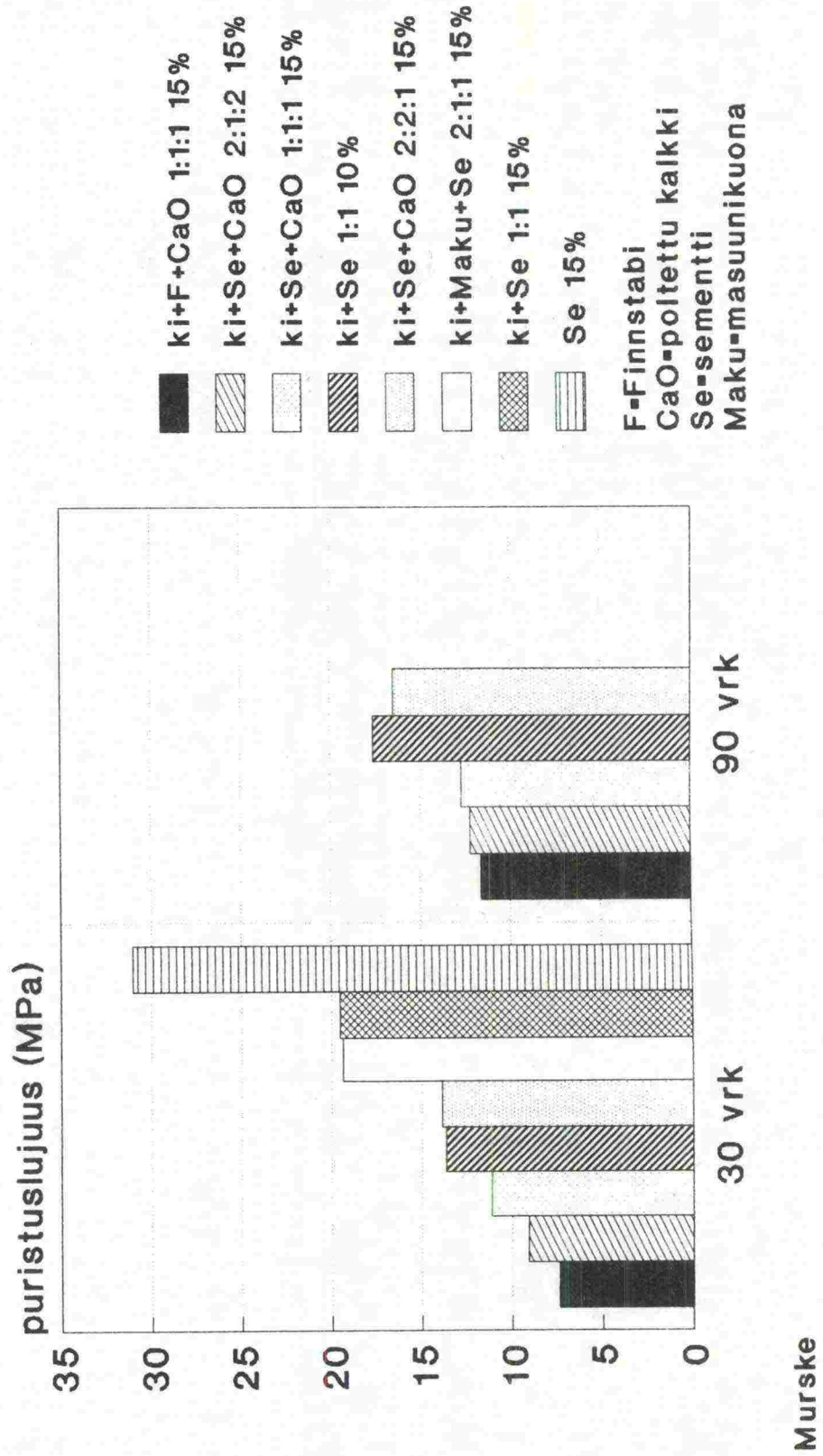
## Aikalujittuminen



Murske

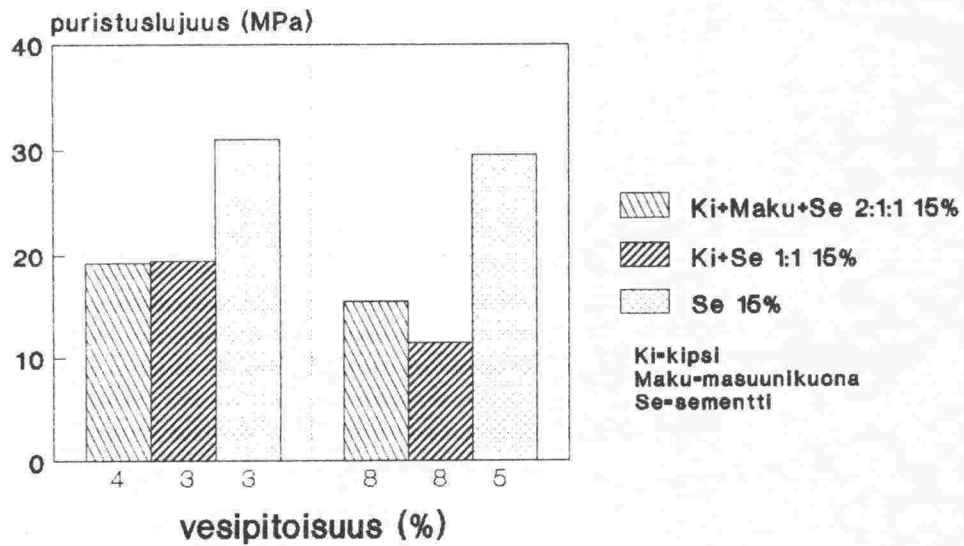
# LUJUUSKOKKEET

## Sideaineiden vertailu 30 vrk (ja 90 vrk)



# LUJUUSKOKEET

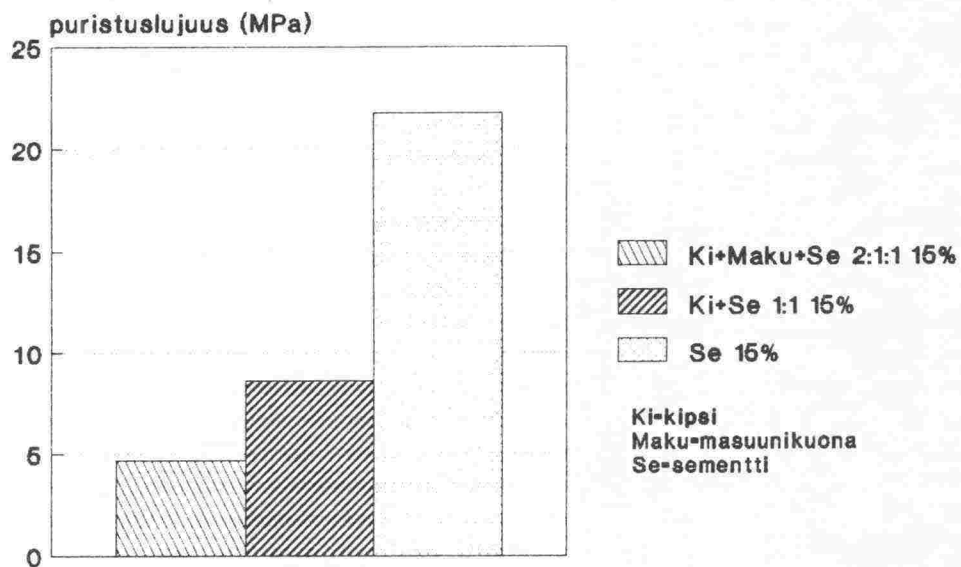
## Kosteuden vaikutus lujuuteen 30 vrk



Murske

Kuva 1.

## 7 vrk

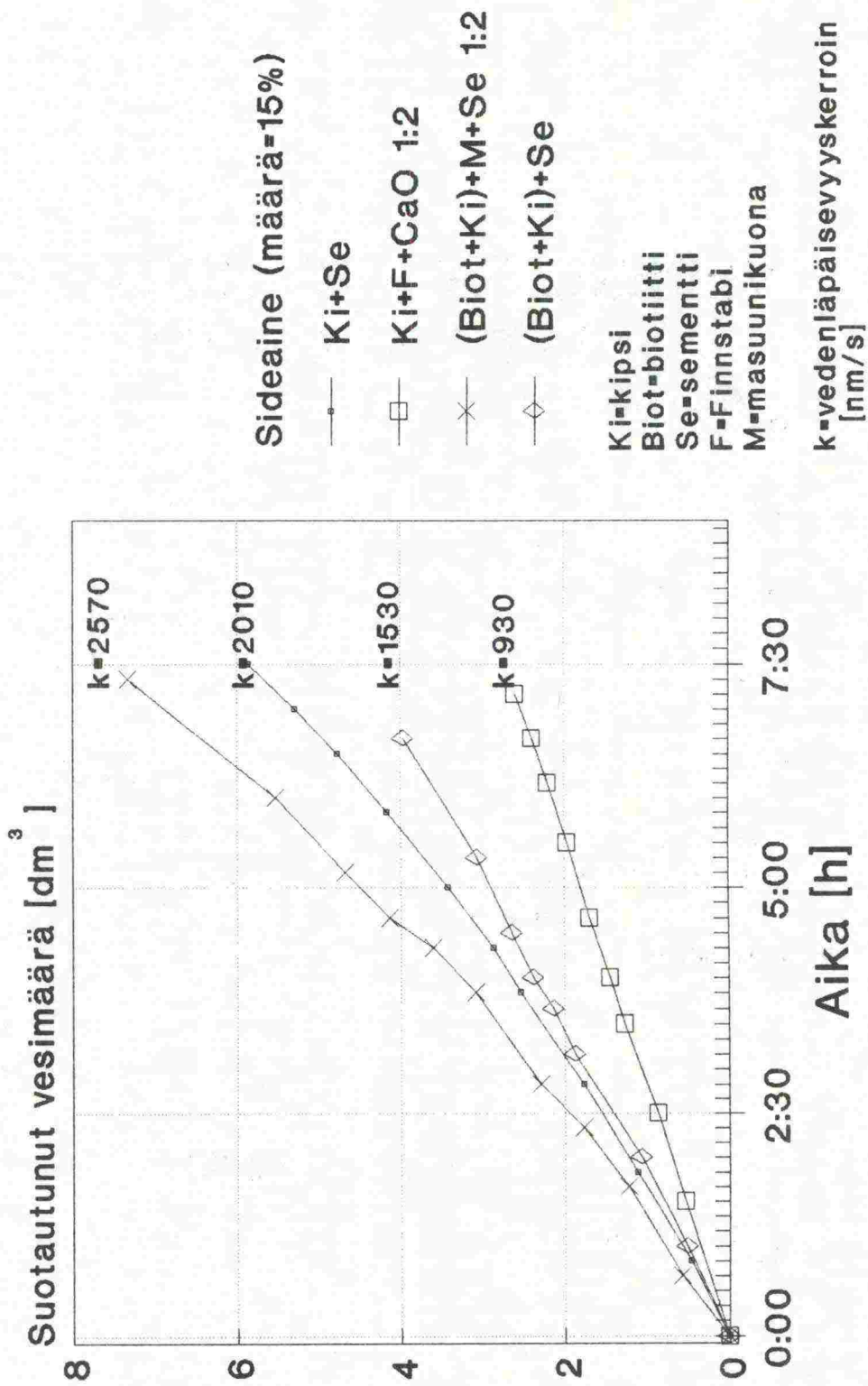


Murske

Kuva 2.

# VEDENLÄPÄISEVYYSKOKEET

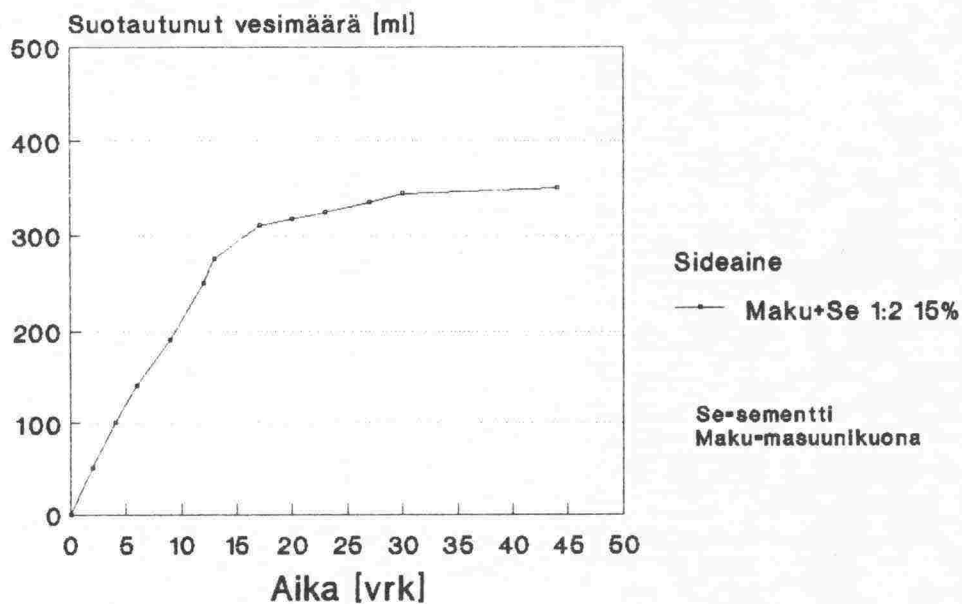
## Suotautunut vesimäärä



Kipsi ja Biotiitti+kipsi - seos

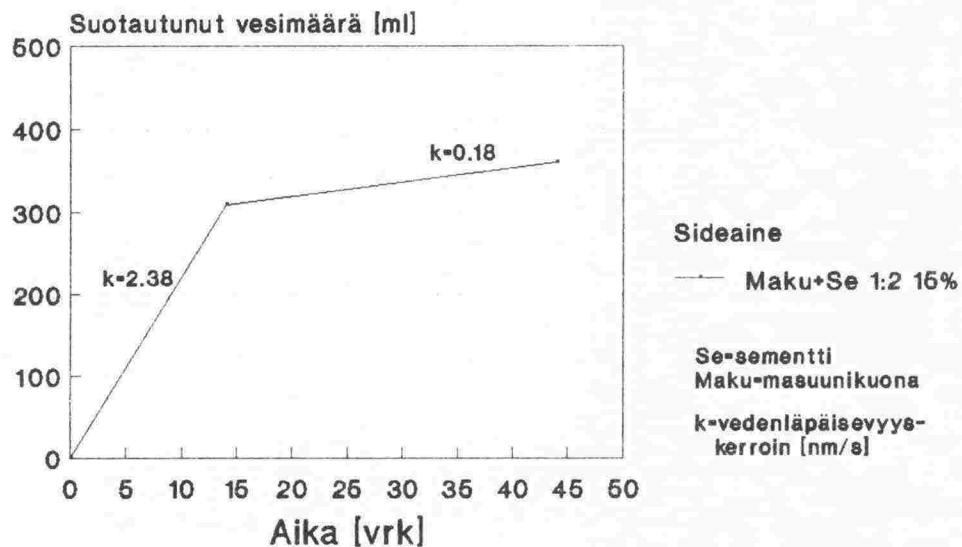
# VEDENLÄPÄISEVYYSKOKEET

## Suotautunut vesimäärä



Biotiitti+murske -seos

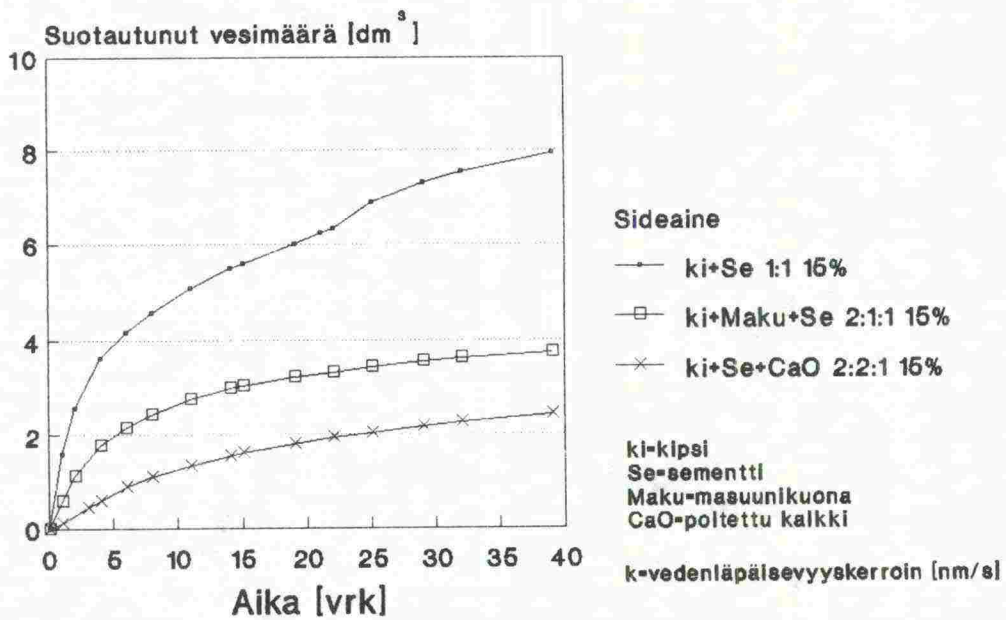
(Linearisoitu malli)



Biotiitti+murske -seos

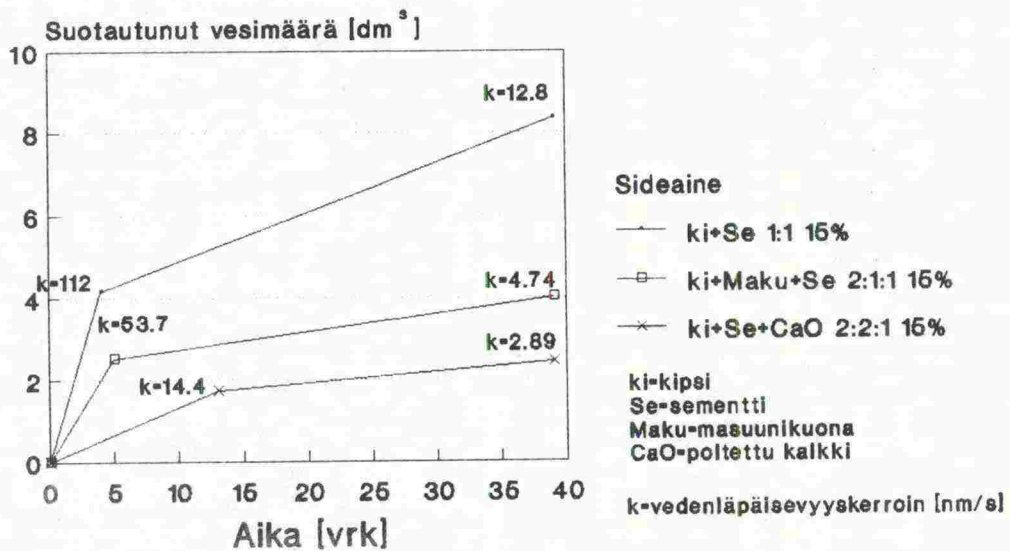
# VEDENLÄPÄISEVYYSKOKEET

## Suotautunut vesimäärä



Murske

### (Linearisoitu malli)



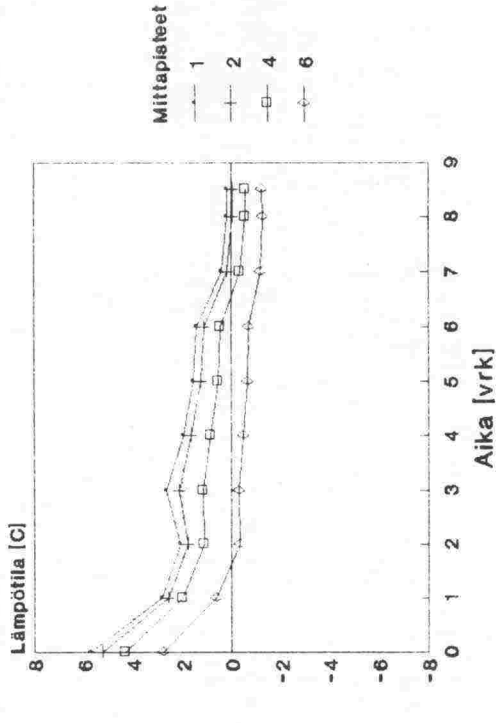
Murske

# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

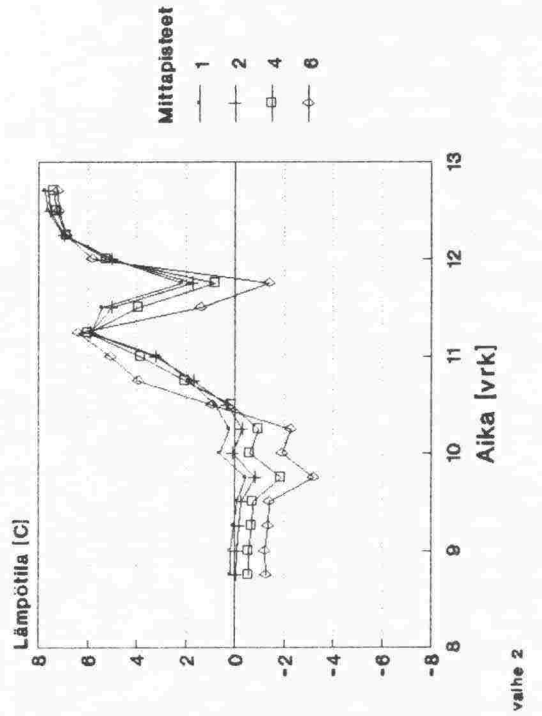
Kipsi+Se 15%

Lämpötilat näytteen eri kohdissa

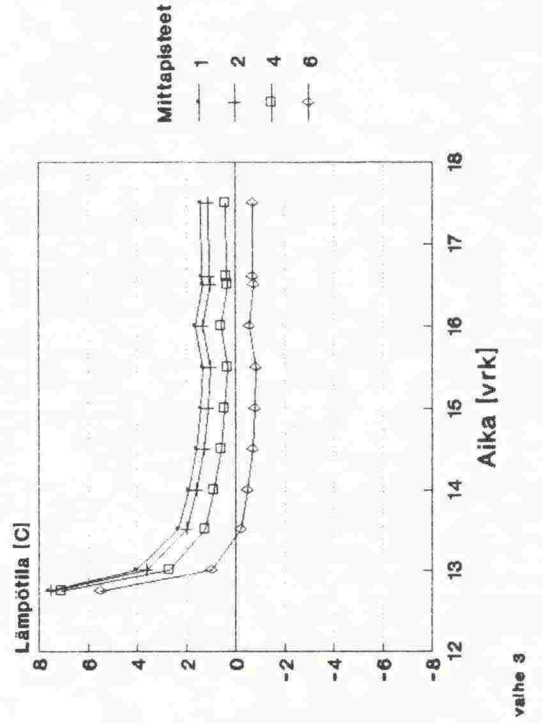
Vaiheet 1-3



vaihe 1



vaihe 2



vaihe 3

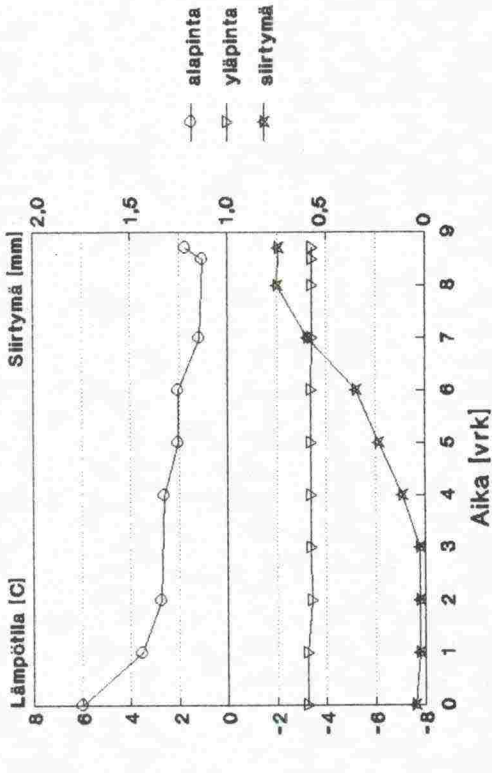


# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

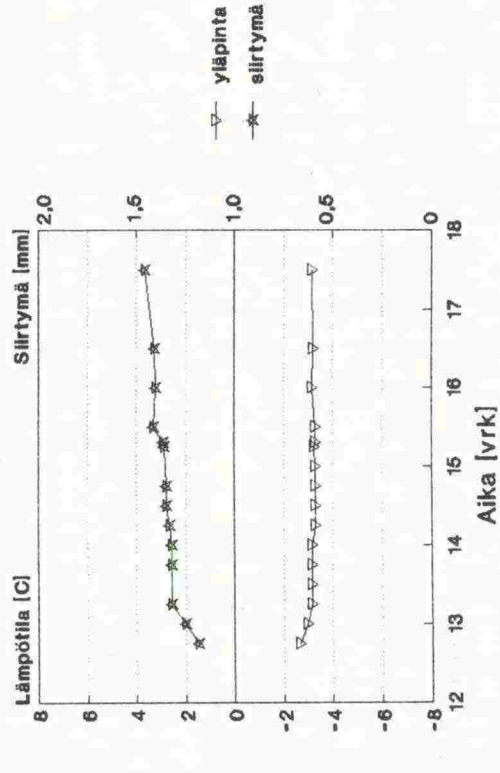
Kipsi-Se 15%

Ylä- ja/alapinnan lämpötilat sekä siirtymät

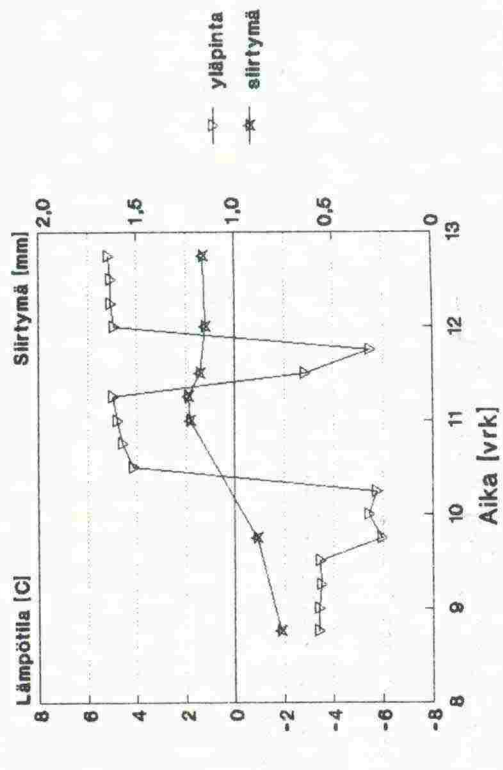
Vaiheet 1-3



valhe 1



valhe 3



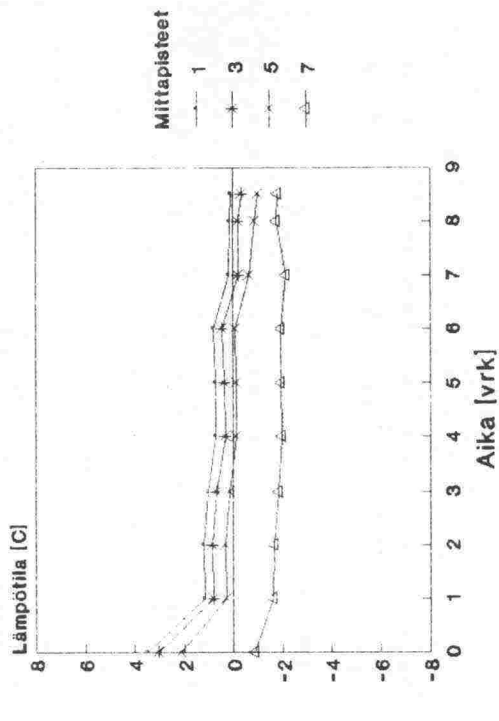
valhe 2

# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

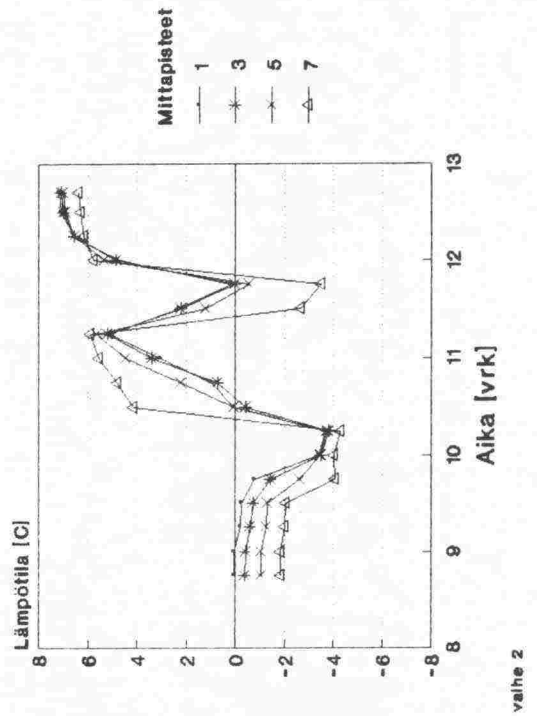
Kipsi:Finnstabi:CaO 1:2 15%

Lämpötilat näytteen eri kohdissa

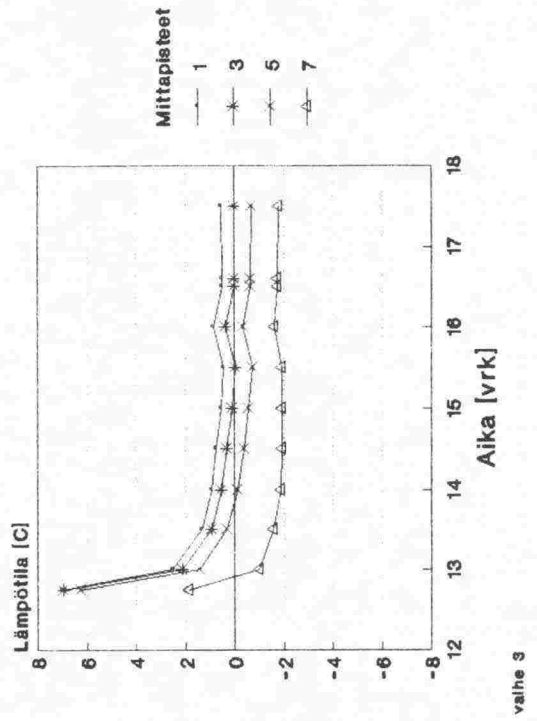
Vaiheet 1-3



valhe 1



valhe 2



valhe 3

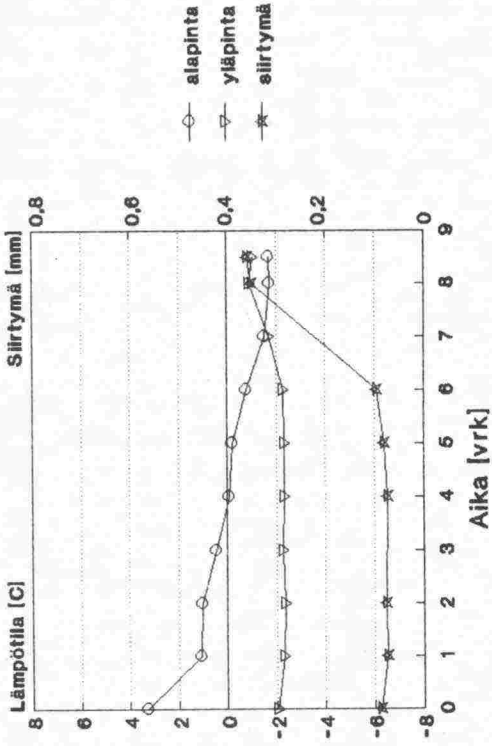
# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

Kipsi+Finnstabi+CaO 1:2 15%

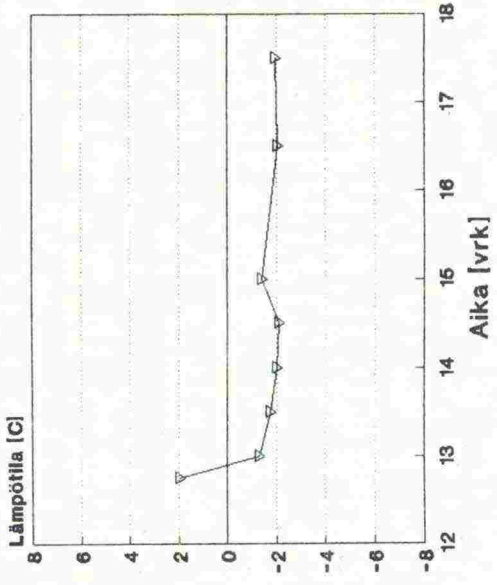
Ylä- ja/tai alapinnan lämpötilat

Vaiheen 1 routanousu

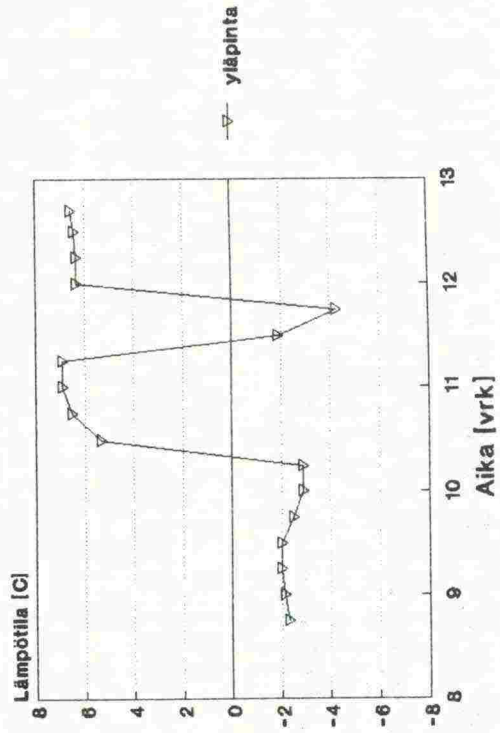
Vaiheet 1-3



vaihe 1



vaihe 3

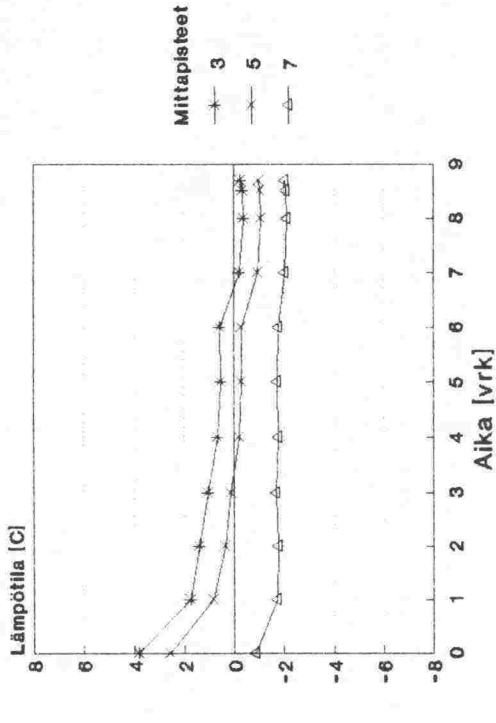


vaihe 2

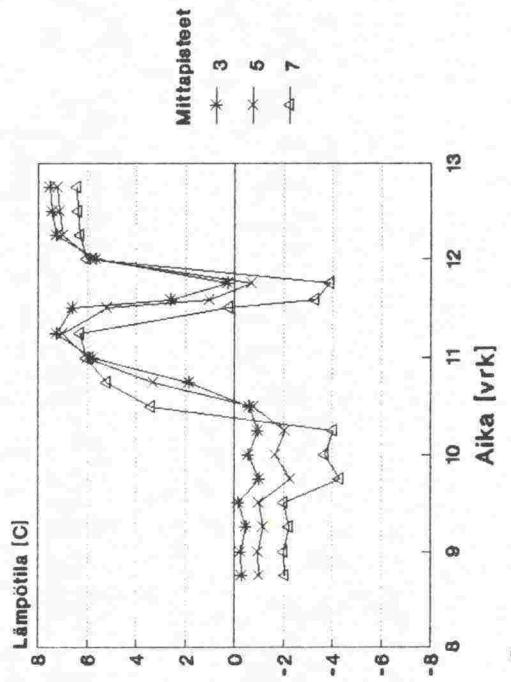
# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

Biotiitti+Kipsi - seos  
+Se 15%

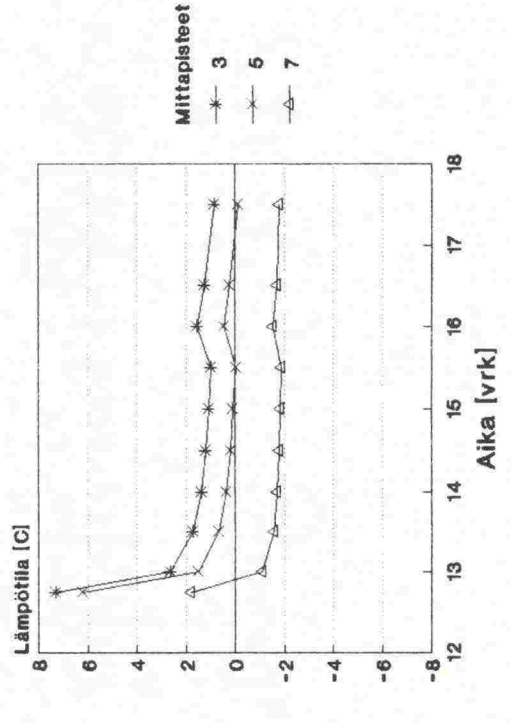
Lämpötilat näytteen eri kohdissa  
Vaiheet 1-3



valhe 1



valhe 2



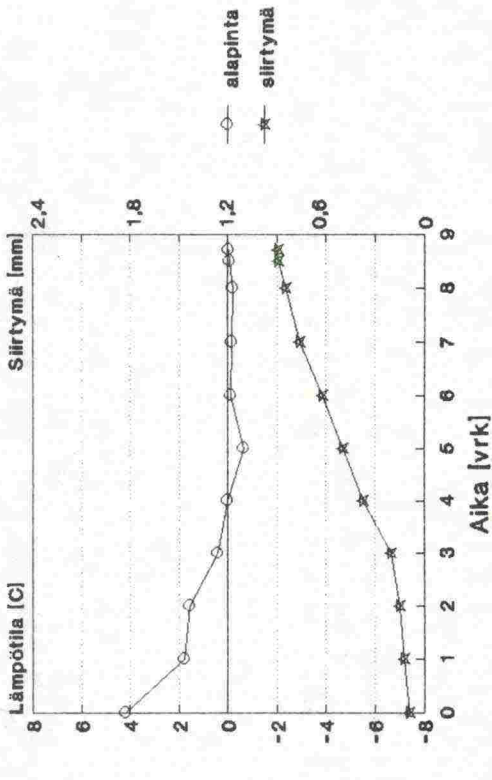
valhe 3

# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

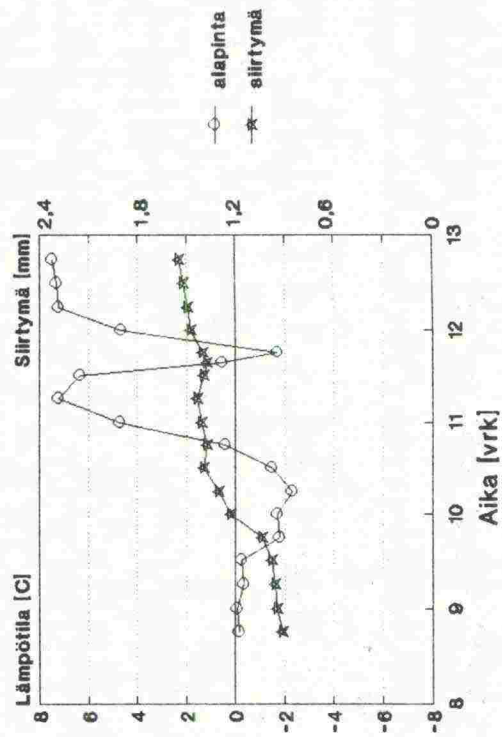
Biotiitti+Kipsi - seos  
+Se 15%

Alapinnan lämpötilat ja siirtymät

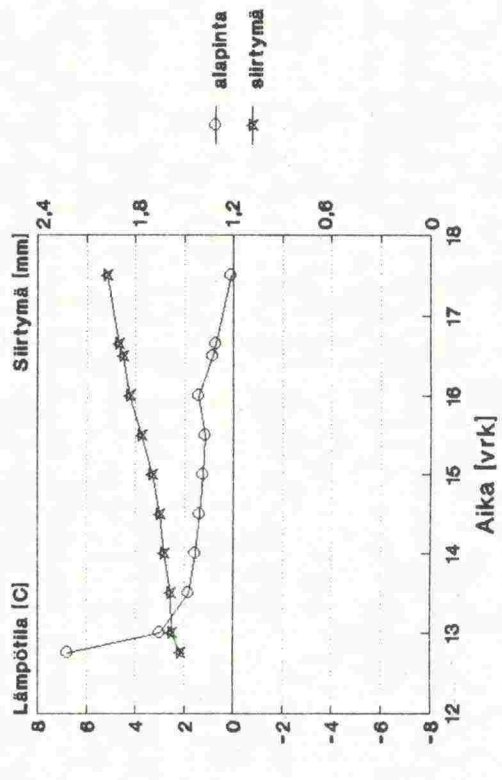
Vaiheet 1-3



vaihe 1



vaihe 2

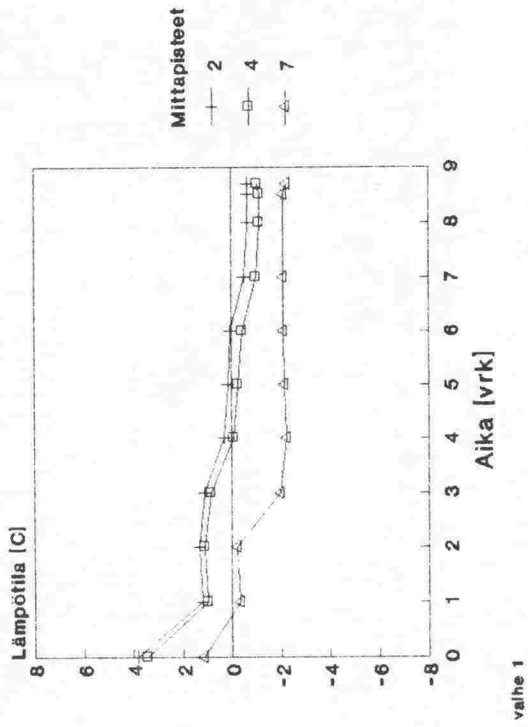


vaihe 3

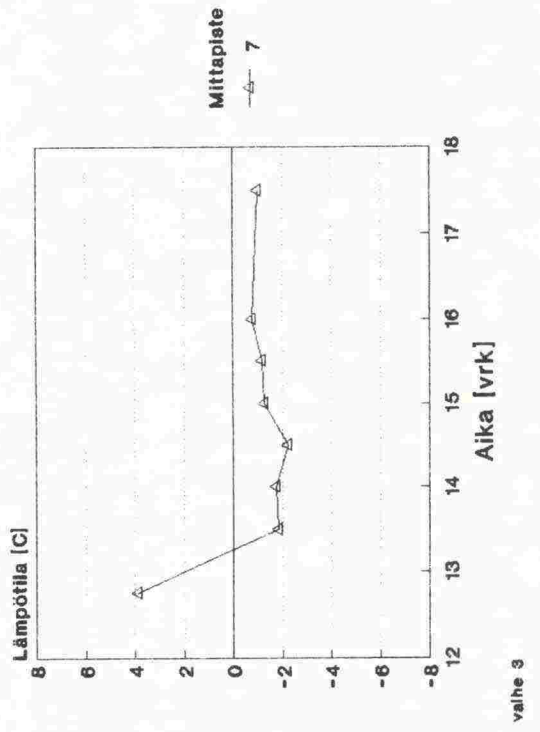
# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

Biotiitti+Kipsi - seos  
+Maku-Se 1:2 15%

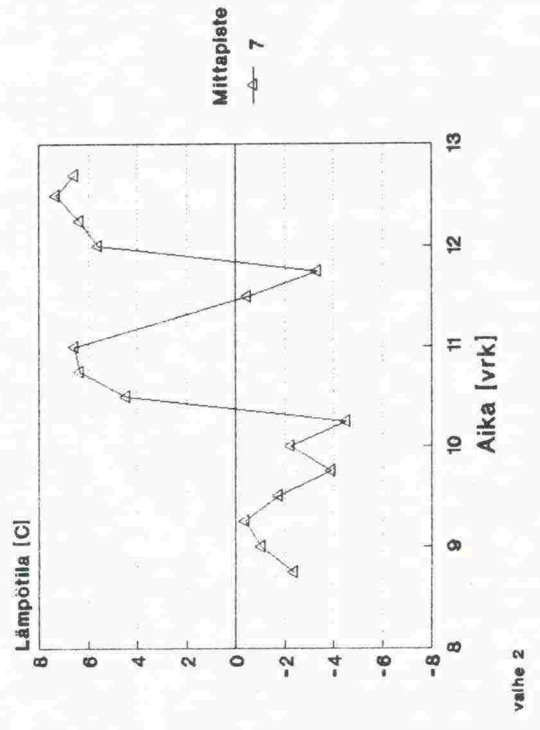
Lämpötilat näytteen eri osissa  
Vaiheet 1-3



vaihe 1



vaihe 3

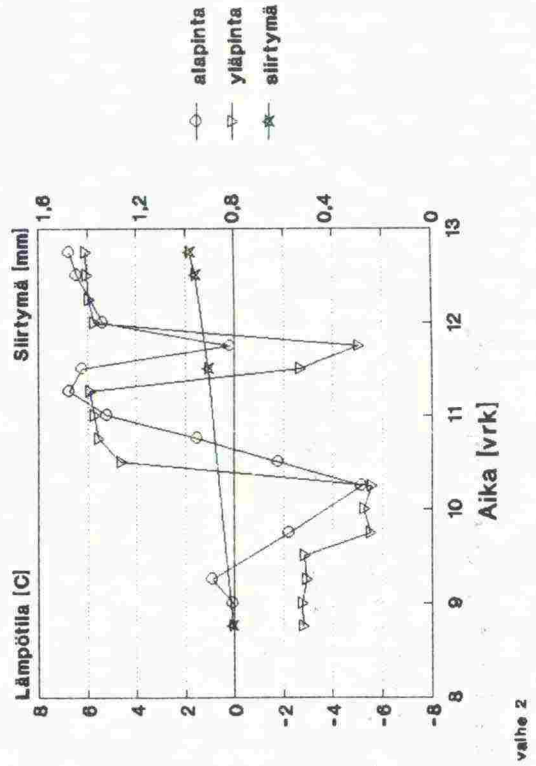
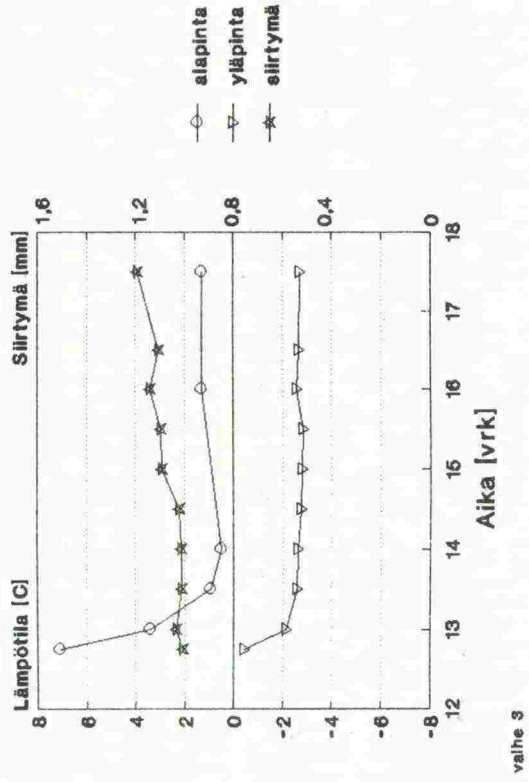
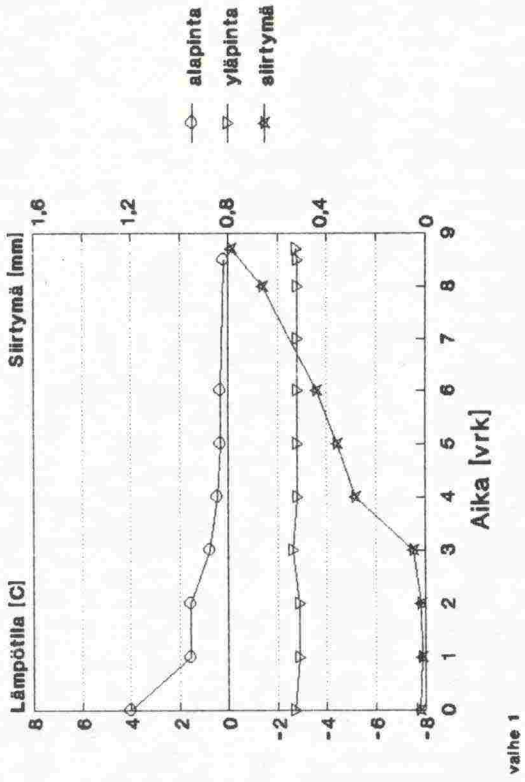


vaihe 2

# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

Biotiitti+Kipsi - seos  
+Maku-Se 1:2 15%

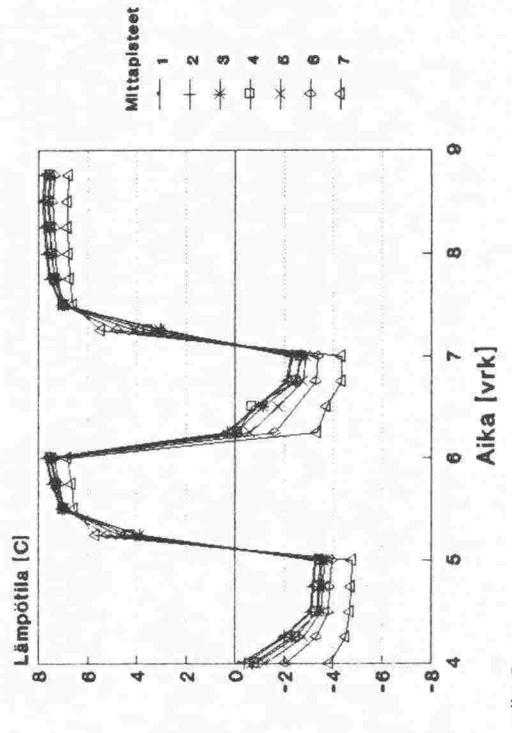
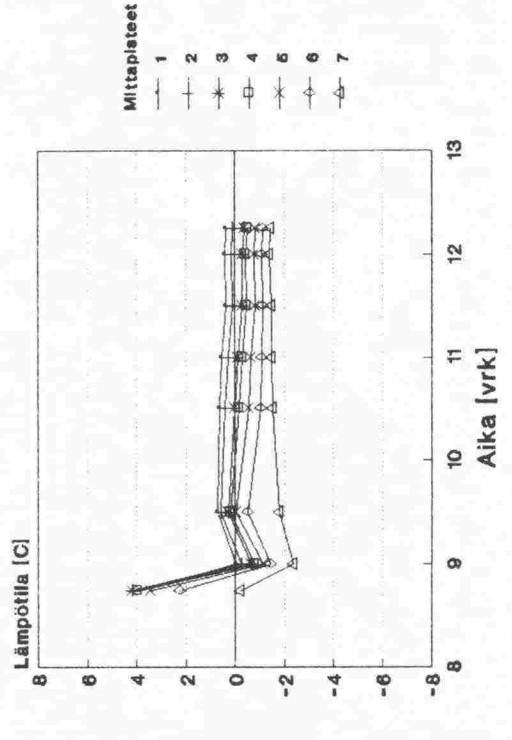
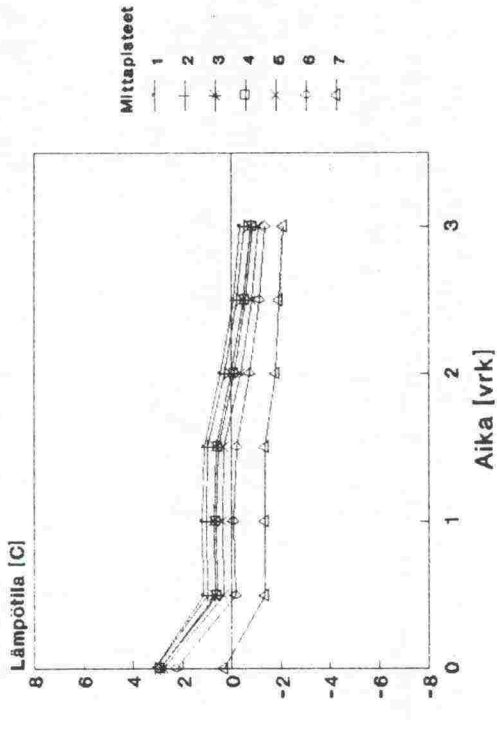
Ylä- ja alapinnan lämpötilat sekä siirtymät  
Valheet 1-3



# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

Biotiitti+Murske - seos  
+Maku+Se 1:2 15%

Lämpötilat näytteen eri kohdissa  
Vaiheet 1-3



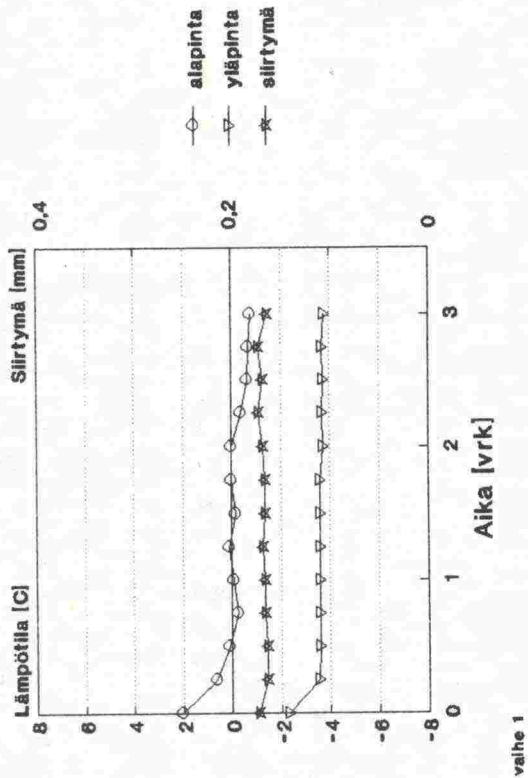


# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

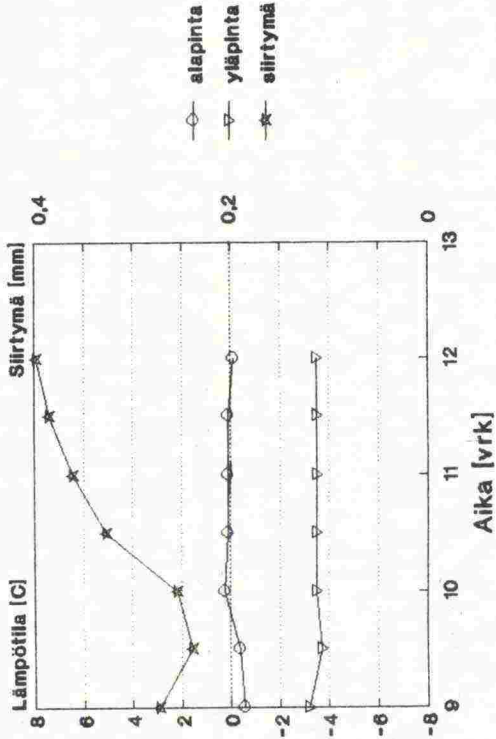
Biotiitti+Murske - seos  
+Maku+Se 1:2 15%

Ylä- ja alapinnan lämpötilat sekä siirtymät

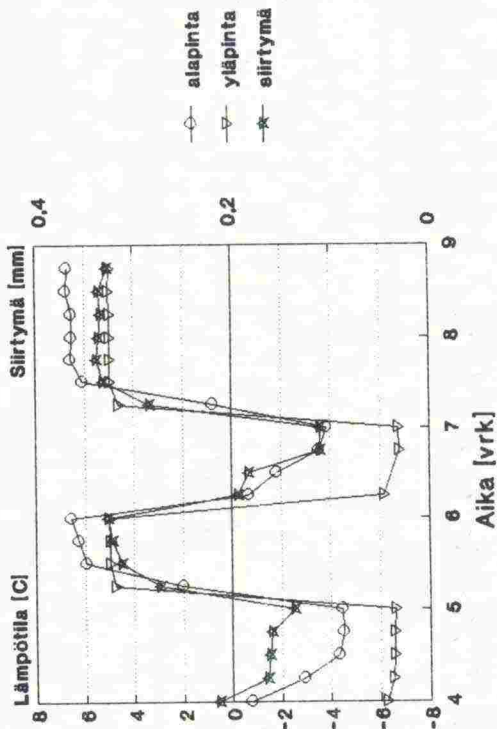
Vaiheet 1-3



vaihe 1



vaihe 2



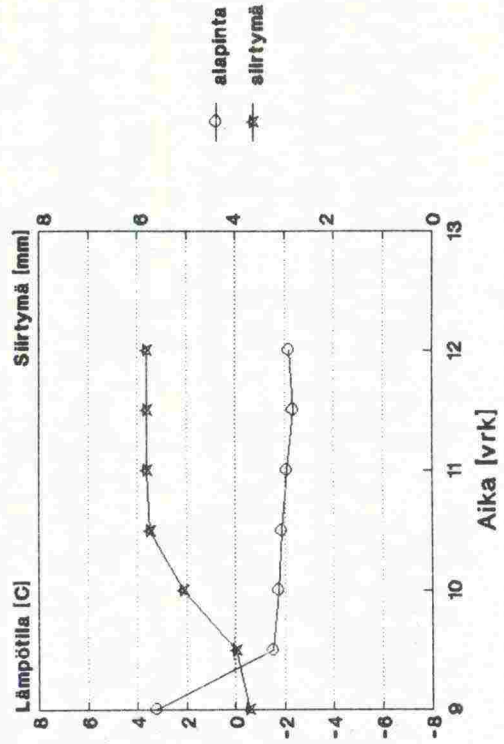
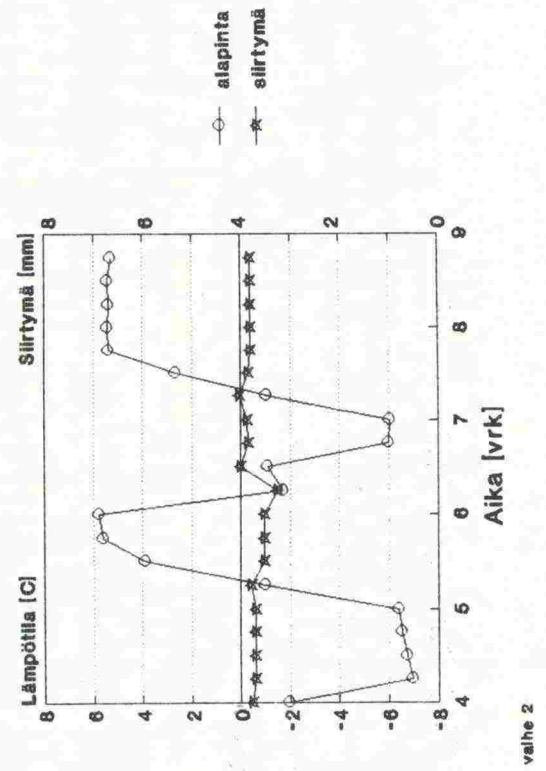
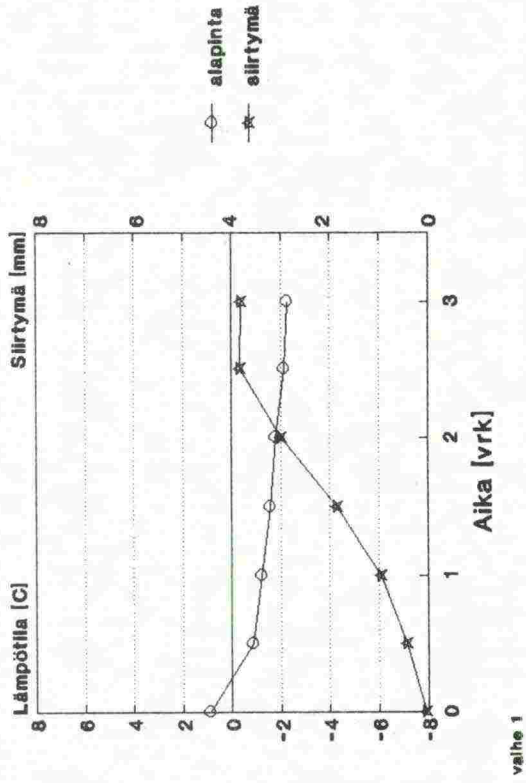


# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

Murske+kipsi+Se+CaO 2:2:1 15%

Alapinnan lämpötilat ja siirtymät

Vaiheet 1-3

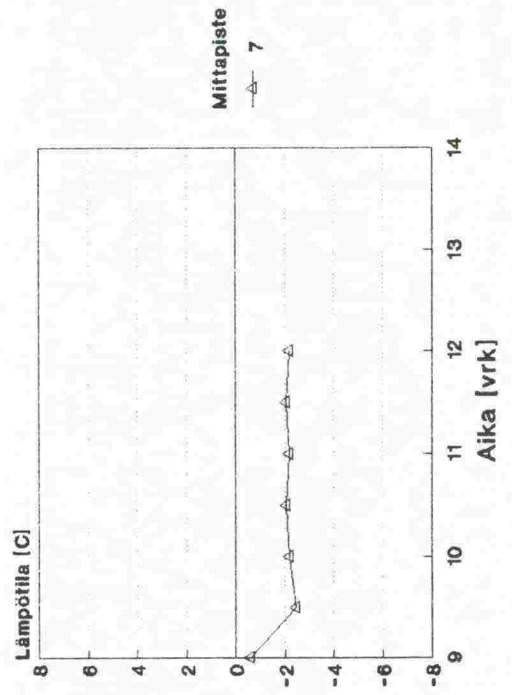
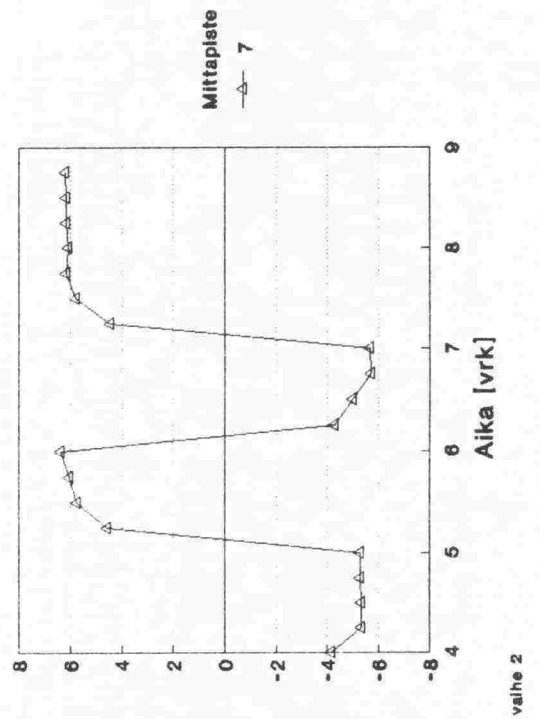
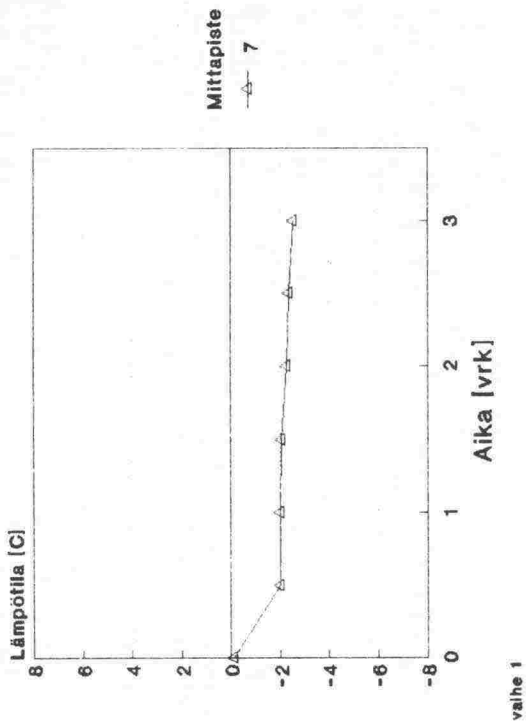


# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

Murske+kipsi+Maku+Se 2:1:1 15%

Lämpötila näytteen yläosassa

Vaiheet 1-3

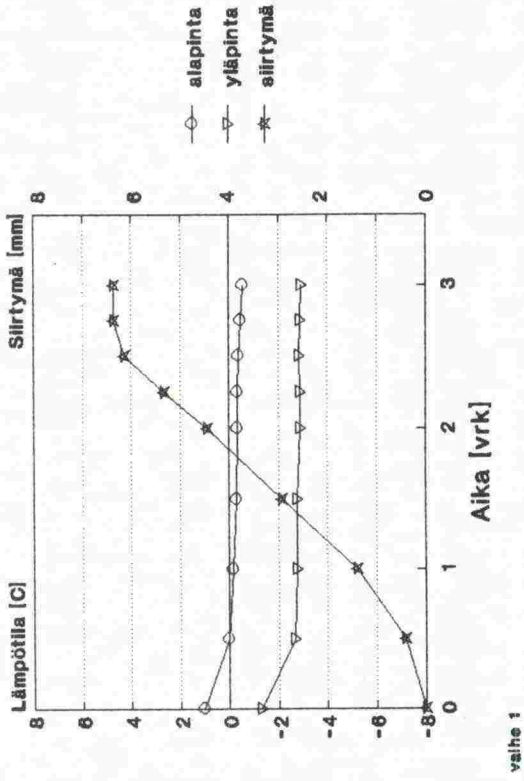


# JÄÄTYMIS-SULAMIS -KOE

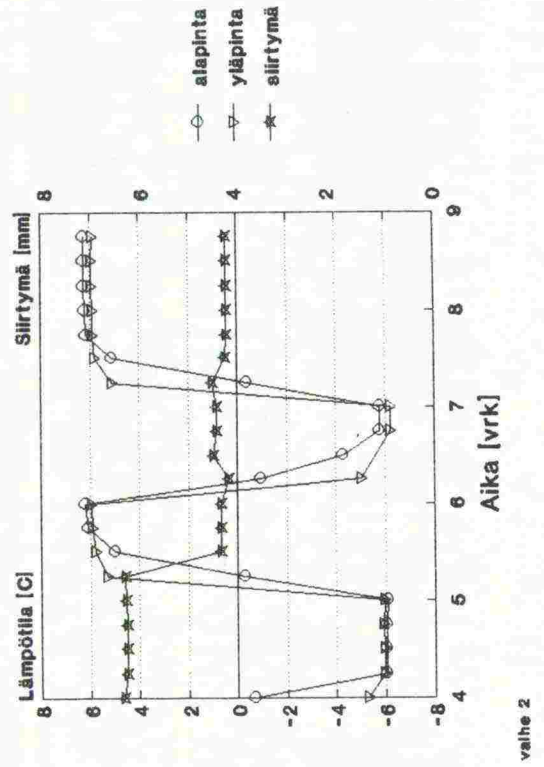
Murske+kipsi+Maku+Se 2:1:1 15%

Ylä- ja alapinnan lämpötilat sekä siirtymät

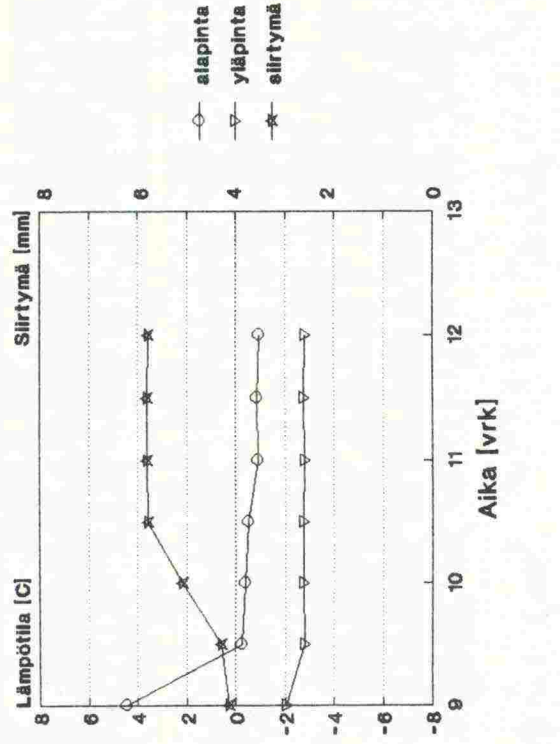
Valheet 1-3



valhe 1



valhe 2



## TIEHALLITUKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 10/1992 Tasolaserjärjestelmän käyttökokemuksia. TIEL 4000011
- 11/1992 Päälystevaurioiden inventointi; inventointilomake. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 12/1992 Yleisjohdon neuvottelupäivät, Helsinki 22-23.1.1992, kokousmuistio. Esikunta
- 13/1992 Lappusota; tiemestaripiirien perustiedon tallennuksen rationalisointi. Osa 1: Työnjärjestely ja lomakkeet. TIEL 4000012
- 14/1992 Tiehallituksen henkilöstö; lukumäärä- ja jakautumatietoja. Hallintopalvelut
- 15/1992 Tulosraportti 1991. Esikunta
- 16/1992 Kuorma-auton lisälaitteiden samanaikaiskäyttö. TIEL 4000013
- 17/1992 Tiehöylän lisälaitteiden toimivuus talvihoitotöissä. TIEL 4000014
- 18/1992 Tielaitoksen henkilöstö 1991. Henkilöstöhallinto
- 19/1992 Muovisten putkien ja kaivojen asennusohje. TIEL 4000015
- 20/1992 Vanhojen tienrakennekerrosten uudelleen käyttö. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 21/1992 Tasoliittymän rakentaminen eritasoliittymäksi ja lossin korvaaminen sillalla. Tiensuunnittelu
- 22/1992 Suurien ja raskaiden esineiden kuljetusten suoritusmahdollisuudet eri kuljetusmuodoilla, yhdistetyt kuljetukset. Tutkimuskeskus
- 23/1992 Liikenne- ja autokantaennuste 1989-2010; ennusteen seuranta 1992, ennusteen tarkistaminen 1992. Tutkimuskeskus
- 24/1992 Talvisuolan esikosteitus; konstit on monet. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 25/1992 Suunnittelun ja rakentamisen teknisen henkilöstön täydennyskoulutuksen tarveselvitys. Henkilöstöhallinto
- 26/1992 Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rakennekerroksissa, esiselvitys. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 27/1992 Tulohajauksen tietoaineisto. TIEL 4000016
- 28/1992 Tiehallituksen tavoitteet 1992. Hallintopalvelut
- 29/1992 Liuosasemien materiaalit; pinnoitettu, ruostumaton ja haponkestävä teräs. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 30/1992 Kolme päivystyskeskusta: Lieto, Nyköping ja Tukholma. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 31/1992 Autojen nopeudet pääteillä 1991. TIEL 4001836-92