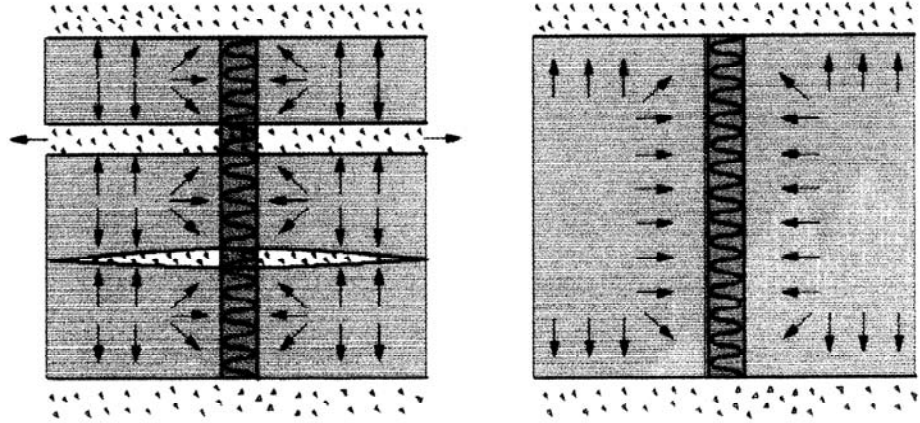




Tielaitos

Geotekniikan informaatiojulkaisu

Nauhapystyjoitus



Tielaitoksen
selvityksiä
42/1994

Helsinki 1994

Geokeskus

Tielaitoksen selvityksiä
42/1994

Geotekniikan informaatiojulkaisuja

Nauhapystyöjitus

Tielaitos
Geokeskus

Helsinki 1994

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-9434-6
TIEL 3200251
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1994

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652

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

Geotekniikan informaatiojulkaisu. Nauhapystyöjitus. [Vertikaldränöing]. Helsinki 1994, Tielaitoksen selvityksiä 42/1994. 69 sivua. ISBN 951-47-9434-6. ISSN 0788-3722. TIEL 3200251.

Asiasanat pystyöjanauhat, pystyöjitus, laadunvalvonta

TIIVISTELMÄ

Informaatiojulkaisun tarkoituksena on esitellä pystyöjitusta koskeva, hyväksitty havaittu suunnittelu- ja rakentamiskäytäntö. Aluksi käydään läpi pystyöjanauhojen valintaan, laadunvalvontaan ja työnaikaiseen laadunvarmistukseen liittyviä seikkoja tielaitoksen nykyisten ohjeiden mukaisesti. Nauhapystyöjen asennuskoneita ja -tekniikkaa kuvaillaan lyhyesti. Pystyöjäsentän rakennekerroksista ja kuivatuksesta esitetään suomalainen suunnittelu- ja rakentamiskäytäntö. Maasto- ja laboratoriotutkimuksista esitetään tavanomainen suomalainen käytäntö ja myös kansainvälinen pohjatutkimustendenssi parametrien luotettavuuden lisäämiseksi.

Informaatiojulkaisussa on erityistä huomiota kiinnitetty pystyöjäsentän suunnittelua ja mitoitusta sekä rakentamisaikaista tarkkailua koskeviin ohjeisiin. Ohjeissa on esitelty menetelmiä pystyöjavälin ja esikuormituksen mittaamiseksi sekä sekundaarisen konsolidaation ja pystyöjäsentän vakaavuuden huomioon ottamiseksi. Lisäksi on kuvailtu maapohjan makrostruktuurin, kuormitushistorian jne. aiheuttamia mitoituksen erikoistapauksia. Seurantamittausten tulkinnasta on esitetty tavallisimmat kansainväliset tulkintamenetelmät.

Publications on geotechnical information. Vertical drainage. [Nauhapystyöjitus]. Helsinki 1994, Finnish National Road Administration. Report 42/1994. 69 p., ISBN 951-47-9434-6. ISSN 0788-3722. TIEL 3200251.

Key words Vertical strip drains, vertical drainage, quality control

ABSTRACT

The main purpose of this information publication is to present the design and construction practise for speeding up consolidation by vertical band-shaped drains. The publication consists also instructions of the quality control of drain strips as well as the quality assurance procedure during installation according to the present instructions of the Finnish National Road Administration.

The specific governing soil parameters and the corresponding field and laboratory investigations are presented. The special attention has been payed to the dimensioning of the drain distance and preloading combined with the special cases of e.g. smear, partial penetration, overconsolidation and load history. The influence of the secondary consolidation and undrained cohesion gain is described. Finally, the most usual international methods for backanalyzing pore-pressure and settlement observations are presented.

Alkusanat

Tämä nauhapystyöjittusta käsittelevä julkaisu kuuluu Geotekniikan informaatiojulkaisuja-sarjaan, jonka tarkoituksena on tuottaa geosuunnittelijoille tietoa tämän hetkisestä hyvästä pohjarakentamis- ja perustamiskäytännöstä tienrakentamisen alalla.

Työn ovat tehneet Pauli Vepsäläinen ja Olli Arkima insinööritoimisto YS-Yhdyskunta Oy:stä.

Tilaaajan puolelta työtä ovat valvoneet Pentti Salo ja Matti Kolhinen geokeskuksesta sekä Mikko Smura Uudenmaan tiepiiristä.

**Tielaitos
Geokeskus**

Sisältö

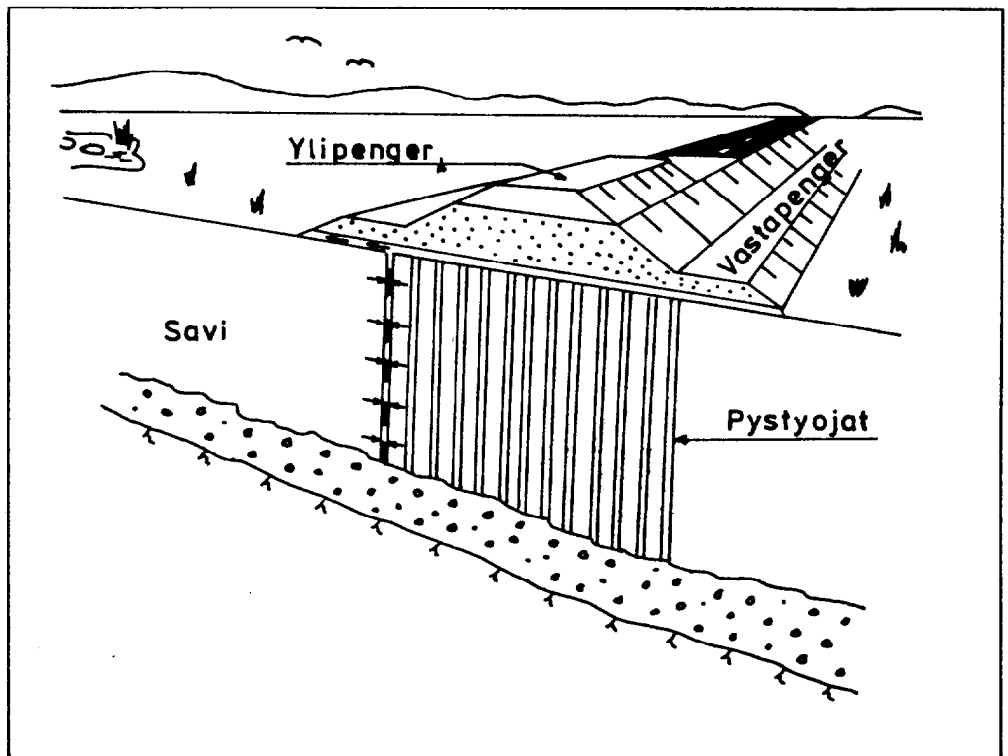
| | |
|--|-----------|
| 1 YLEISTÄ | 9 |
| 1.1 Pystyöjituksen tausta ja periaatteet | 9 |
| 1.2 Nykyisin käytössä olevat ohjeet ja käsikirjat | 10 |
| 2 NAUHAPYSTYÖJIEN VALINTA | 11 |
| 2.1 Nauhaojatyytit | 11 |
| 2.2 Valintakriteerit | 12 |
| 2.3 Nauhojen laadunvalvonnan menettelytavat | 12 |
| 3 ASENNUSKONEET JA RAKENTAMISTEKNIikka | 14 |
| 3.1 Asennuskoneet ja asennustekniikka | 14 |
| 3.2 Pystyöjitusalueen rakennekerrokset ja kuivatus | 18 |
| 4 MAASTO- JA LABORATORIOTUTKIMUKSET | 21 |
| 4.1 Tutkimusten tarkoitus ja menetelmät | 21 |
| 4.2 Kairaukset | 23 |
| 4.3 Laboratoriotutkimukset | 24 |
| 4.4 In situ-kokeet | 25 |
| 5 PYSTYÖJAKENTÄN SUUNNITTELU | 26 |
| 5.1 Yleistä | 26 |
| 5.2 Mitoituksen teoreettiset perusteet | 26 |
| 5.3 Pystyöjavälin mitoitus | 29 |
| 5.4 Esikuormituksen mitoitus | 32 |
| 5.5 Sekundaarinen konsolidaatio | 36 |
| 5.6 Pystyöjakentän vakavuus | 37 |
| 5.7 Mitoituksen erikoistapauksia | 39 |
| 5.7.1 Samanaikainen pysty- ja vaakakonsolidaatio | 39 |
| 5.7.2 Painuvaan kerrokseen jätetyt pystyöjat | 39 |
| 5.7.3 Ylikonsolidoitunut maapohja | 41 |
| 5.7.4 Maapohjan häiriintyminen | 41 |
| 5.7.5 Suuret painumat | 42 |
| 5.7.6 Vaiheittain rakentaminen | 43 |
| 5.7.7 Leikkauslujuuden kasvu | 44 |
| 5.8 Menetelmärajotukset | 46 |
| 6 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET | 47 |
| 6.1 Maapohjan häiriintyminen | 47 |
| 6.2 Pohjavesi | 47 |

| | |
|--|-----------|
| 7 TYÖN VALVONTA JA SEURANTAMITTAUKSET | 48 |
| 7.1 Laadunvarmistus | 48 |
| 7.2 Seurantamittaukset | 49 |
| 7.3 Mittaustulosten käsittely ja tulkinta | 52 |
| 8 TYÖSAAVUTUKSIA JA KUSTANNUKSIA | 62 |
| 9 MITOITUSESIMERKKI | 63 |
| 10 KIRJALLISUUS | 68 |

1 YLEISTÄ

1.1 Pystyöjituksen tausta ja periaatteet

Pystyöjituksen ensisijaisena tarkoituksena on pehmeiden maakerrosten konsolidaation kiihdyttäminen maahan pystysuoraan asennettujen salaojien ja esikuormituksen avulla. Kiihdytysvaikutus perustuu siihen, että huokosveden virtausmatka pystyöjien välillä on pienempi kuin virtausmatka luonnontilaisessa maapohjassa (kuva 1).



Kuva 1: Pystyöjituksen periaate

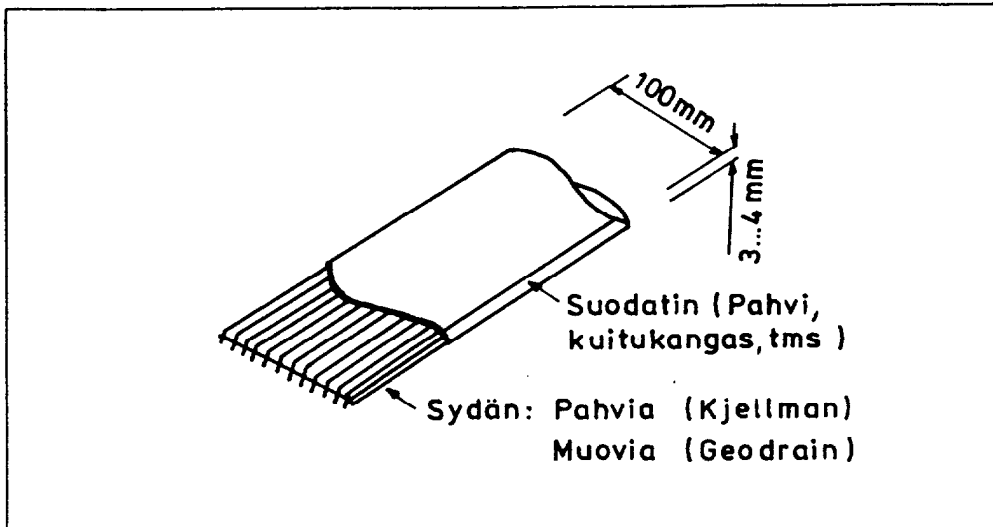
Pystyöjituksen idean keksi D. J. Moran USA:ssa v. 1925, ja ensimmäiset käytännön sovellutukset rakennettiin v. 1936. Salaojina käytettiin pyöreitä sylinterinmuotoisia hiekkasalaojia. Tämä salaojatyypin oli pääasiassa käytössä aina 1970-luvun puoleenväliin saakka, jolloin nauhapystyöjat syrjäyttivät sen.

Vuonna 1937 kehitti ruotsalainen Kjellman ns. pahviojan (cardboard wick drain), mitä voidaan pitää nykyaikaisten nauhapystyöjien esikuvana. Pahviojien asennuskone valmistui vuonna 1939.

Vuonna 1971 Wager kehitti Ruotsissa pahviojasta uuden pystyöjatyypin, jota kutsutaan nimellä Geodrain (Boman 1973). Uutta tässä tyypissä oli muovinen uritettu sydänosa, mikä oli päällystetty suodatinpaperilla (kuva 2). Nykyään suodatinpaperi on myös Geodrain-ojissa korvattu synteettisellä kuitukankaalla.

Erialaisten nauhapystyöjatyypien lukumäärä kasvoi 1980-luvulla, ja tällä hetkellä markkinoilta löytyy yli 50 erilaista tyyppiä.

Pystyöjitusteorioiden merkittävimpiä kehittäjiä ovat olleet mm. Rendulic 1936, Kjellman 1937, Barron 1948 ja Hansbo 1981 (luku 5).



Kuva 2: Nauhapystyöja

Pystyöjanauhoja käytetään myös huokosveden ylipaineen pienentämiseen ja vakavuuden parantamiseen maaluiskissa ja penkereen alla sekä paaluihin kiinnitettynä paalujen lyönnistä aiheutuvan huokosveden ylipaineen pienentämiseen.

1.2 Nykyisin käytössä olevat ohjeet ja käsikirjat

TIELAITOKSEN JULKAISUT:

Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Perustus-, tukemis- ja lujitustyöt. Tielaitos. Tiehallitus. Helsinki 1991. TIEL 2212456.

TVO Tienrakennustöiden valvontaohje. Pohjanvahvistustyöt. Tie- ja vesirakennushallitus. Maatutkimustoimisto. Helsinki 1988. TVH 732177.

Pohjarakennussuunnitelmat. Esitystapa. Tielaitos. Tiehallitus. Toukokuu 1990. TIEL 703435.

Insinööritoimisto Y-Suunnittelu, Naantalin - Turun maantien nro 189 rakentaminen, pystyöjitus, loppuraportti. Helsinki 1989. TIEH 733342.

Pohjonen, A., Liuskapystyöjakenttien toiminnasta. Tielaitoksen selvityksiä 2/1990, Helsinki 1990. TIEL 703344.

Komulainen, H., Rathmayer, H., Pystyöjanauhojen laatuvaatimukset. Laadunvalvonta ja testausmenetelmät. Tielaitoksen selvityksiä 1/1992, Helsinki 1992. TIEL 3200057.

MUUT JULKAISUT:

Yrjänä, J., Korhonen, O., Pystyöjitus Pikku-Huopalahdessa. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Tiedote 55/1991. Helsinki 1991. ISBN 951-772-187-0.

KÄSIKIRJAT:

Pohjarakenteet. RIL 166. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki 1986.

Geomekaniikka II. RIL 157 - 2. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki 1990.

2 NAUHAPYSTYÖJIEN VALINTA

2.1 Nauhaojatyyppit

Nauhapystyöjien lisäksi on olemassa hiekkaojia ja "sandwich"-ojia, joita ei kuitenkaan juuri käytetä Suomessa. Niihin liittyviä erilaisia asennustapoja, materiaalivaatimuksia ja toiminnallisia ominaisuuksia ovat esitelleet tarkemmin mm. Pilot et al 1987 ja Holtz et al 1991.

Nauhaojien dimensiot (leveys ja paksuus) ovat valtaosin samaa luokkaa kuin Kjellmanin pahviojalla (100 mm x 3 mm). Useimmissa ojissa on muovisydän, jossa on kanavia, uurteita tai nastoja veden johtamista varten. Muovisydämen ympärillä on tavallisesti geotekstiilistä valmistettu suodatin estämään ympärillä olevan maaaineksen tunkeutumista nauhan sisälle. Suodatin voi olla joko irtonainen tai kiinni muovisydämessä. Lisäksi on nauhatyypppejä, joissa sekä suodatin että sydänosa on tehty samasta materiaalista ja erillistä suodatinosaa ei ole. Erilaisia nauhaojatyypppejä on esitetty kuvassa 3. Nauhaojien tyypillisiä dimensioita on esitetty taulukossa 1.



Kuva 3: Erilaisia nauhaojatyypppejä

Taulukko 1: Suomessa tyyppitarkastetut nauhaojat

| Ojatyppi | Mitat | | Suodatinvaippa |
|---------------------|-------------|--------------|---------------------------|
| | Leveys (mm) | Paksuus (mm) | |
| Amerdrain 407 | 100 | 3 | Irtonainen |
| Colbond CX 1000 | 100 | 4 | Kiinni ydinosan reunoista |
| Flodrain 600 | 100 | 6 | Irtonainen |
| Membradrain MD 7407 | 100 | 3 | Irtonainen |
| Tenax VDR 100 | 100 | 3.5 | Irtonainen |
| Alidrain | 100 | 6 | Irtonainen |
| Solpac C 634 | 100 | 6 | Irtonainen |

Samalla tuotenimellä voi olla sekä erilaisia sydänosia että myös erilaisia suodattimia. Nauhojen tarjonnan ja kehityksen takia ajankohtaista tietoa nauhaojien dimensioista, materiaaleista ja ominaisuuksista tulee hankkia valmistajilta tai maahantuojilta. Nauhapystyöjien käyttökelpoisuus on uusien tyyppien osalta aina selvitettävä tyyppitarkastustestauksen avulla.

2.2 Valintakriteerit

Pystyöjanauhoja on nykyään kehitetty erilaisia käyttötapoja ja käyttöympäristöjä varten. Suunnittelijan on kuitenkin vaikeaa selvittää eri tyyppien käyttökelpoisuus ja keskinäinen paremmuus käyttötilanteessa, koska vain harvoista tuotteista on saatavissa luotettavia ojan toimintaominaisuuksia koskevia tietoja ja riittävää käyttökokemusta. Tästä syystä tielaitoksessa on otettu käyttöön kriteerit pystyöjanauhojen hyväksymistä, valintaa ja laadunvalvontaa varten (Pystyöjanauhojen laatuvaatimukset 1992).

Pystyöjanauhojen laatuvaatimukset koskevat suodattimen pitkäaikaista vedenläpäisevyyttä ja maa-aineksen pidätyskykyä sekä nauhan vedenjohtokykyä. Näiden laatuvaatimusten toteutumiseksi nauhan rakenteella ja materiaaleilla tulee olla riittävä mekaaninen lujuus. Lisäksi nauhan materiaaleilta vaaditaan käyttöiän (noin 2 - 3 vuotta) ajalle riittävää kemiallista pysyvyyttä.

Pystyöjanauhojen ominaisuuksien hyväksyttävät arvot sekä ominaisuuksien määrittäminen laadunvalvonnassa on esitetty taulukossa 2.

Tyyppitarkastustuloksissa esitettyjä suodatinteknisesti vaikeita maalajeja ovat lähinnä keski- ja karkeat siltit sekä hieno hiekka (esim. välikerroksissa), jotka ovat vähäisen koheesion vuoksi herkkiä sisäiselle eroosiolle. Suodatinteknisesti vaikeita voivat olla myös hyvin suhteistuneet kitkamaalajit, joissa voi tapahtua huuhtoutumista karkeammasta raerungosta.

2.3 Nauhojen laadunvalvonnan menettelytavat

Pystyöjanauhojen laadunvalvonnan tarkoituksena on varmistaa, että ojituksessa käytetään vain laatuvaatimukset täyttävää, suunnitelman mukaista ojanauhaa. Laadunvalvonta sisältää kaksi päävaihetta. Nauhan tyyppitarkastuksessa tutkitaan, täyttääkö nauha kaikilta osiltaan taulukossa 2 esitetyt laatuvaatimukset. Hankekohtaisessa laadunvalvonnassa varmistetaan, että työmaalle toimitettu tuote on tyyppitarkastettu ja täyttää asetetut laatuvaatimukset jokaisen toimituserän osalta.

Nauhan tyyppitarkastus tehdään riittävän aikaisin ennen ojituksen aloittamista, jotta tulosten perusteella voidaan valita kohteeseen parhaiten soveltuva pystyöjanauhatyyppi. Tyyppitarkastukseen liittyvät testaukset tekee rakennuttajan hyväksymä puolueeton tutkimuslaitos, joka myös ottaa tarvittavat nauhanäytteet maahantuojan tai urakoitsijan varastosta.

NAUHAPYSTYÖJIENTEN VALINTA

| OMINAISUUS | SYMBOLI | YKSIKKÖ | VAADITTU ARVO | | KOKEIDEN TEKEMINEN JA LUKUMÄÄRÄ | |
|---|---------------------|---------|--|--------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | | | keskiarvo | vähimmäisarvo | tyyppi-tarkastus | hankekohtainen laadunvalvonta |
| Ojanauha | | | | | | |
| 1 Massa | M_o | g/m | nim. | nim.-10% | ≥ 10 | 3-N |
| 2 Leveys | B | mm | nim. | nim.-5% | 10 | 3-N |
| 3 Paksuus (20 kPa) | T_{20} | mm | nim. | nim.-10% | ≥ 10 | 5-N |
| 4 Paksuus (125 kPa, 30 d) | T_{125} | mm | $0,7 \cdot T_{20}$ | $0,7 \cdot T_{20}$ | 3 | 2 ei |
| 5 Kokoonpuristuma (125 kPa) välillä 30d - 60 d | $\Delta T_{125,30}$ | mm/30d | <0,05 | <0,1 | 3 | 2 ei |
| 6 Vetolujuus (kuiva = k) | P_{u1} | kN | 1,0 | 0,9 | 5 | 2 ei |
| 7 Vetolujuus (märkä = m) | P_{u2} | kN | 1,0 | 0,9 | 5 | 2 ei |
| 8 Murtovenymä (k) | ϵ_{u1} | % | 15 (30) ¹ | 15 | 5 | 2 ei |
| 9 Murtovenymä (m) | ϵ_{u2} | % | 15 (30) ¹ | 15 | 5 | 2 ei |
| 10 Vetolujuus taivutettuna (m) | P_{tb} | kN | 2,0 | 1,8 | 2 | 1 ei |
| Suodatin | | | | | | |
| 11 Paksuus (4 kPa) | T_g | mm | nim. | nim.-10% | ≥ 10 | 5-N |
| 12 Vetolujuus pitkitt. (m) | P_{u3} | kN/m | 3,0 | 3,0 | 5 | 2 ei |
| 13 Vetolujuus poikitt. (m) | P_{u4} | kN/m | 3,0 | 3,0 | 5 | 2 ei |
| 14 Murtovenymä pitkitt. (m) | ϵ_{u3} | % | 15 (30) ¹ | 15 | 5 | 2 ei |
| 15 Murtovenymä poikitt. (m) | ϵ_{u4} | % | 15 (30) ¹ | 15 | 5 | 2 ei |
| 16 Sauman vetolujuus poikitt. (m) | P_{u5} | kN/m | 1,5 | 1,5 | 5 | 2 ei |
| 17 Saumall. suodattimen poikitt. ja leikkausmurtovenymä (m) | ϵ_{u5} | % | 10 | 10 | 5 | 2 ei |
| Vedenjohtokyky T = 20 °C, 125 kPa | | | | | | |
| 18 I = 0,33 (Δh = 100 mm) | Q_{w1} | ml/s | 10 | 8 | 3 | |
| 19 I = 0,67 (Δh = 200 mm) | Q_{w2} | ml/s | 10 | 8 | 3 | |
| Suodattimen vedenläpäisevyys, T = 20 °C | | | | | | |
| 20 k, Δh = 30 mm | k_1 | mm/s | 50 k_{maa} | 0,10 | 3 | |
| 21 k, Δh = 50 mm | k_2 | mm/s | 50 k_{maa} | 0,10 | 3 | |
| 22 permittiivisyys, v = 10 mm/s | ϕ_1 | l/s | 0,0050 | 0,0050 | 3 | |
| Suodattimen maa-aineksen pidätyskyky | | | | | | |
| 23 Tehokas huokoskoko | $O_{90}(D_w)$ | mm | $O_{90} < 0,15$) ² , | | 3-4 | 2 ei |
| 24 Tehokas huokoskoko | O_{95} | mm | $O_{90} < 0,15$ ja) ³ $O_{90} < d_{85maa}$) ³ | | 3-4 | |
| | | | $O_{90} < (1,5 - 2,8)d_{50maa}$) ⁴ | | | |

nim. nimellisarvo, hankekohtaisessa laadunvalvonnassa vertailuarvona on tyyppitarkastuksen mukainen arvo tai nimellisarvo
N näytteiden lukumäärä

ei kokeet tehdään vain, kun ojanauhan laadun arvioidaan huomattavasti poikkeavan tyyppitarkastuksen mukaisesta laadusta

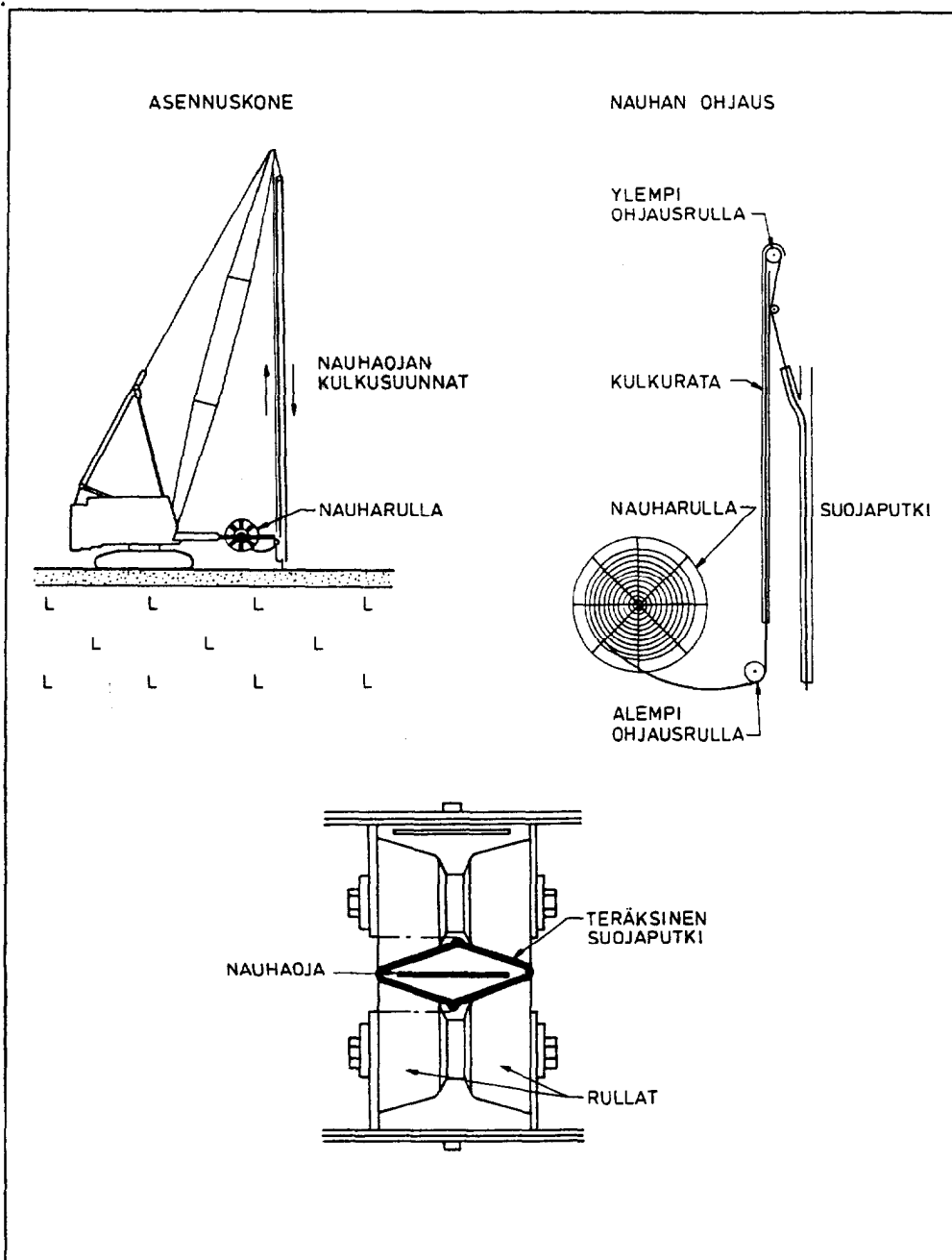
¹ kun pystyöjä on alttiina routimiselle
² suodatusteknisesti tavallisissa maalajeissa
³ suodatusteknisesti vaikeissa silttimaalajeissa
⁴ suodatusteknisesti vaikeissa maalajeissa: lähinnä keski- ja karkeat siltti-maalajit

Taulukko 2: Pystyöjanauhojen laatuvaatimukset (TIEL 3200057)

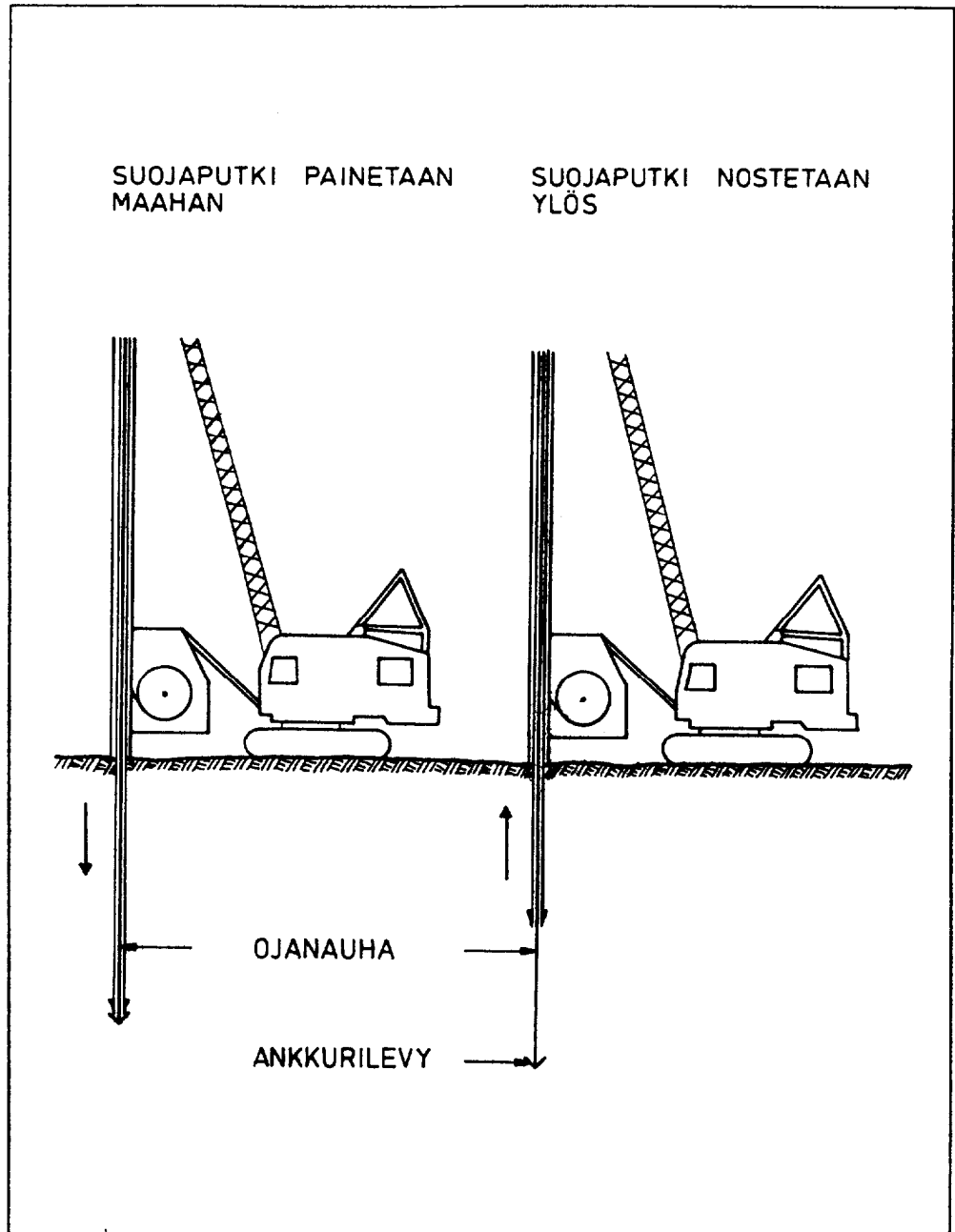
3 ASENNUSKONEET JA RAKENTAMISTEKNIikka

3.1 Asennuskoneet ja asennustekniikka

Suomessa käytetään nauhapystyöjien asentamiseen tavallisesti tähän tarkoitukseen muunneltua paalutuskalustoa ja joissakin tapauksissa erityisesti tähän tarkoitukseen rakennettua kalustoa. Asennuskoneen rakenne on esitetty kuvassa 4 ja asennustekniikka kuvassa 5. Tavanomaisella Suomessa käytettävällä kalustolla pystyöjien pituus on yleensä enintään 20 metriä.



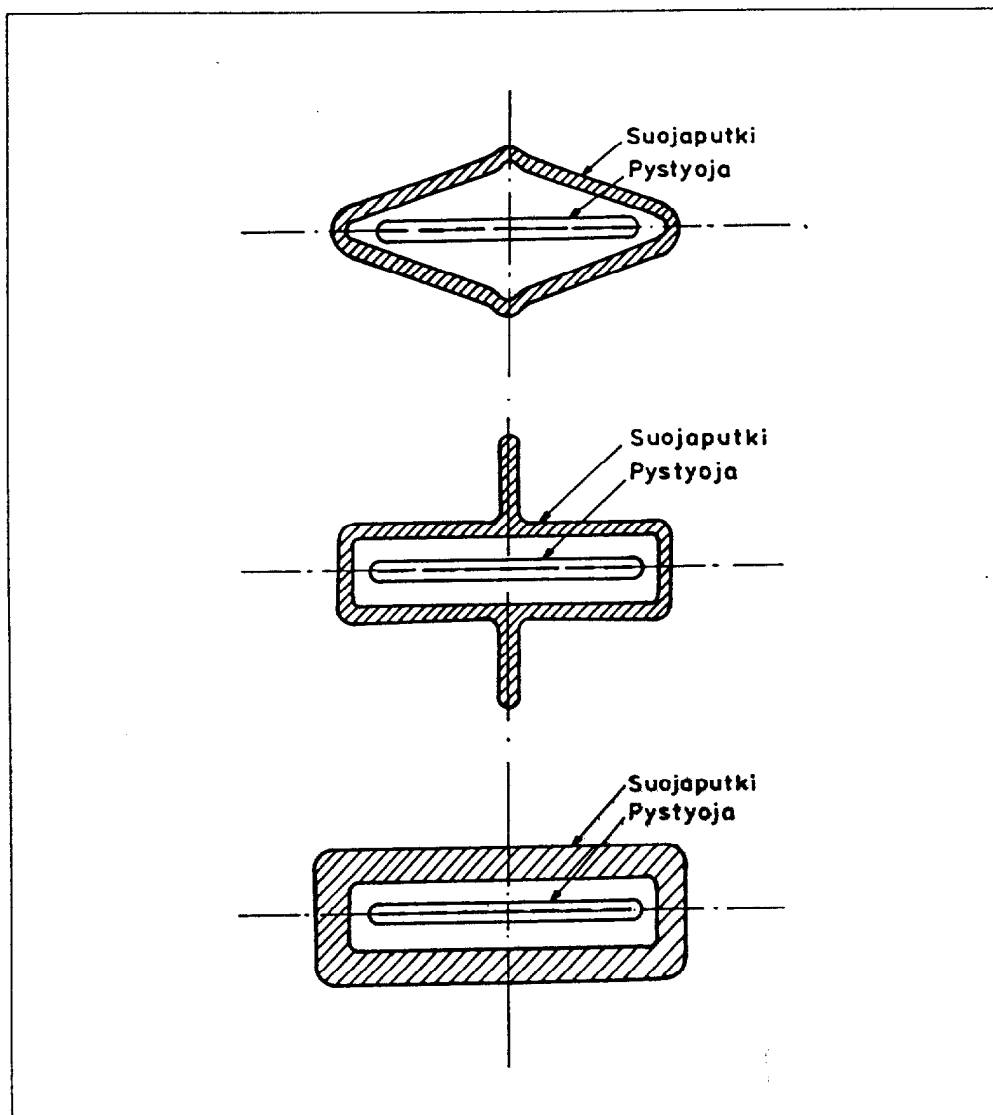
Kuva 4: Nauhapystyöjien asennuskone



Kuva 5: Nauhapystyöjien asennus

Asennettaessa nauhapystyöjia voimajohtolinjojen tms. läheisyydessä noudatetaan ko. linjoja koskevia turvaetäisyyksiä.

Pystyöjanauha syötetään yleensä rullien ohjaamana yläkautta suoja-putkeen (kuva 4), mikä painetaan nykyään tavallisesti hydraulisesti maahan (kuva 5). Suoja-putket ovat tavallisesti suorakaiteen tai vinoneliön muotoisia (kuva 6). Maan tunkeutuminen suoja-putkeen asennuksen yhteydessä estetään tavallisesti ankkurilevyn tai ankkuritangon avulla (kuva 7). Erilaisten ankkurilevyjen ja -tankojen päätarkoituksena on kuitenkin kiinnittää pystyöjanauha haluttuun asennussyvyyteen.

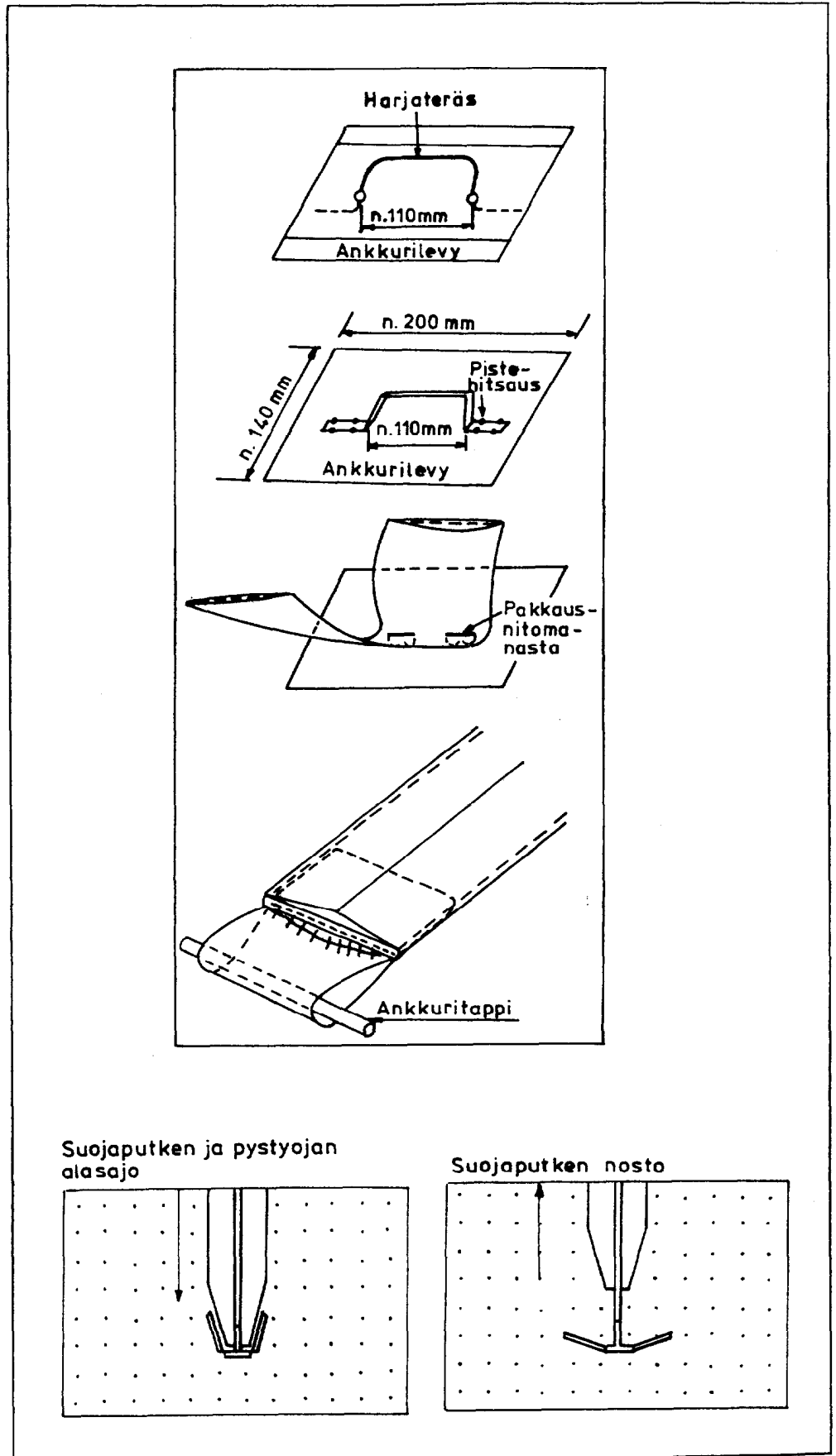


Kuva 6: Tyypillisiä suojaputken poikkileikkauksia

Suojaputken poikkileikkausala ja ankkurilevyn pinta-ala pyritään minimoimaan maapohjan häiriintymisen takia. Muotoilemalla suojaputken alapäästä sopivasti (kuva 7) voidaan myös toisaalta vähentää maapohjan häiriintymistä ja toisaalta varmistaa ankkurin pysyvyyttä halutussa syvyydessä. Ankkuroinnin kannalta vaikeissa pohjasuhteissa voidaan ankkurilevyjä vähän suurentaa tai kokeilla kiinnittymistä erilaisilla ankkureilla ja/tai työtavoilla.

Pystyojanauhat kiinnitetään ankkuriin nitomalla tms. helpolla ja nopealla tavalla. Ojanauhan kiinnityksen tulee kestää 1 kN:n (100 kp:n) lyhytaikainen vetovoima irtoamatta (sama kuin ojanauhan vetolujuus).

Pystyojanauhaa voidaan myös jatkaa, jolloin jatkoksen tulee vastata mahdollisimman hyvin toiminnaltaan jatkamatonta nauhaa. Suositeltava jatkoksen tekotapa on asentaa nauharullan loppupää uuden rullan sisään noin 200 mm:n matkalta mieluiten leikkaamatta suodatinta sivulta auki. Kiinnitys voidaan tehdä niittaamalla tasaisesti koko limitysalalta ja lisäksi tiivistäen suodattimen leikattu reuna tiheällä niittauksella. Niittauskoneen tehon tulee olla sopiva siten, että niitit eivät purista ydinosaa kokoon (Komulainen & Rathmayer 1992).



Kuva 7: Erilaisia pystyojanauhan ankkureita

Asennettu nauha leikataan poikki noin 0.2 metriä työskentelytason yläpuolelta, kuitenkin siten, että nauha ulottuu ojituserrokseen.

3.2 Pystyjoitusalueen rakennekerrokset ja kuivatus

Periaatekuva pystyjoitusalueen rakennekerroksista on esitetty kuvassa 8.

Työt aloitetaan poistamalla maan pinnalta humusmaakerros. Maapohjaa leikataan tämän jälkeen suunnitelmissa osoitettuun syvyyteen.

Suunnitelmissa osoitettu syvyys mitoitetaan siten, että lopullisen painuneen rakenteen kerrospaksuus on (laskelmiin liittyvä epävarmuus huomioon ottaen) vähintään suunnitellun, kantavuus- ja routamitoitukseen perustuneen rakennekerrospaksuuden mukainen. Pehmeillä savikoilla humusmaakerroksen poisto on yleensä riittävä, koska painuneet pengermassat toimivat jossakin määrin lopullisen rakenteen rakennekerroksina.

Leikkauspohjalle asennetaan suodatinkangas (kl II...III riippuen ojituserroksen materiaalista ja arvioiduista painumista), ja tämän päälle rakennetaan ojituserros, mikä toimii samalla pystyjoituskoneen alustana. Ojituserroksen paksuus on 0.3...0.6 metriä riippuen maapohjan pehmeystä ja arvioiduista painumista. TYLT:ssä oletusarvo on 0.5 metriä.

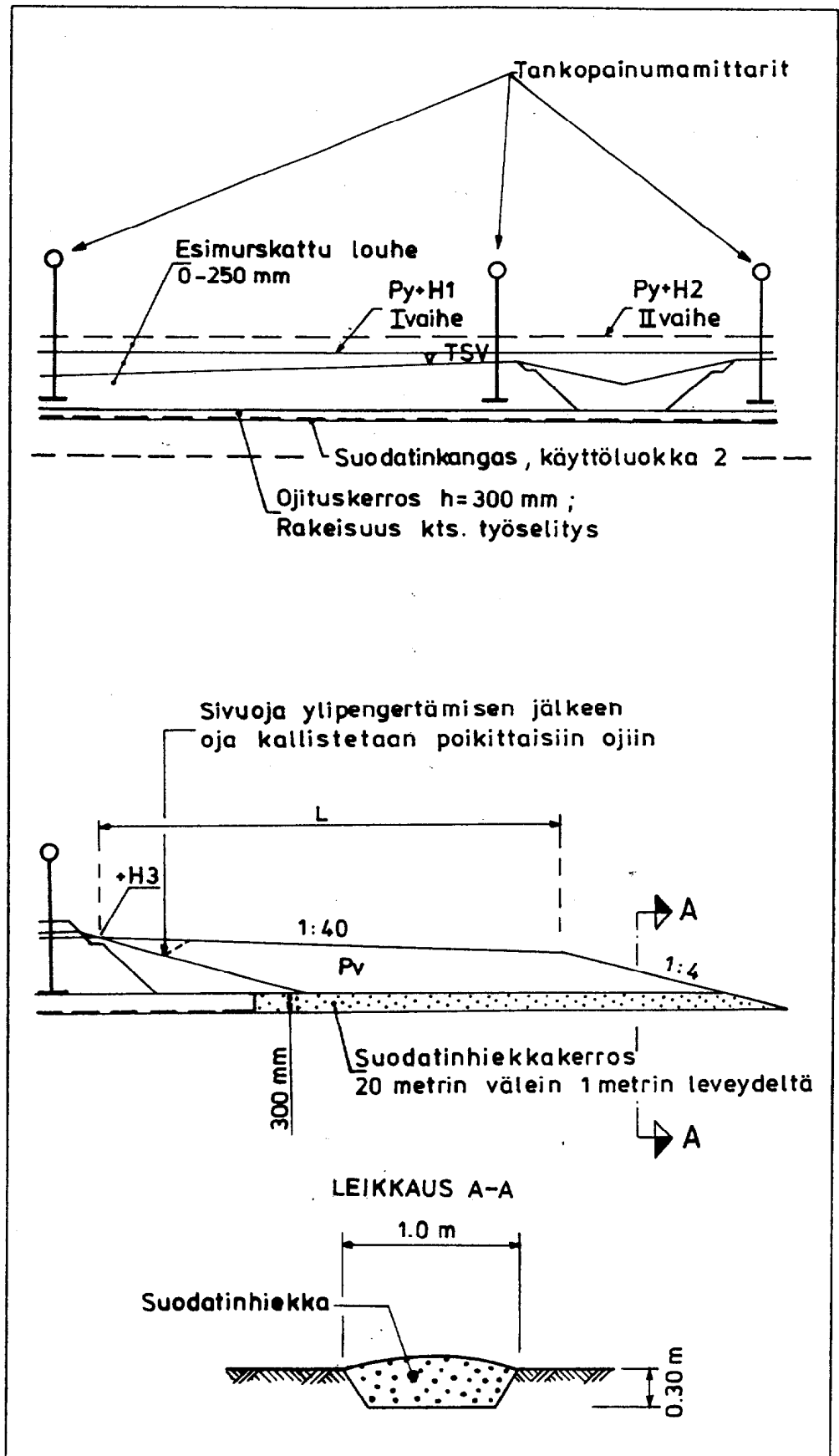
Ojituserroksen materiaalina voidaan käyttää jakavan soraa tai suodatinkerroksen hiekkaa ($d_{10} > 0.074$ mm). Materiaali valitaan siten, että se on pystyjoituskaluston suojaputkella läpäistävissä.

Ojituserroksen materiaalina voidaan käyttää myös kalliomursketta KaM 4 - 50 mm (hienoaines seulotaan pois), jolloin suodatinkankaan käyttöluokka on III.

Jos maapohja on hyvin pehmeää ja painumat arvioidaan suuriksi, penkereen toimintaa ja painumien tasaisuutta voidaan varmistaa asentamalla ojituserroksen yläosaan geolujite. Pystyjojat rakennetaan ennen geolujitteen levitystä. Geolujitteen tehtävänä on tasata pohjamaan ja pengermateriaalin epähomogeenisuudesta sekä pengerrysvaiheesta aiheutuvia epätasaisia painumia ja estää pengerrysvaiheessa varmuuskertoimen paikallisesta tai tilapäisestä alentumisesta aiheutuvia plastisia siirtymiä.

Ojituserrokseen suotautuvat vedet johdetaan tien poikkisuunnassa vastapengeralueen ulkopuolelle kuvassa 8 esitettyjen hiekkasalaojien avulla. Hiekkasalaojat (poikkileikkauspinta-ala 0.2...0.5 m²) rakennetaan vastapengeroiden alle tien pituussuunnassa noin 20 metrin välein ja kallistetaan vastapengeralueen ulkopuolella oleviin purkuoijiin päin. Hiekkasalaojien materiaalina käytetään suodatinhiekkää tai ojituserroksen materiaalia, jolloin salaojat tulee ympäröidä suodatinkankaalla.

Jos odotettavissa olevat painumat ovat suuria, ojituserroksen kuivatus varmistetaan ojituserroksen alaosaan rakennettujen muovisalaojien avulla. Salaojat rakennetaan tien pituussuuntaan ja varmistetaan muutamilla poikkittaisilla yhteyksillä. Salaojien purku järjestetään maastollisesti alimpaan kohtaan vastapengeralueen ulkopuolelle siten, että kuivatus toimii pystyjoituskoneen painumisen aikana. Vastapengeralueen kohdalla muovisalaoja ympäröidään em. hiekkasalaojalla.



Kuva 8: Periaatekuva pystyöjitusalueen rakennekerroksista

Ojituskerroksen päälle rakennetaan painuma-aikainen pengeri kitkamaasta, murskeesta tai pienlouheesta (lohkarekoko < 300 mm).

Tapauskohtaisesti ja erityisesti jos painumat arvioidaan pieniksi kannattaa painuma-aikainen pengeri rakentaa valmiiksi tien jakavan kerroksen vaatimusten mukaan niiltä osin joissa se toimii tien lopullisena rakenteena.

Vastapenkereet rakennetaan suunnitelmien mukaan siten, ettei suunnitelmassa esitettyä painuma-aikaisen penkereen ja vastapenkereen välistä korkeuseroa ylitetä.

Painuma-aikaisen penkereen ja vastapenkereen väliin ei rakenneta työnäkaisia kuivatusoja vaan valuedet hoidetaan vastapenkereen kallistuksilla vastapengeralueen ulkopuolella sijaitseviin ojiin. Näiden ojien sijainti ja syvyys tulee ottaa huomioon pystyöjituskentän suunnittelussa.

Painuma-ajan loputtua ylipenger puretaan ja tien rakennekerrokset rakennetaan suunnitelmien mukaisesti. Vastapenkereet puretaan suunnitelmasa esitetyllä tavalla tai vastapengeralue muotoillaan tarvittaessa maastoon sopivaksi. Tien lopullisten sivuojien sijainti ja syvyys tulee ottaa huomioon pystyöjituksen mitoituksessa ja pystyöjituksen suunnittelussa.

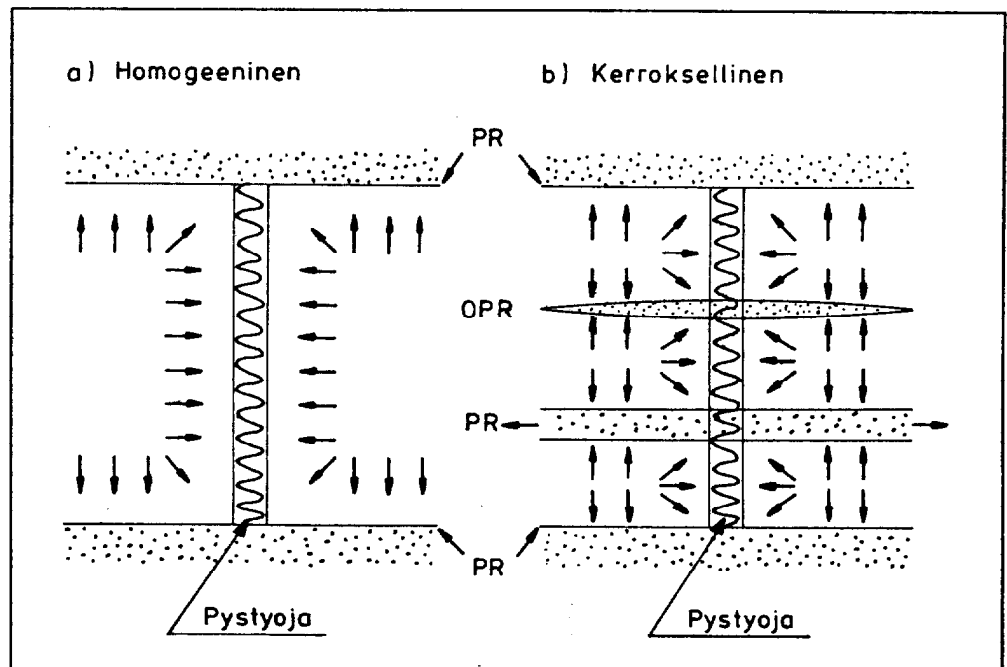
Jos pystyöjitus tehdään talviolosuhteissa, on huolehdittava, ettei hiekan joukossa ole lunta tai jäätä sekä että suodatin ja ojat eivät ole jäässä, kun pengeri rakennetaan pystyöjituksen päälle.

4 MAASTO- JA LABORATORIOTUTKIMUKSET

4.1 Tutkimusten tarkoitus ja menetelmät

Maasto- ja laboratoriotutkimusten tarkoituksena on selvittää tarpeelliset lähtötiedot pystyöjaken­tän suunnittelua varten (Rathmayer 1986, Holtz et al 1991):

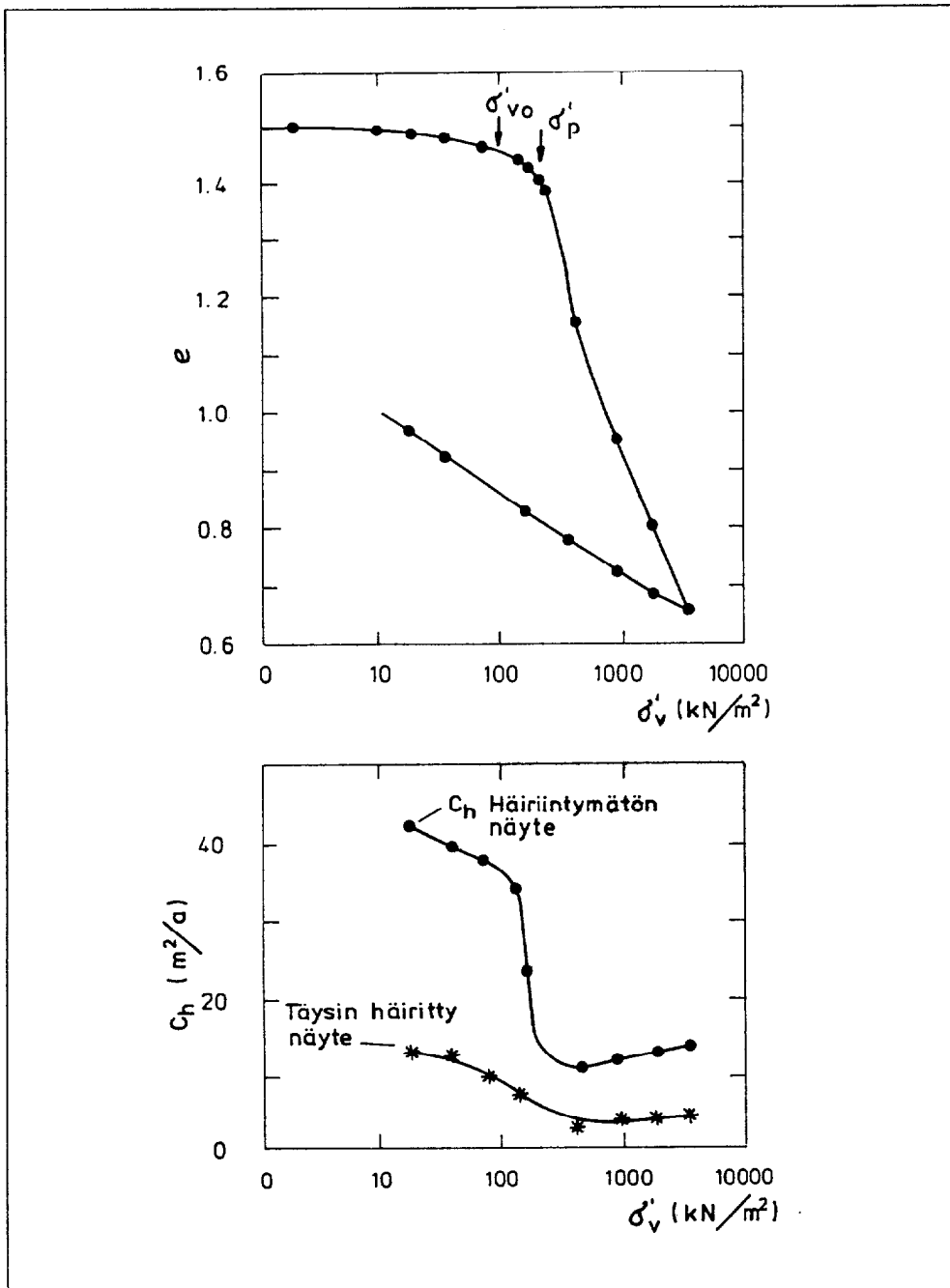
- (1) Maan kerrosrakenne ja maakerrosten paksuus.
- (2) Pohjavedenpinnan taso ja vaihtelurajat.
- (3) Huokosveden ylipaineen purkautumisreitit kokoonpuristuvista kerroksista ja huokosylipaineen purkureunat (kuva 9).



Kuva 9: Huokosveden ylipaineen purkautumisreitit pystyöjitetuista kokoonpuristuvista kerroksista

a) Homogeeninen, b) kerroksellinen maapohja. PR purkureuna, OPR osittainen purkureuna, kun linssit pystyöjien kohdilla.

- (4) Kokoonpuristuvien maakerrosten jännityshistoria (esikuormitus σ_p , ylikonsolidoitumisaste OCR).
- (5) Kokoonpuristuvien maakerrosten lujuus- ja painumaparametrit (suljettu leikkauslujuus s_u , primaarisen sekä sekundaarisen konsolidaatiopainuman parametrit).
- (6) Kokoonpuristuvien maakerrosten konsolidaatio- ja vedenläpäisevyysominaisuudet sekä pysty- että vaakasuunnissa.
- (7) Häiriintymisen vaikutus konsolidaatio- ja vedenläpäisevyysominaisuuksiin sekä leikkauslujuuteen (kuva 10) tarvittaessa. Näillä lähtötiedoilla pyritään kuvaamaan pystyöjien asennuksen vaikutuksia pystyöjaken­tän toimintaan.



Kuva 10: Esikuormituksen ja häiriintymisen vaikutus konsolidaatiokertoimeen.

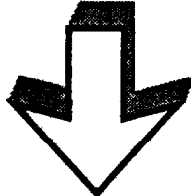
Lisäksi, jos oja-pituudet ovat hyvin suuria, saattaa olla tarpeellista varmistaa laboratorioissa ojien purkukapasiteetti q_w vaakasuoran maanpaineen ja ajan funktiona.

Edelläolevasta listasta selvitetään kohdat (1) ja (3) yleensä kairauksin, (2) pohjavesiputkilla tai huokospainemittauksilla ja kohdat (4)...(7) laboratorio- ja tarvittaessa in situ-mittauksin. Jos pystyöjityskohde on laaja, kentän tulevaa toimintaa saattaa olla aiheellista varmistaa etukäteen rakennetun instrumentoidun koepenkereen avulla (taulukko 3), jolloin kohdat (4)...(7) voidaan tarkistaa yhdessä em. tutkimusten kanssa koepenkereen seuranta-mittauksista tehdyn tulokannan avulla (Holtz et al 1991, Leroueil et al 1990).

Taulukossa 3 on esitetty suositus perustutkimusten lisäksi tehtävistä tutkimuksista. Suosituksessa esitettyjen in situ tutkimusten teko edellyttää suunnittelijan harkintaa, koska ko. kokeiden käytöstä suomalaisissa pohjasuhteissa tarvitaan tällä hetkellä vielä lisää käytännön kokemuksia (luku 4.4).

Painumattomiin rakenteisiin (esim. paalutus, syvästabilointi) liittyvät pystyöjäsentien osat ovat teknisesti vaativia kohteita.

Taulukko 3: Suositus pystyöjäsentien toiminnan ennustettavuuden parantamiseksi. Tutkimustavat perustutkimusten (kairaukset, häiriintymättömät näytteet) lisäksi.

| | Painuva kerrostuma | |
|--|--|---|
| | homogeeninen | kerroksellinen |
| Pienet ja/tai helpot kohteet | c_h (laboratorio) | c_h (laboratorio) dissipaatiokokeet |
|  | c_h (laboratorio) dissipaatiokokeet | k_h (in situ) + M (laboratorio) dissipaatiokokeet |
| | k_h (in situ) + | k_h (in situ) + |
| Suuret ja/tai vaikeat kohteet | M (laboratorio) dissipaatiokokeet koepenger, tapauskohtaisesti | M (laboratorio) dissipaatiokokeet koepenger |

c_h vaakasuora konsolidaatiokerroin

k_h vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin

M kokoonpuristuvuusmoduuli (pystysuunnassa)

Dissipaatiokokeet: Huokospainesondi tai CPTu-Relax (luku 4.4).

4.2 Kairaukset

Tavallisimmat, pystyöjituskohdetta suunniteltaessa käytetyt kairaukset ovat seuraavat:

- Painokairaukset
- Siipikairaukset
- Mäntäkairaukset (häiriintymättömien näytteiden ottoon)
- CPTu-kairaukset

Näistä CPTu-kairauksilla voidaan korvata tai täydentää painokairauksia. CPTu-kairausten käyttö on erityisen suositeltavaa kerroksellisessa maaperässä huokosylipaineen purkautumisreittien määrittämistä varten.

Kairausten yhteydessä on tärkeää asentaa pohjavesiputkia kohteen eri osiin. Asentamisen yhteydessä otetaan tavallisesti myös maanäytteet vettä johtavista kerroksista laboratoriotutkimuksia varten.

Vaativissa kohteissa tarvitaan myös huokospainemittauksia.

4.3 Laboratoriotutkimukset

Tavallisimmat laboratoriotutkimukset ovat seuraavat:

- Indeksiominaisuuksien määrittäminen:
 - tilavuuspaino, vesipitoisuus, hienousluku, kartiolujuus
 - rakeisuus, humuspitoisuus
 - juoksuraja, plastisuusraja
- Ödometrikokeet:
 - portaittaiset standardikokeet (24 h)
 - CRS-kokeet (constant rate of strain)

CRS-kokeita käytettäessä konsolidaatiojännitys redusoidaan tielaitoksen hyväksymällä tavalla. Suositeltava tapa varmistaa redusoinnin oikeellisuus on tehdä muutamia rinnakkaisia kokeita portaittaisina standardikokeina.

Sekundaaripainuman parametrien määrittämiseksi painuvista kerroksista on aiheellista tehdä myös muutamia pitkäaikaisia (>1...3 vrk) portaittaisia ödometrikokeita.

Vaakasuora konsolidaatiokerroin c_h määritetään tavallisesti ns. vaakasuuntaisella ödometrikokeella. Koetyypin ja -tavan tulee tällöin olla samanlainen kuin pystykokeessa, jotta tulosten vertailu ja tulkinta olisi mielekästä. Vaakasuora konsolidaatiokerroin voidaan määrittää myös kolmiakselikokeella.

Pysty- ja vaakasuuntainen vedenläpäisevyyskerroin lasketaan pysty- ja vaakanäytteistä tehtyjen ödometrikokeiden tuloksista seuraavien kaavojen avulla (katso myös kaava 5.5):

$$c_v = k_v M / \gamma_w, \quad k_v = c_v \gamma_w / M \quad (4.1)$$

$$c_h = k_h M_h / \gamma_w, \quad k_h = c_h \gamma_w / M_h \quad (4.2)$$

γ_w veden tilavuuspaino

c_v, c_h konsolidaatiokerroin pysty- ja vaakasuunnassa

k_v, k_h vedenläpäisevyyskerroin pysty- ja vaakasuunnassa

M, M_h kokoonpuristuvuusmoduuli pysty- ja vaakasuunnassa

Saven lujittumiskokeet (suljetun leikkauslujuuden kasvu) tehdään usein kartiokokeina ödometrissa konsolidoiduista rinnakkaisista näytteistä (Tanska 1993), kolmiakselikokeina tai leikkauskokeina (Leroueil et al 1990).

4.4 In situ-kokeet

Pystyöjakenttien suunnittelussa on in situ-kokeiden pääasiallisena tarkoituksena saada aikaan mahdollisimman luotettavia vaakasuoran vedenläpäisevyyškertoimen k_h ja vaakasuoran konsolidaatiokertoimen c_h arvoja koko painuvasta makrostruktuurista. Tällä hetkellä Suomessa käytettyjä in situ-kokeita ovat vedenläpäisevyys- ja dissipaatiokokeet, jotka tarvitsevat kuitenkin rinnalleen näytteenottoa ja laboratoriotutkimuksia.

(1) Vedenläpäisevyyskokeet (piezometers) (k_h :n määrittäminen):

Vakiopainekokeet

Muuttuvapainekokeet

(2) Dissipaatiokokeet (c_h :n määrittäminen):

Huokospainekairaus

CPTu-Relax-kokeet

Puristinkairaus huokospainemittauksella, joka tehdään pysäyttämällä kaira koesyvyyteen ja mittaamalla huokospaineen pieneneminen

Lisäksi kansainvälisessä käytössä on erityisesti tutkimustarkoituksia varten mm. itsepöraavia vedenläpäisevyyskojeita (self-boring permeameters) ja itsepöraavia pressometrejä (self-boring pressuremeters).

In situ-kokeiden käytöstä suomalaisissa oloissa tarvitaan lisää tutkimuksia.

Koepenkereiden yhteydessä tarvittavista in situ-mittauksista ja mittaustulosten tulkinnasta ovat ohjeita esittäneet mm. Leroueil et al 1990 ja Holtz et al 1991.

5 PYSTYOJAKENTÄN SUUNNITTELU

5.1 Yleistä

Pystyöjakentän suunnittelu aloitetaan suunnittelukohteen pohja- ja laboratoriotutkimusten inventoinnilla ja laskentapoikkileikkausten valinnalla. Laskentapoikkileikkauksen materiaaliparametrit (luku 4) kootaan yhteen ja havainnollistetaan graafisesti (katso esim. RIL Geomekaniikka I s. 211) kerrosrajojen ja eri kerrosten laskentaparametrien valintaa varten.

Seuraavaksi selvitetään maapohjan ominaisuuksien vaikutus pystyöjanauhojen valintaan (luku 2) ja nauhojen asennuksen aiheuttamat ehdot mitoitukselle:

- Suojaputkelle ja ankkurilevyille suositellaan maksimikoko maapohjan häiriintymisen pienentämiseksi.
- Suojaputken tärytystä ei sallita asennusvaiheessa.
- Häiriintyneen vyöhykkeen laajuus arvioidaan mitoitukselaskelmia varten (luku 5.7.4).
- Selvitetään kaluston mahdollisesti aiheuttamat erityisehdot pystyöjanauhojen sijoitukselle (neliö-/kolmioverkko).

Pystyöjaväli ja esikuormituksen suuruus sekä vastapenkereiden leveys ja korkeus mitoitetaan luvuissa 5.3...5.8 esitettyjen ohjeiden ja luvun 9 mitoitusesimerkin mukaisesti:

- Käytävissä oleva esikuormitusaika tulee selvittää ja varmistaa hyvissä ajoin ennen mitoitukselaskelmia.
- Vastapenkereille käytävissä oleva tila ja ko. tilaan kohdistuvat rajoitukset sekä pengeri- ja vastapengermassojen saatavuus ja materiaalivaatimukset vaikuttavat sekä pystyöjitusvaihtoehdon valintaan että myös mitoitukseen.
- Pystyöjakentän liittyessä painumattomiin rakenteisiin tulee kiinnittää erityistä huomiota mitoitukseen ja erityisesti jälkipainumien arviointiin.
- Keskimääräiseksi konsolidaatioasteeksi pyritään saamaan vähintään $U = 75...90$ % jokaisessa kuormitusportaassa.

5.2 Mitoituksen teoreettiset perusteet

Vedellä kyllästynyttä maakerrosta koskevat konsolidaatiomallit perustuvat seuraaviin yleisiin lähtökohtiin:

- (1) Maa-alkion tasapainoyhtälöt
- (2) Muodonmuutosten yhteensopivuusehdot (kompatibiliteetti)
- (3) Huokosveden ja raerungon yhteistoiminta
- (4) Massan säilyminen
- (5) Huokosveden tilasuhteet
- (6) Huokosveden dynaaminen tasapaino

Lisäksi tarvitaan:

- (7) Raerungon jännitys-muodonmuutossuhde

Kohdat (1) ja (2) ovat kontinuumimekaniikan yleisiä lähtökohtia. Kohta (3) on tehokkaiden jännitysten periaate.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (5.1)$$

σ kokonaisjännitys
 σ' tehokas jännitys
 u huokosvedenpaine

Kohta (4) kuvaa veden virtauksen jatkuvuutta (jatkuvuusyhtälö). Kohta (5) on vuorosuhde huokosveden tiheyden, paineen ja lämpötilan välillä. Kohdan (6) yleinen formulointi tunnetaan epälineaarina Navier-Stokesin liikeyhtälöinä (Newtonin 2. liikelaki). Käytännöllisen ratkaisun kohdalle (6) on esittänyt Darcy.

$$\text{Darcyn laki: } v = k i \quad (5.2)$$

v veden nopeus
 k vedenläpäisevyyskerroin
 i hydraulinen gradientti

Darcyn lain soveltuvuusalueeksi on luonnontilaisilla pehmeillä savilla esitetty gradienttiväliä 0.1...50 (Holtz et al 1991). Pienemmän gradientin käsittelyä varten on ratkaisuksi esitetty ns. kynnygradienttia (Tsytoich 1976) ja eksponentiaalista muotoa (Hansbo 1993).

Raerungon jännitys-muodonmuutossuhde (kohta (7)) otaksutaan useimmissa konsolidaatioteorioissa lineaariseksi.

$$\sigma' = E \varepsilon \quad (5.3)$$

σ' raerungon tehokas jännitys
 ε muodonmuutos
 E kimmomoduuli tai muodonmuutosmoduuli

E esitetään käytännöllisissä laskelmissa usein kokoonpuristuvuusmoduulin M avulla. Kokoonpuristuvuusmoduuli määritetään laboratoriossa ödometrikokeilla.

Käytännölliset, sekä yleiset että myös pystyöjitykseen liittyvät konsolidaatiotratkaisut ovat perustuneet kohtien (6) ja (7) linearisointeihin. Epälineaariset ratkaisut, jotka ovat vahvasti kehittymässä, muodostetaan numeerisiin menetelmiin perustuvien tietokoneohjelmien avulla.

Pystyöjateoriat perustuvat edellä kohtien (1)...(7) avulla muodostettuihin differentiaaliyhtälöihin ja niiden ratkaisuihin:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = c_h \left(\frac{1}{r} \frac{\delta u}{\delta r} + \frac{\delta^2 u}{\delta r^2} \right) + c_v \left(\frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \right) \quad (5.4a)$$

Yhtälöiden lineaarisuudesta johtuen superpositioperiaate on voimassa ja pystysuuntaisen virtauksen vaikutus normaalitapauksessa vähäinen, jolloin voidaan keskittyä pelkästään radiaaliseen konsolidaatioon:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = c_h \left(\frac{1}{r} \frac{\delta u}{\delta r} + \frac{\delta^2 u}{\delta r^2} \right) \quad (5.4b)$$

u huokosylipaine
 t aika kuormituksen alusta
 r radiaalinen etäisyys keskiakselilta
 z syvyys

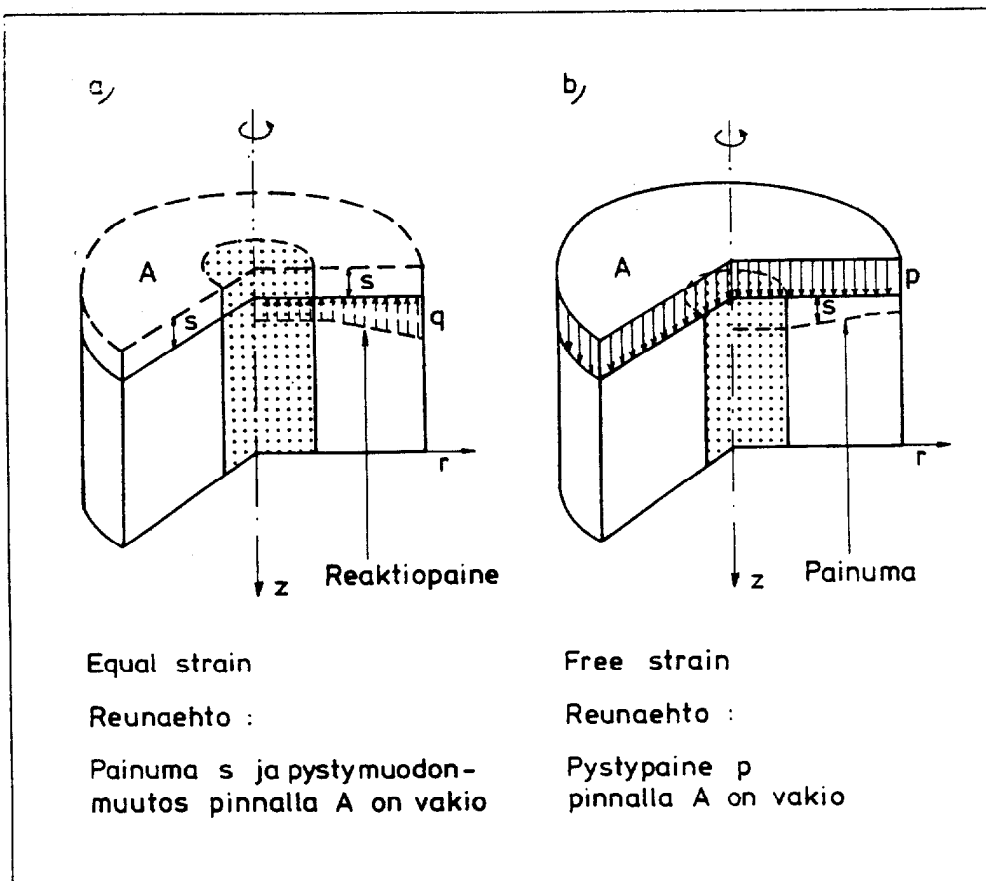
$$c_h = k_h M / \gamma_w \quad (5.5)$$

c_h vaakasuora konsolidaatiokerroin
 c_v konsolidaatiokerroin pystysuunnassa
 k_h vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin
 M kokoonpuristuvuusmoduuli ko. jännitysalueella

Kokoonpuristuvuusmoduuli M määritetään pystysuoraan kuormitetusta ödometrikokeesta ja c_h vaakasuoraan kuormitetusta ödometrikokeesta tai kenttäkokeista.

Yhtälö on mahdollista ratkaista suoraan kahta erilaista reunaehtotyyppiä käyttäen:

- Equal strain: Maapohjan painuma on sama ojien kohdalla ja niiden välissä - pystypaine maan pinnalla on epätasainen (kuva 11).
- Free strain: Pengerkuormasta aiheutuva pystypaine maan pinnalla on tasainen - maapohjan painuma on epätasainen (kuva 11).



Kuva 11: a) Equal strain: Muodonmuutos on vakio, b) Free strain: Pystypaine on vakio.

Differentiaaliyhtälön ratkaisuja ovat esittäneet

- Rendulic 1936, equal strain,
- Kjellman 1937, equal strain,
- Barron 1948, equal strain, free strain

Erilaiset equal strain-ratkaisut antavat riittävällä tarkkuudella saman tuloksen. Barronin free strain ratkaisu (Vesala 1990, Holtz et al 1991) tulee kysymykseen suuriläpimittaisilla hiekkapystyöjillä. Nauhapystyöjia mitoitettaessa ratkaisut ovat niin lähellä toisiaan, että käytetään mieluummin muodollisesti huomattavasti yksinkertaisempaa equal strain ratkaisua.

5.3 Pystyöjavälin mitoitus

Pystyöjan vaikutusalueen halkaisija D (kuva 12) lasketaan seuraavasta yhtälöstä (Hansbo 1981):

$$U = 1 - \exp(-8T / F(n)) \quad (5.6)$$

$$T_n = c_h t / D^2$$

$$F(n) = \ln(n) - 0.75$$

$$n = D / d$$

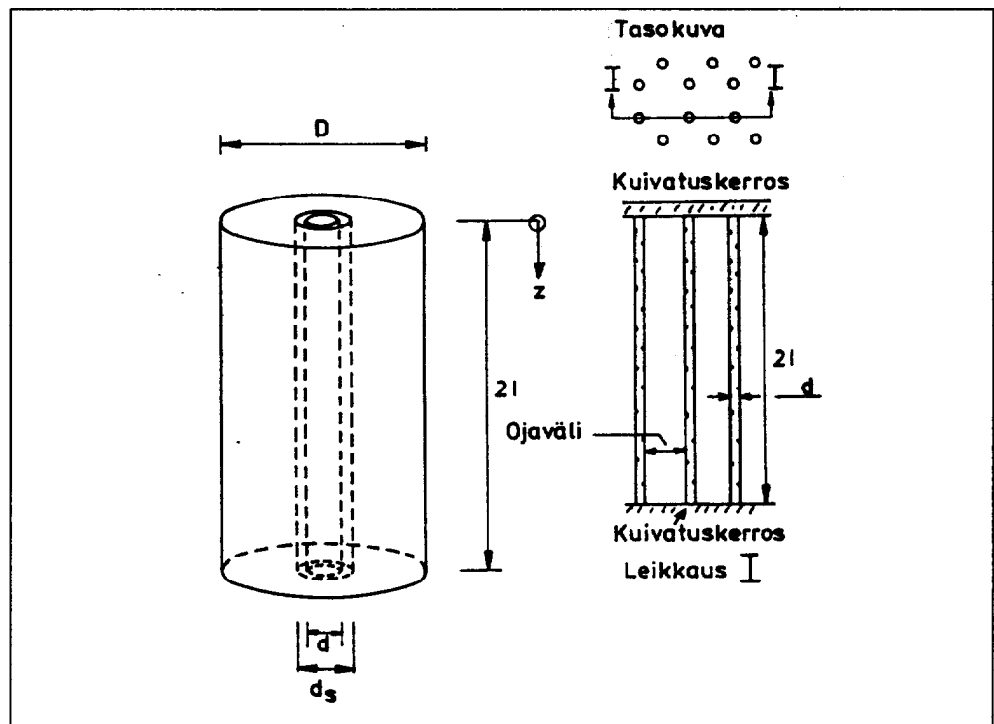
U keskimääräinen tarvittava konsolidaatioaste

T aikatekijä

t aika kuormituksen alusta, esikuormitusaika

D pystyöjan vaikutusalueen halkaisija

d pystyöjan ekvivalenttihalkaisija



Kuva 12: Pystyöjavälin mitoituksessa käytetyt merkinnät.

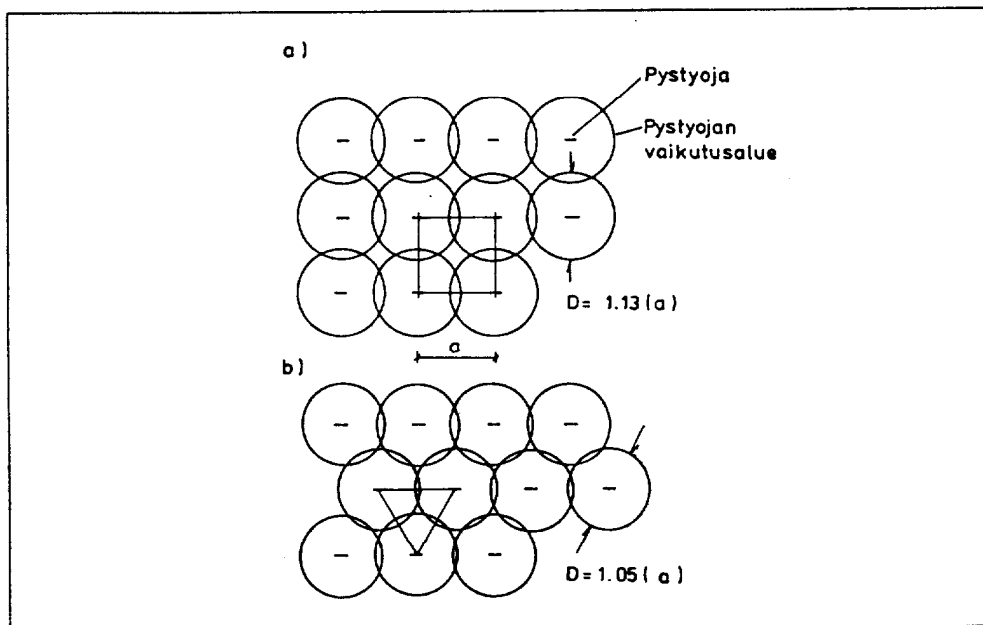
Pystyojan ekvivalenttihalkaisija voidaan määrittää seuraavasti:

$$d = 2(b + t)/\pi$$

b ojanauhan leveys

t ojanauhan paksuus

Pystyojaväli (a) määritetään pystyojan vaikutusalueen halkaisijan D avulla nelikulmioverkoille ja kolmioverkoille kuvan 13 avulla.



Kuva 13: Pystyojan vaikutusalueen halkaisija D pystyojavälin a funktiona
 a) nelikulmioverkossa, b) kolmioverkossa.

Huokosylipaine u ojien keskellä lasketaan seuraavasti:

$$u = u_0 \exp(-8 T_h / F_u(n)) \quad (5.7)$$

$$F_u(n) = \ln(n) - 0.5$$

$$u_0 = \gamma H \quad (\text{NK-savet})$$

γ penkereen tilavuuspaino

H penkereen korkeus

Kaavaa voidaan käyttää seurattaessa huokosylipaineen pienenemistä oja-verkon keskellä.

Ojien asentamisen yhteydessä tapahtuva maapohjan häiriintymisen vaikutus voidaan yhtälössä (5.6) ottaa huomioon muuttamalla termiä $F(n)$ seuraavaksi (Hansbo 1981):

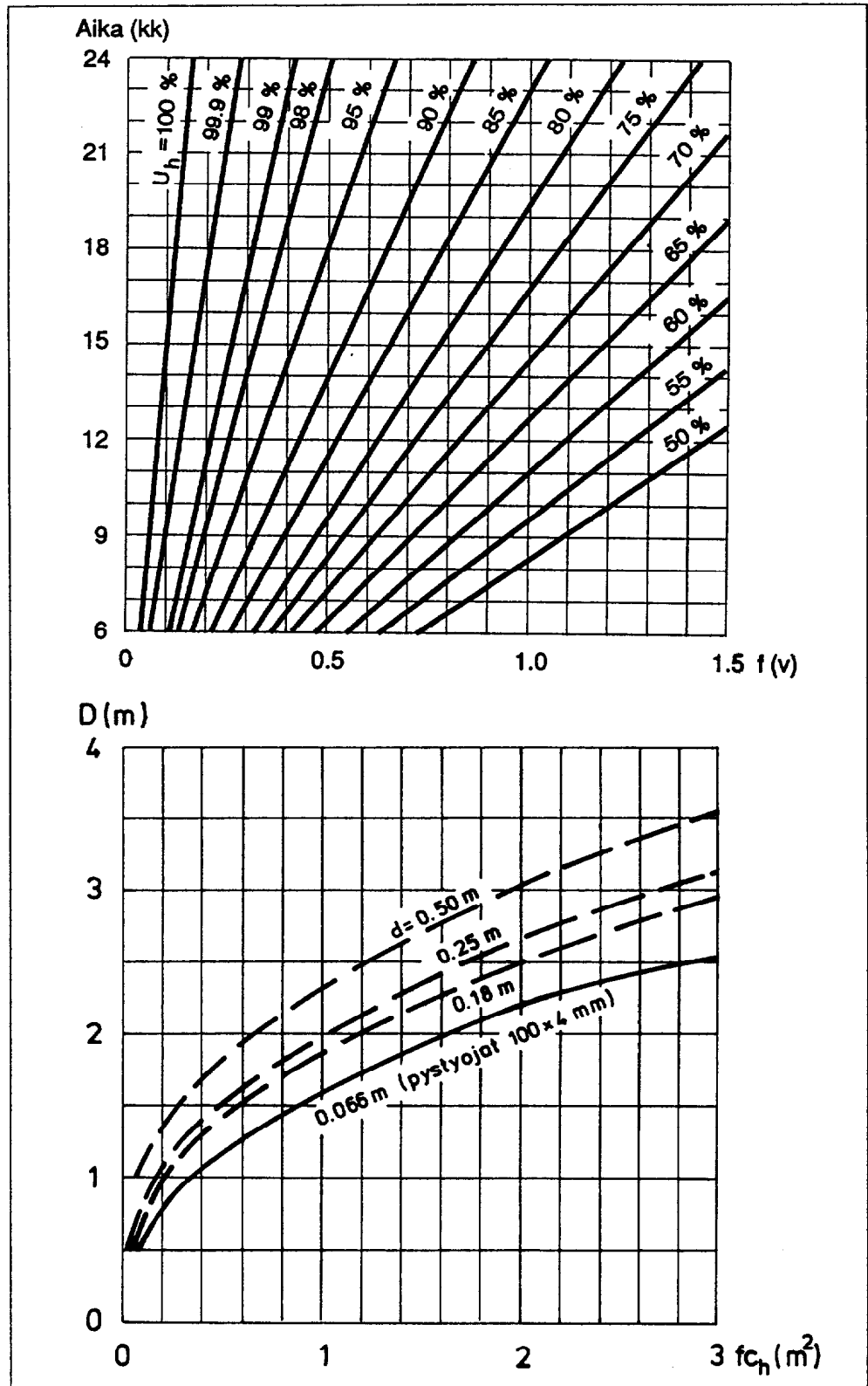
$$F(n) = \ln(n/s) + (k_h/k') \ln(s) - 0.75 \quad (5.8)$$

$$s = d_s / d$$

d_s häiriintyneen alueen halkaisija

k' häiriintyneen alueen vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin

Pystyojaväli voidaan mitoittaa myös kuvassa 14 esitetyn nomogrammin avulla (Hansbo 1990).



Kuva 14: Pystyöjavälin mitoitusnomogrammi (Hansbo 1990). $s = 2$ (häiriintyneen alueen halkaisija on 2 kertaa pystyöjan ekvivalenttihalkaisija), $k_h / k' = 2$ (häiriintyneen alueen vedenläpäisevyyskerroin k' on puolet häiriintymättömän maan vedenläpäisevyyskerroimesta k_h).
 Esimerkki: $U = 90\%$, $t = 18$ kk $\Rightarrow f = 0.65$
 $c_h = 0.8 \text{ m}^2/\text{a} \Rightarrow f c_h = 0.52 \Rightarrow D = 1.2 \text{ m}$ ($d = 0.066 \text{ m}$)

Pystyöjien virtausvastuksen vaikutus voidaan erittäin syvissä kohteissa (>20 m) ottaa myös huomioon yhtälössä (5.6). Termi $F(n)$ muuttuu tällöin seuraavaksi (Hansbo 1981):

$$F(n) = \ln(n/s) + (k_h/k') \ln(s) - 0.75 + \pi z (2l - z) k_h / q_w \quad (5.9)$$

l pystyöjan tehokas pituus

$l = L/2$ ojan alapää vettä johtavassa kerroksessa

$l = L$ ojan alapää vettä huonosti läpäisevässä kerroksessa

L pystyöjitusyvyys

z syvyys savikerroksen yläpinnasta

q_w pystyöjan virtauskapasiteetti pystysuunnassa gradientilla $i=1$
 q_w muuttuu sivupaineen (syvyyden) mukaan.

5.4 Esikuormituksen mitoitus

Esikuormituksen käytön tarkoituksena on saada aikaan hyvä tekninen ja taloudellinen ratkaisu, kun muuttujina on käytettävissä oleva esikuormitus aika, pystyöjaväli, siirrettävien pengert- ja vastapengermassojen kustannus ja lopputulokselle asetetut käyttöajan painumakriteerit. Esikuormituksen mitoitus on siten optimointitehtävä, jossa tulisi ottaa huomioon myöskin mitoituksessa käytettyjen materiaaliparametrien epävarmuus.

Pystyöjitettua maapohjaa kuormittava pengert voidaan jakaa kuvassa 15 esitetyllä tavalla kolmeen osaan:

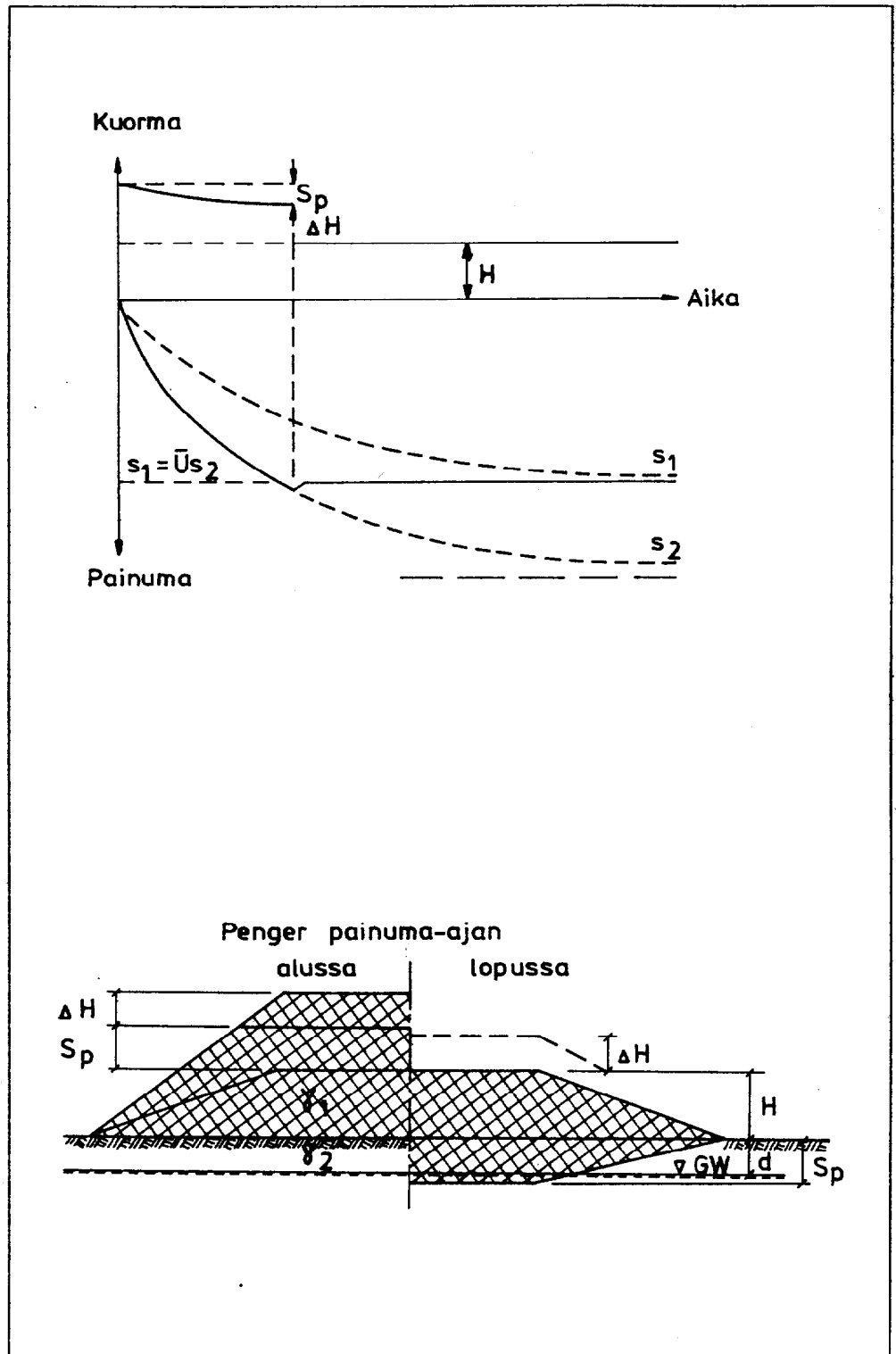
- (1) Lopullinen pengert. Tämän penkereen painumien tulee täyttää tielaitoksen julkaisussa "Tiegeotekniikan yleiset mitoituserusteet" TIEL 3200150 esitetyt käyttöajan painumakriteerit.
- (2) Painumavara. Pengert painuu painumavaran verran ennen tasapainon saavuttamista.
- (3) Ylipengert. Tämä pengert poistetaan esikuormitusajan loputtua.

Pystyöjavälin ja pystyöjitettua maapohjaa kuormittavan penkereen mitoitus ja optimointi voidaan tehdä edellisessä kappaleessa esitettyjen kaavojen avulla numeerista integrointia käyttäen (Vepsäläinen 1989). Seuraavassa esitetään yksinkertaisempi graafinen menetelmä, kun pengert rakennetaan täyteen korkeuteensa heti esikuormitusajan alussa (kuva 16).

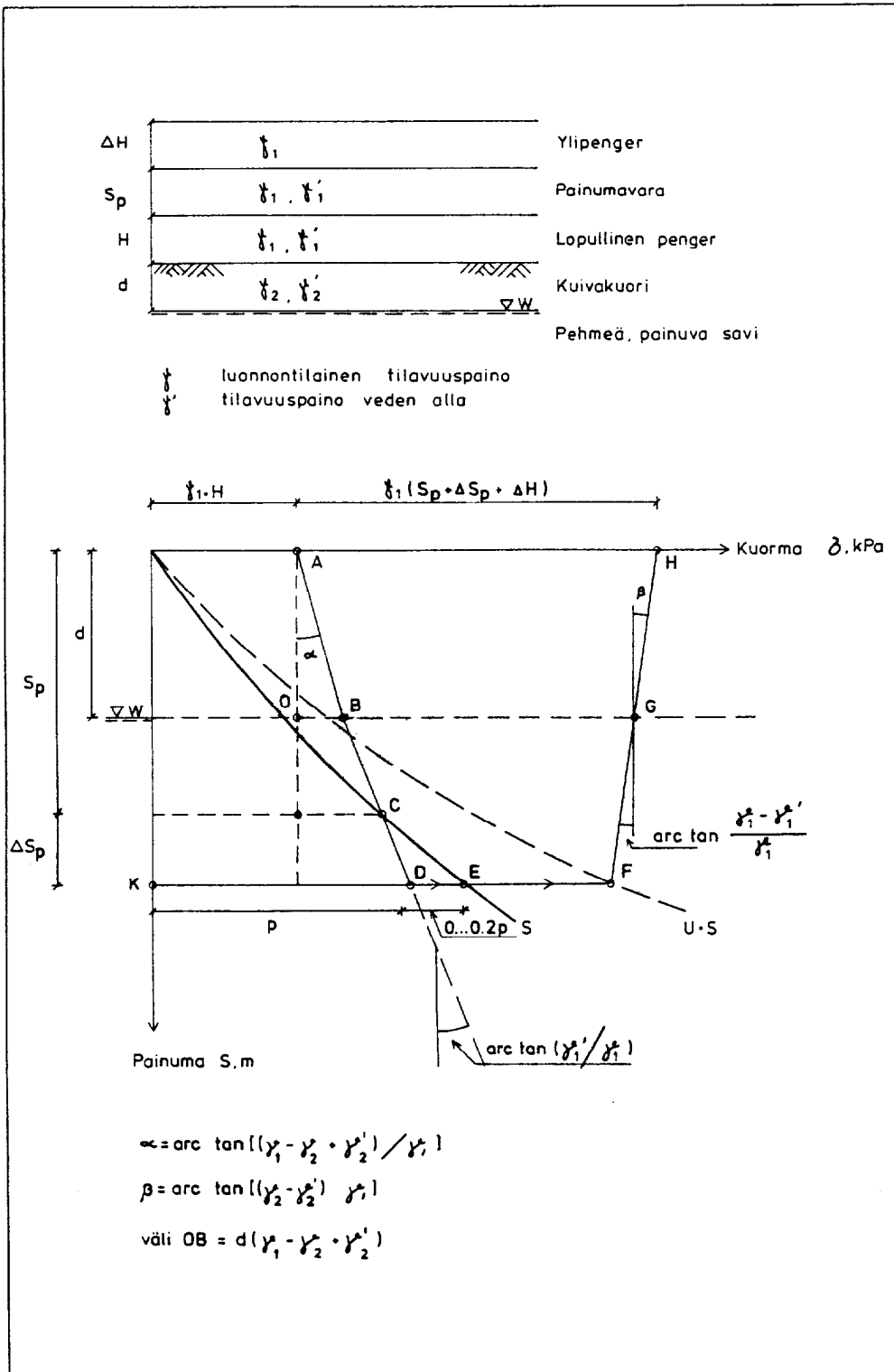
Graafinen menetelmä:

Lähtötiedot (kuvat 15 ja 16):

- Lopullisen penkereen korkeus H .
- Kuivakuoren paksuus ja pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnasta d .
- Kuivakuoren luonnontilainen tilavuuspaino γ_2 .
- Kuivakuoren tilavuuspaino veden alla γ_2' .
- Pengermateriaalin luonnontilainen tilavuuspaino γ_1 .
- Pengermateriaalin tilavuuspaino veden alla γ_1' .



Kuva 15: Esikuormituksen mitoituksessa käytetyt merkinnät. H lopullinen penger, S_p painumavaara, ΔH ylipenger.



Kuva 16: Esikuormituksen mitoitus graafisella menetelmällä.

Pengerkorkeuden määrittäminen (kuva 16):

- Lasketaan primaarisen konsolidaatiopainuman suuruus erilaisilla pengerkuormilla ja piirretään tulosten perusteella käyrä S kuormapainumakoordinaatistossa.
- Lasketaan konsolidaatioasteetta U vastaavat painumat US ja piirretään tulos koordinaatistoon. Haluttu konsolidaatioaste U on yleensä välillä 0.7...0.99 ja se tarkentuu teknistaloudellisen optimoinnin seurauksena.
- Merkitään piste A ja mitta d (kuivakuoren paksuus, pohjavedenpinnan syvyys) kuvan 16 mukaisesti.
- Piirretään suora pisteestä A pisteeseen B kaltevuudessa α .
Väli $OB = d (\gamma_1 - \gamma_2 + \gamma_2')$
- Piirretään suora pisteestä B pisteeseen C ja edelleen pisteeseen D kaltevuudessa $1 : \gamma_1'$ (kulmassa $\arctan (\gamma_1' / \gamma_1)$).
- Väli $DE = 0 \dots 0.2 p$, jossa p = väli KD.

Tällä toimenpiteellä rajoitetaan sekundaarisen konsolidaation vaikutusta, joten välin DE valinta riippuu odotettavissa olevasta sekundaarisen konsolidaatiopainuman suuruudesta ja käyttötilan painumakriteereistä. Väli DE voidaan laskea tarvittaessa laboratoriotutkimusten ja luvussa 5.5 esitettyjen menetelmien avulla.

- Suoraa DE jatketaan pisteeseen F käyrällä US.
- Pisteestä F piirretään suora kuorma-akselille kaltevuudessa $1 : (\gamma_1 - \gamma_1')$ pisteeseen G (kulmassa $\arctan ((\gamma_1 - \gamma_1') / \gamma_1)$).
- Piirretään suora pisteestä G pisteeseen H kulmassa β .

$$\text{Kokonaispainumavara} = S_p + \Delta S_p$$

$$\text{Ylipengerkorkeus } \Delta H = \text{väli AH} / \gamma_1 - (S_p + \Delta S_p)$$

$$\text{Myös } \Delta H = \text{väli DF} / \gamma_1$$

Mitoitusproseduuri:

1. Valitaan konsolidaatioaste U.
2. Lasketaan pystyöjäväli (luku 5.3) esikuormitusajan ja mitoitusparametrien avulla.
3. Määritetään tarvittava pengerkorkeus esikuormitusajan alussa edellä esitetyn graafisen menetelmän avulla.
4. Mitoitetaan vastapenkereet luvun 5.6 mukaisesti.
5. Lasketaan massat ja rakennuskustannukset tiemetriä kohti.

Kohtia (1)...(5) toistetaan kunnes löydetään tekninen ja taloudellinen optimiratkaisu.

5.5 Sekundaarinen konsolidaatio

Sekundaarisen konsolidaatiopainuman suuruus lasketaan tavallisesti Buismanin menetelmällä:

$$S_s = \Delta H \Delta \varepsilon_z \quad (5.10)$$

$$\Delta \varepsilon_z = C_{\alpha z} (\log t - \log t_p) = C_{\alpha z} \log (t/t_p)$$

S_s ko. painuvan kerroksen sekundaaripainuma aikavälillä $t_p \dots t$.

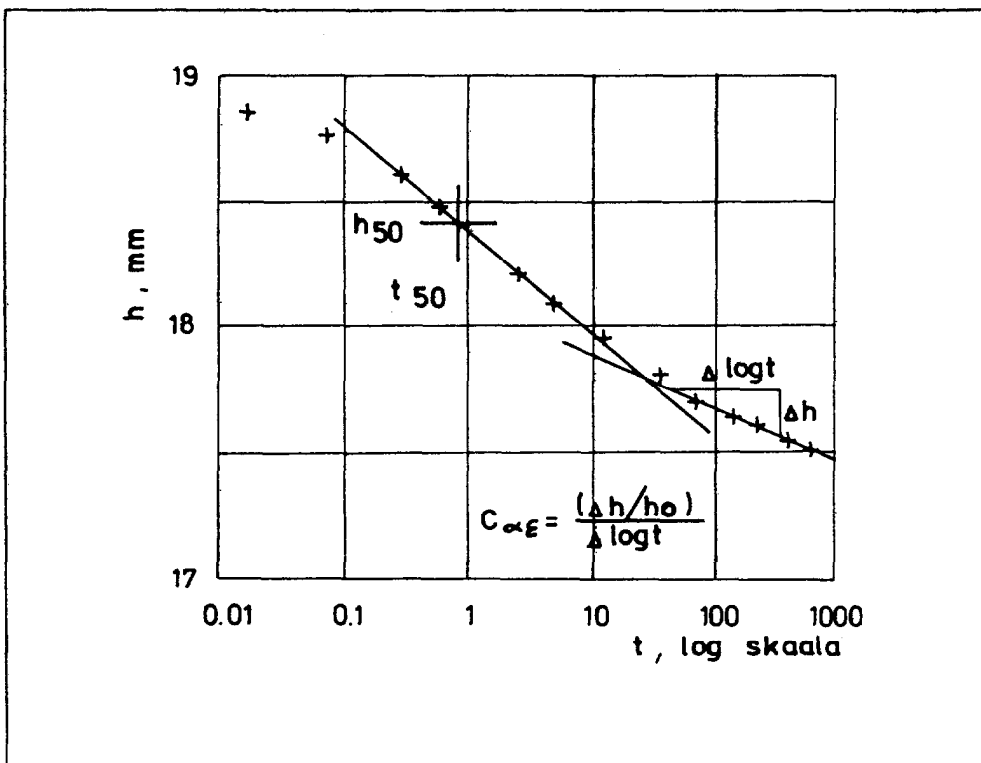
ΔH painuvan kerroksen paksuus

$C_{\alpha z}$ sekundaaripainuman aikakerroin, kuva 17.

t_p primaarisen konsolidaation kesto aika, esikuormitusaika

$t > t_p$ aika

Sekundaaripainuman aikakerroin $C_{\alpha z}$ mitataan pitkäaikaisten portaittaisten ödometrikokeiden avulla.



Kuva 17: Sekundaaripainuman aikakerroimen $C_{\alpha z}$ määrittäminen portaittaisen ödometrikokeiden tuloksista.

Sekundaaripainuman suuruus lasketaan kerroksittain ja summataan yhteen. Laskettua painumaa verrataan käyttötilassa julkaisussa "Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet", TIEL 3200150, esitettyihin painumakriteereihin.

Sekundaaripainumaa on mahdollista pienentää esikuormitusaikaa ja/tai ylikuormitusta kasvattamalla kuvan 18 periaatteiden mukaisesti. Tällä hetkellä ei kuitenkaan ole olemassa yleisesti hyväksyttyä mitoitusastapaa menetelmän käyttöä varten.

Sekundaaripainuma rajoittaa pystyöjituksen käyttöä pohjavahvistustapana erityisesti runsaasti humusta sisältävissä maapohjissa, turpeessa ja liejussa.

5.6 Pystyöjakentän vakavuus

Tiepenkereet vastapenkereineen mitoitetaan siten, että varmuuskerroin liukusortumaa vastaan on vähintään julkaisussa "Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet", TIEL 3200150, esitetyn mukainen.

Plastisten leikkausmuodonmuutosten vähentämiseksi varmuuskertoimen tulisi olla myös esikuormitusaikana vähintään 1.5.

Varmuuskerrointa laskettaessa siipikairalla mitattua leikkauslujuutta redusoidaan laboratoriossa määritetyn kartiojuoksurajan w_L perusteella.

Pystyöjien asennuksen yhteydessä tapahtuva maapohjan häiriintyminen otetaan huomioon seuraavasti:

$$s_d = s_r (d_s / D)^2 + s_u (1 - (d_s / D)^2) \quad (5.11)$$

s_d leikkauslujuuden laskenta-arvo

s_r häiritty leikkauslujuus. Sensitiivisillä savilla $s_r \sim 0$.

s_u siipikairalla mitattu häiriintymätön, redusoitu leikkauslujuus

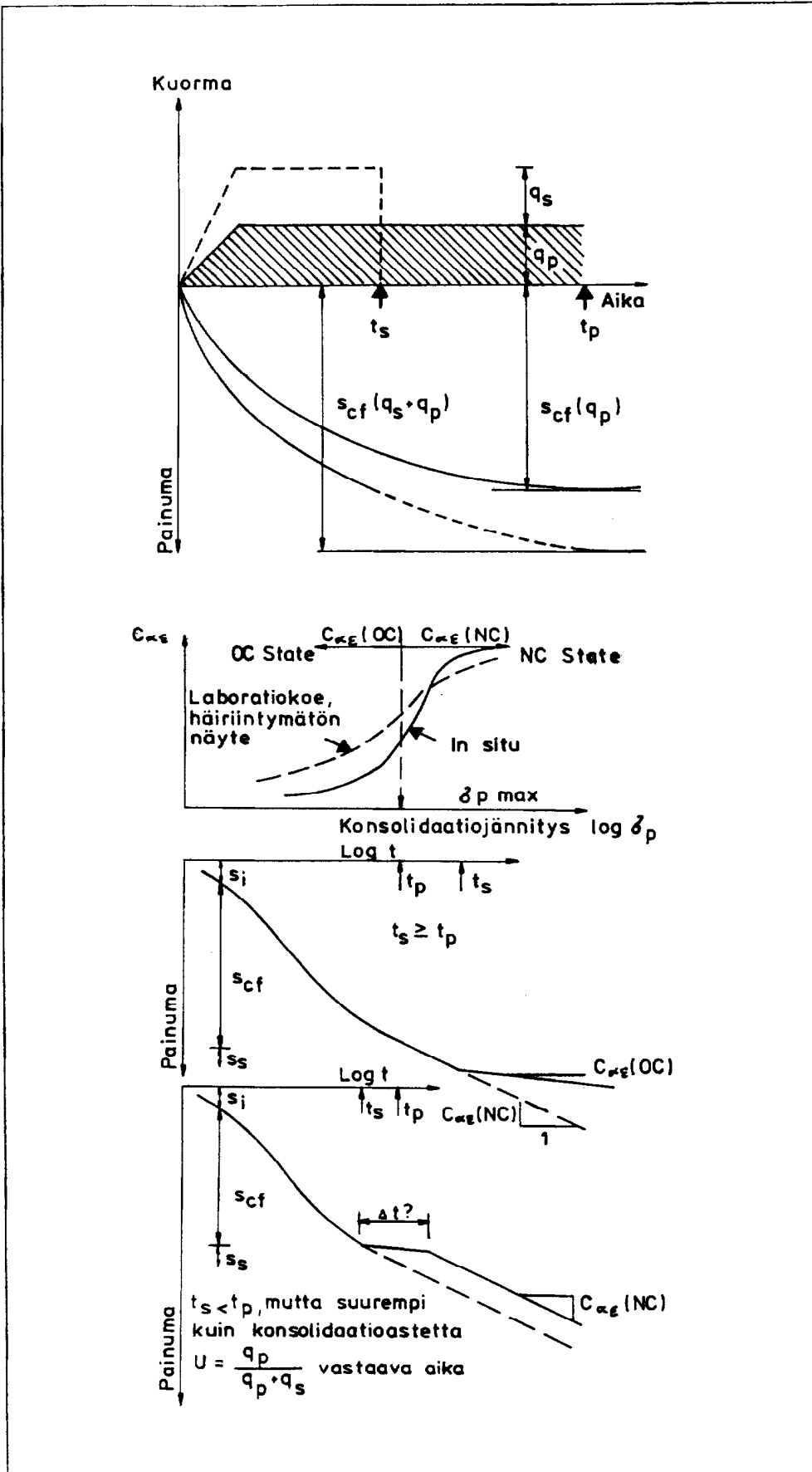
d_s häiriintyneen alueen halkaisija (luku 5.3)

D pystyöjan vaikutusalueen halkaisija (luku 5.3)

Vastapenger materiaalina käytettävän saven tai siltin tilavuuspainoksi voidaan otaksua 18 kN/m^3 .

Pystyöjitusalueen ulkopuolelle tulevien purkuojien vaikutus vakavuuteen tulee ottaa laskeimissa huomioon.

Vaiheittain rakennettavan penkereen vakavuuslaskeimissa voidaan maa-kerrosten leikkauslujuuden kasvu ottaa huomioon luvussa 5.7.6 esitettyllä tavalla.



Kuva 18: Periaate sekundaaripainuman pienentämiseksi.

5.7 Mitoituksen erikoistapauksia

5.7.1 Samanaikainen pysty- ja vaakakonsolidaatio

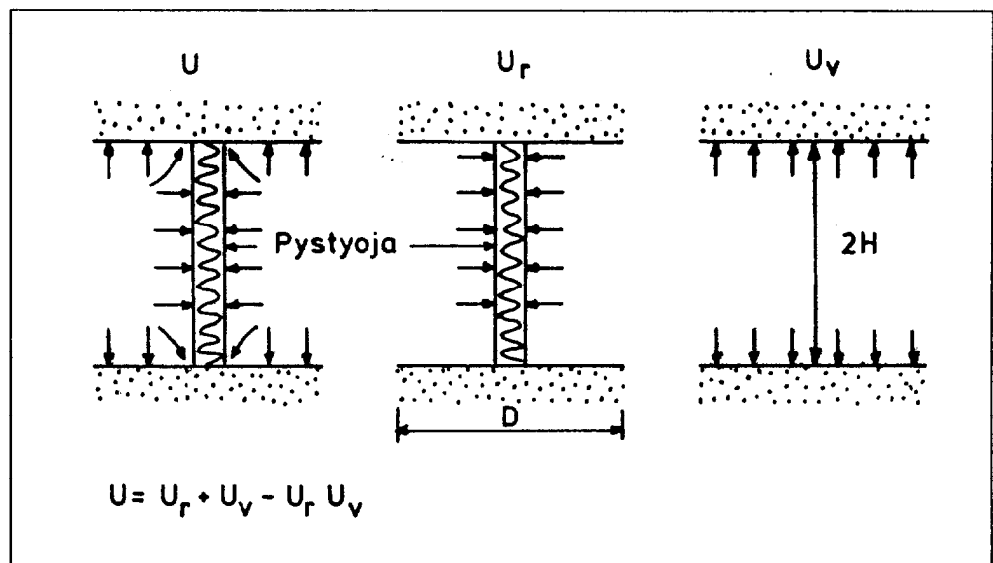
Samanaikainen pysty- ja vaakakonsolidaatio voidaan Carrillon (1942) mukaan ottaa huomioon seuraavasti (kuva 19):

$$U = U_r + U_v - U_r U_v \quad (5.12)$$

U kokonaiskonsolidaatioaste

U_r radiaalisen konsolidaation konsolidaatioaste (luku 5.3)

U_v pystysuuntainen konsolidaatioaste ilman pystyöjia



Kuva 19: Samanaikainen pysty- ja vaakakonsolidaatio.

Pystysuuntainen konsolidaatioaste saadaan kuvasta 20:

$$T_v = c_v t / (H^2) \quad (5.13)$$

T_v aikatekijä pystysuunnassa

c_v konsolidaatiokerroin pystysuunnassa

t aika

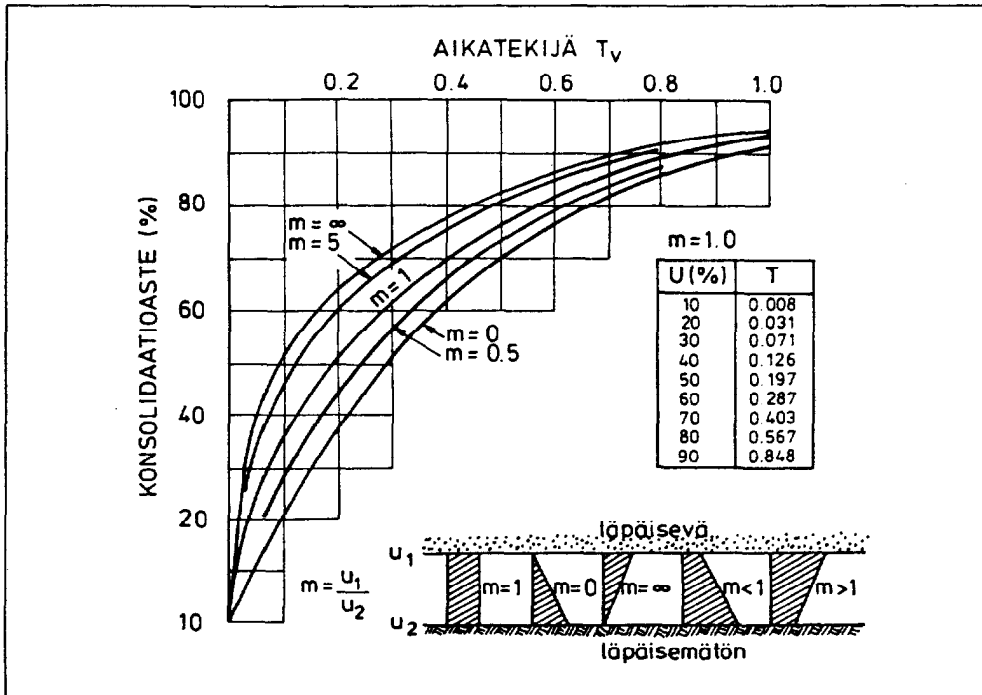
H huokosveden virtausmatka pystysuunnassa

Pystysuuntaisella konsolidaatiolla on vaikutusta silloin, kun painuva kerros on ohut.

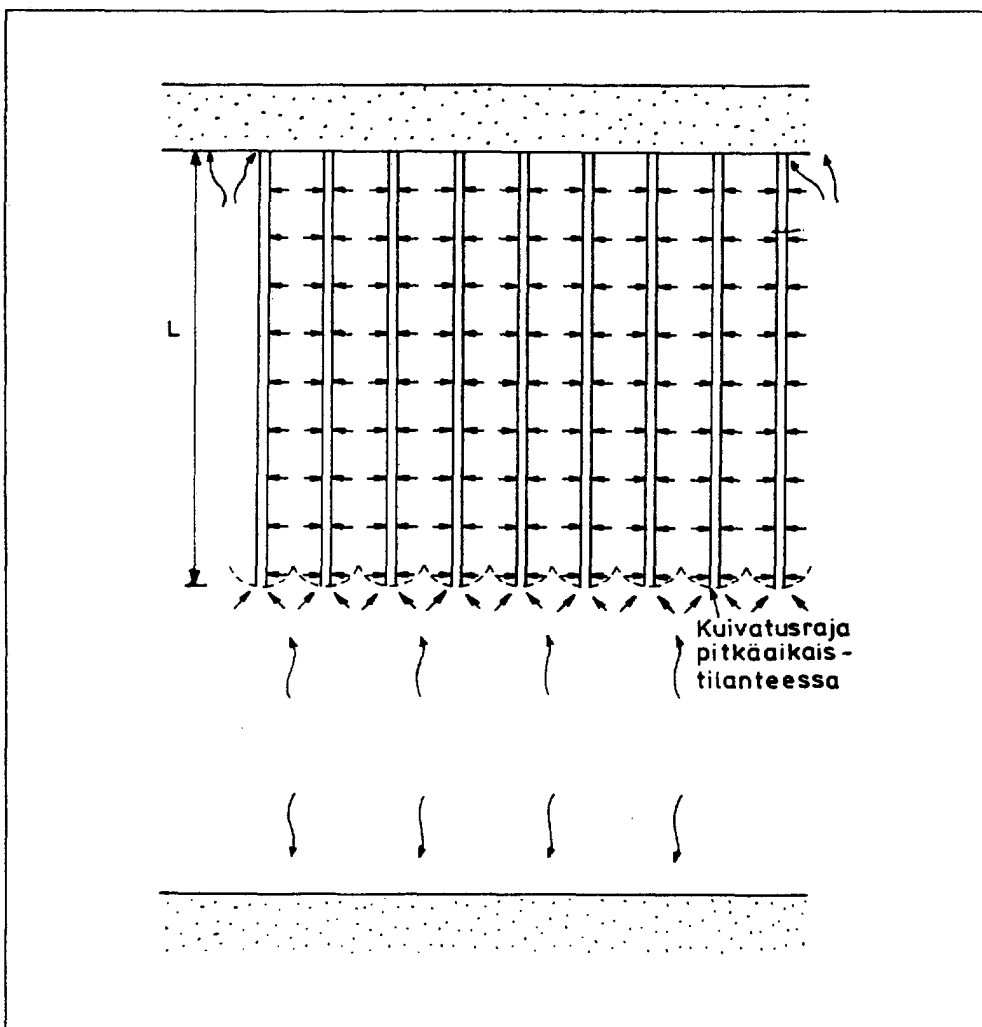
5.7.2 Painuvaan kerrokseen jätetyt pystyöjät

Painuvaan kerrokseen jätettyjen pystyöjien alapäiden ympärille muodostuu kolmiulotteinen huokosveden virtauskenttä (kuva 21), joka vaikuttaa kahdella, toisiaan ainakin osittain eliminoivalla tavalla (Hansbo 1993):

- Pystyöjien alapäiden alapuolella oleva maakerros aiheuttaa pystyöjien väliin painegradientin, mikä hidastaa pystyöjitetun alueen konsolidaatiota.
- Pystyöjitus nopeuttaa alapuolisen, ojittamattoman alueen konsolidaatiota.



Kuva 20: Terzaghin teoria, aikatekijän ja konsolidaatioasteen vuorosuhde.



Kuva 21: Painuvaan kerrokseen jätetyt pystyöjat.

Yhteisvaikutus lasketaan luotettavimmin numeerisilla menetelmillä (Jamiolkowski et al 1983). Alustavia tarkasteluja varten voidaan pystyöjitetun alueen konsolidoituminen laskea erikseen edellä luvuissa 5.3 ja 5.7.1 esitetyillä tavoilla ja pystyöjien alapuolella olevien kerrosten konsolidoituminen erikseen Terzaghin konsolidaatioteorian (kuva 20) mukaisesti. Kokonaispainuma ajan funktiona on em. tavoilla laskettujen osapainumien summa.

5.7.3 Ylikonsolidoitunut maapohja

Määritellään tehokkuuskerroin η seuraavasti:

$$\eta = (\log \sigma_z - \log \sigma_p) / (\log \sigma_z - \log \sigma_0) \quad (5.14)$$

$$\sigma_z = \sigma_0 + \Delta\sigma_z$$

σ_p esikuormitus

σ_0 vallitseva pystysuora kuormitus

$\Delta\sigma_z$ pystysuora jännityslisäys

Pystyöjien käyttö on Bjerrumin mukaan tarkoituksenmukaista, jos tehokkuuskerroin $\eta > 0.6$ (Jamiolkowski et al 1983). Holtz et al (1991) ovat lisäksi todenneet, että pystyöjien käyttö saattaa olla perusteltua jo kun $\eta = 0.4$.

Voimakkaasti ylikonsolidoituneiden maakerrosten pystyöjityksestä saattaa olla haittaa, koska asennusvaiheessa tapahtuva maapohjan häiriintyminen lisää painumia.

"Kohtuullisesti" ylikonsolidoituneiden maakerrosten pystyöjitus mitoitetaan luotettavimmin numeeristen menetelmien avulla, koska analyttisissä pystyöjitysteorioissa (luku 5.3) ei ylikonsolidaatiota ole otettu huomioon. Nykyisin käytössä olevista tietokoneohjelmista mitoitukseen soveltuvat esim. CRISP, ZSOIL ja PLAXIS.

5.7.4 Maapohjan häiriintyminen

Nauhapystyöjia asennettaessa suojaputken ympärille syntyy häiriintynyt maavyöhyke (kuva 22), jonka leikkauslujuus, vedenläpäisevyys ja konsolidaatiokerroin ovat pienempiä kuin häiriintymättömässä maassa. Em. ominaisuudet palautuvat hiljalleen ajan kuluessa saavuttamatta kuitenkaan alkuperäisen häiriintymättömän maan ominaisuuksia.

Asennusvaiheessa tapahtuvaan maapohjan häiriintymiseen vaikuttavat seuraavat seikat:

- Suojaputken poikkileikkauksen koko ja ankkurilevyn muoto ja koko deformoituneena. Häiriintymisen vaikutus kasvaa poikkileikkauksen pinta-alan kasvaessa.
- Maapohjan kerroksellisuus ja anisotrooppisuus kasvattavat häiriintynyttä vyöhykettä.
- Maapohjan sensitiivisyys (mitä sensitiivisempää, sen häiriintyvämpää).

Häiriintyneen alueen ulottuvuudesta ja ominaisuuksien muuttumisesta ei tällä hetkellä ole olemassa empiirisiä tutkimustuloksia. Teoreettisten tarkastelujen perusteella häiriintyneen alueen halkaisijaksi voitaneen arvioida $d_s = 2.5...3 \times d_m$, jossa d_m on suojaputken ekvivalentti halkaisija. Häiriintyneen alueen ominaisuuksien alaraja voitaneen selvittää häiriintyneistä näytteistä tehdyillä laboratoriotutkimuksilla.

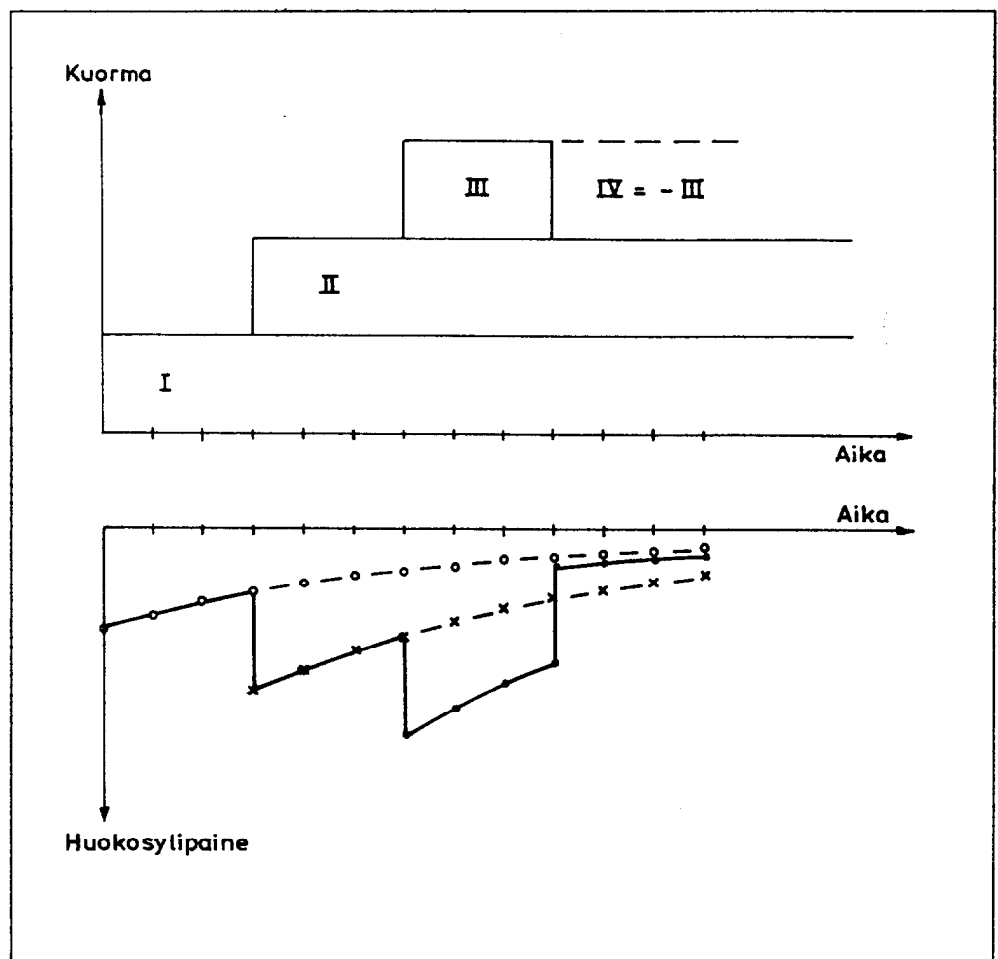
Kuvassa 14 esitetyssä monogrammissa häiriintyneen alueen halkaisijaksi on otaksuttu $d_s = 2d$, jossa d on pystyöjan ekvivalentti halkaisija.

Suuriin painumiin liittyy aina myös suuria muodonmuutoksia. Pystyöjitus- ja painumalaskentamallit on laadittu pienten muodonmuutosten teoriaan perustuen, joten suuret painumat aiheuttavat myös teoreettisia virheitä. Virheen suuruusluokka 30 % muodonmuutoksella on 8 % konsolidaatioasteessa (Olson & Ladd 1979). Virhe voidaan välttää käyttämällä numeerisiin menetelmiin perustuvia tietokoneohjelmia, joissa on mukana suurten muodonmuutosten teoria.

Jos suuria painumia tai muodonmuutoksia on odotettavissa, on valittava nauhaojatyyppi, mikä kestää taivuttamista katkeamatta ja minkä vedenvirtauskapasiteetin riittävyys voidaan varmistaa.

5.7.6 Vaiheittain rakentaminen

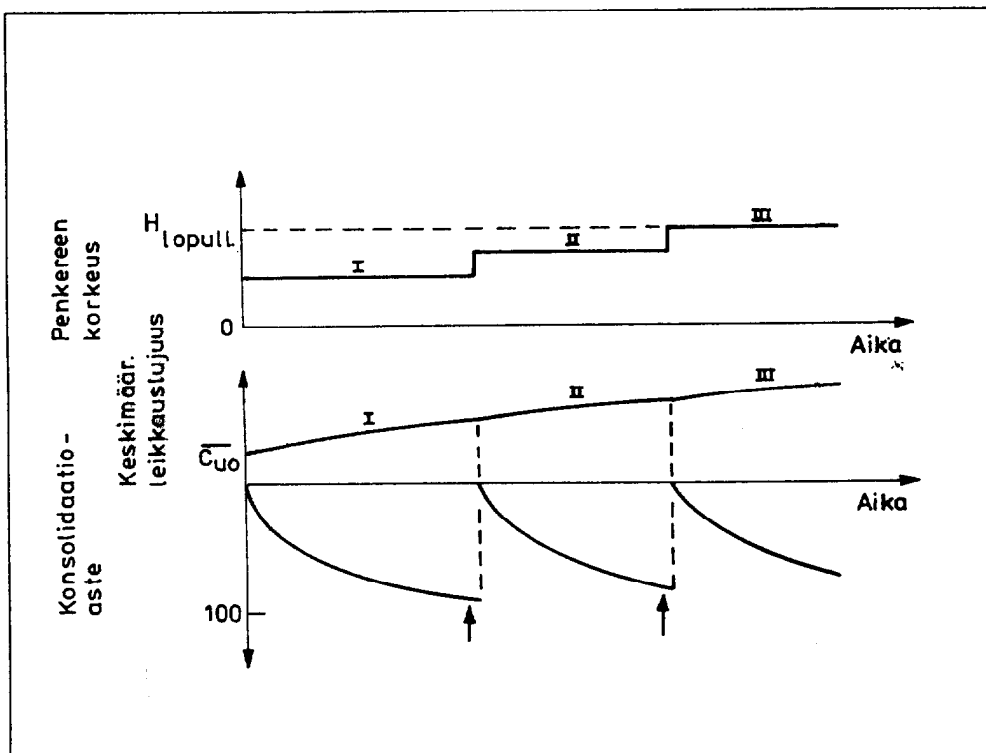
Vaiheittain rakentamista käytetään silloin, kun koko pengerkuormaa ei vakavuussyistä voida rakentaa täyteen korkeuteensa esikuormitusajan alussa. Pystyöjitetun maapohjan konsolidaatioprosessi on vaiheittain rakennettaessa ajasta ja kuormituslisäysten suuruudesta ja ajankohdista riippuva. Yksinkertaisin tapa pystyöjavälin ja vaiheittain rakennettavan esikuormituspenkereen mitoittamiseksi on käsitellä pengerkuormia pieninä kuormituslisäyksinä, joiden huokosylipaine- ja painumavaikutukset summataan ajan mukana kuvassa 23 esitetyllä tavalla (Vepsäläinen 1989, Holtz et al 1991).



Kuva 23: Summausmenetelmä

Vaiheittain rakentamista mitoitettaessa ongelmaksi saattaa muodostua erityisesti lievästi ylikonsolidoituneissa maakerroksissa mitoitusparametrien muuttuminen konsolidaatioprosessin aikana ja siirryttäessä ylikonsolidoituneesta tilasta normaalikonsolidoituneeseen. Tällaisissa tapauksissa em. yksinkertainen mitoitusproseduuri ei anna tarkkaa tulosta, vaan mitoitus joudutaan tarkistamaan numeerisiin menetelmiin perustuvilla tietokoneohjelmissa (esim. CRISP, ZSOIL ja PLAXIS).

Kolmas vaiheittain rakentamiseen liittyvä mitoitustehtävä liittyy pehmeiden kerrosten leikkauslujuuden kasvuun.



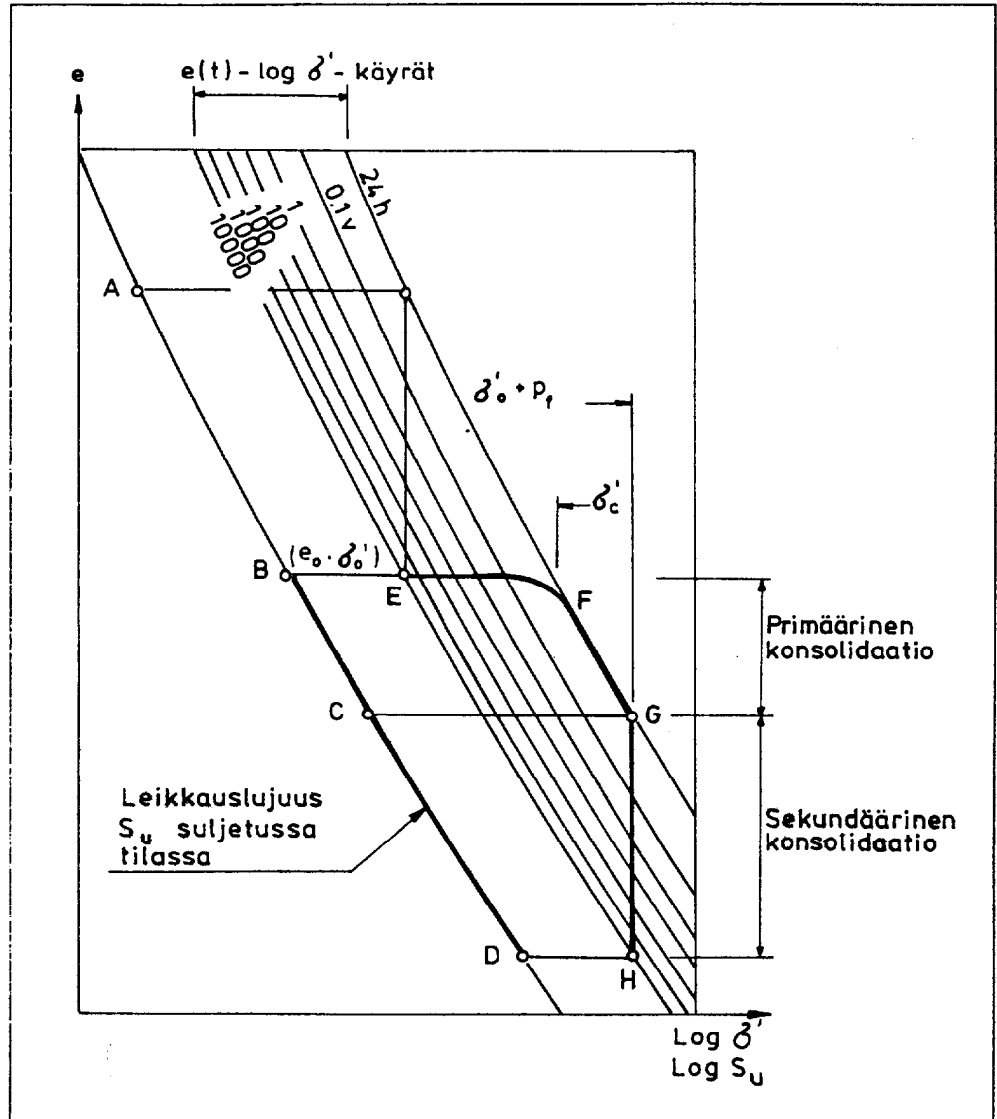
Kuva 24: Vaiheittain rakentaminen.

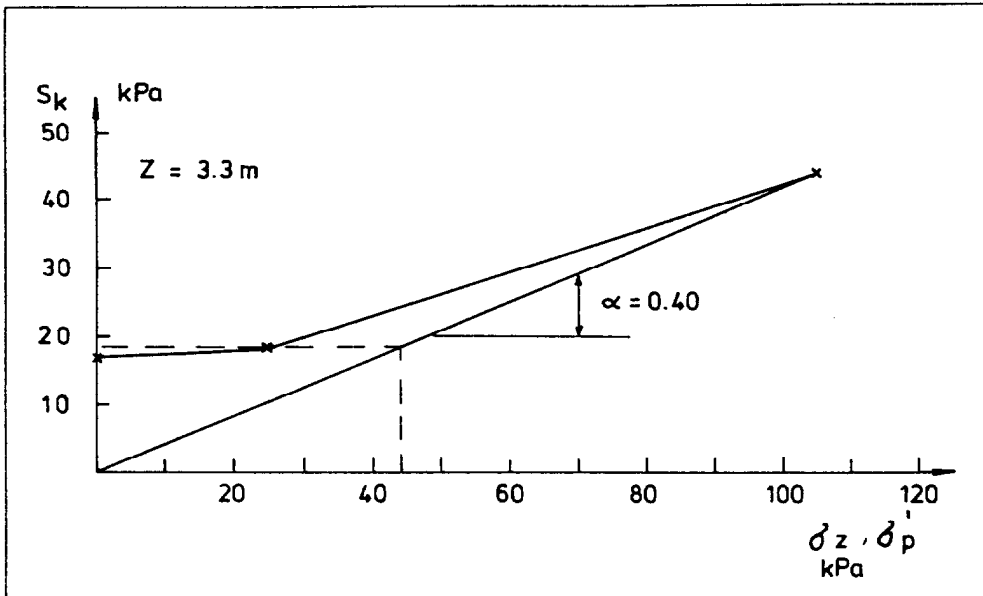
5.7.7 Leikkauslujuuden kasvu

Pehmeiden maakerrosten leikkauslujuuden kasvua on mahdollista käyttää tietyissä olosuhteissa hyväksi vaiheittain rakentamisessa (kuva 24). Leikkauslujuuden kasvua tapahtuu kuvan 25 perusteella (Pilot et al 1987) seuraavasti:

- Leikkauslujuus ei kasva ylikonsolidoituneella osalla (piste B kuvassa 25).
- Leikkauslujuuden kasvua tapahtuu normaalikonsolidoituneella osalla (väli BC kuvassa 25).
- Lisää leikkauslujuuden kasvua tapahtuu maakerroksen sekundaarisen konsolidaatiovaiheen aikana (väli CD kuvassa 25).

Lisäksi lujuuden kasvu hidastuu plastisten leikkausmuodonmuutosten vaikutuksesta pienillä ($F < 1.5$) varmuuskertoimilla (Leroueil 1993).





Kuva 26: Esimerkki leikkauslujuuden kasvun kertoimen α määrittämisestä laboratoriossa.

5.8 Menetelmärajoitukset

Pystyöjituksen valintaa ja mitoitusta säätelevät seuraavat tekniset rajoitukset:

- Varmuus liukusortumaa vastaan tulee ylipenger ja painumavara huomioonottaen olla $F > 1.5$.
- Ei sovellu yleensä liejussa eikä turpeessa suurien painumien takia. Menetelmää voidaan kuitenkin käyttää kerrallisissa pehmeiköissä, joissa turve- tai liejakerrokset vuorottelevat siltti- tai kitkamaakerrosten kanssa.
- Ei sovellu voimakkaasti ylikonsolidoituneissa maakerroksissa.
- Käyttöaikana tapahtuva sekundaaripainuma saattaa aiheuttaa tapauskohtaisia rajoituksia, jos maakerrokset sisältävät runsaasti humusta.

Lisäksi pystyöjituksen valintaan liittyy seuraavia seikkoja:

- Käytettävissä oleva tiealueen leveys. Ilman vastapenkereitä ja leveää tiealuetta pystyöjatiheys saattaa muodostua epätaloudellisen suureksi.
- Rakentamisaikataulu ja käytettävissä oleva painuma-aika. Tendenssi on viime aikoina ollut nopeutuva, jolloin pystyöjituksen teknistaloudelliset käyttömahdollisuudet vähenevät. Suomalaisissa olosuhteissa pystyöjitus edellyttää yleensä 1.5...3 vuoden painuma-ajan.
- Jälkipainumat ja siirtymärakenteet. Suuret ja kauan kestävät jälkipainumat (erityisesti humuspitoisissa maissa) edellyttävät pitkiä ja kalliita siirtymärakenteita, jolloin pystyöjitusmenetelmän taloudellisuus muihin menetelmiin verrattuna saattaa tulla kyseenalaiseksi. Jälkipainumien arviointi tulee tästä syystä tehdä jo suunnitteluvaiheessa parametreihin ja mitoitusmenetelmään liittyvät riskitekijät huomioon ottaen.

6 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

6.1 Maapohjan häiriintyminen

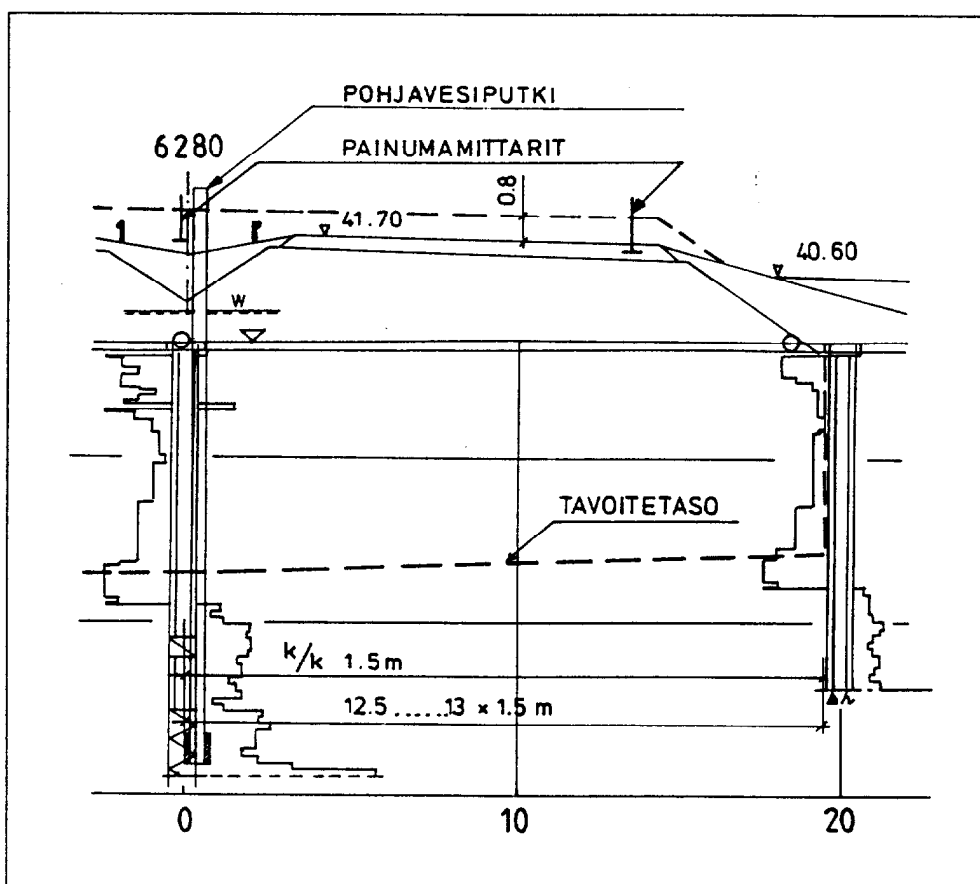
Maapohjan asennusvaiheessa tapahtuvalla häiriintymisellä on erityistä merkitystä pystyöjien mitoituksessa (luku 5.7.4). Häiriintymisellä on vaikutusta ympäristöön erityisesti rinnealueilla, joissa liukusortuman mahdollisuus kasvaa. Tällöin rinteiden vakavuus arvioidaan redusoimalla leikkauslujuutta luvussa 5.6 esitetyllä tavalla.

6.2 Pohjavesi

Nauhapystyöjat alentavat pohjavedenpintaa, jos pohjavesi on paineellista ja pystyöjat ulotetaan vettä johtaviin kerroksiin.

Paineellisen pohjavedenpinnan aleneminen voidaan estää, jos pystyöjien alapää jätetään painuvaan, vettä huonosti läpäisevään kerrokseen (kuva 27). Tarpeellisen suojakerroksen paksuus voidaan arvioida pohjaveden paine-eron perusteella.

Pohjavesialueilla pohjaveden pinnan tasoa ei saa laskea eikä pohjaveden laatua huonontaa rakentamis- sekä käyttöaikana. Näiden vaatimusten täyttämiseksi pystyöjien alapää tulee yleensä jättää vettä huonosti läpäiseviin kerroksiin. Rakentamisaikana vesi virtaa pystyöjanauhoissa hitaasti ylöspäin, jolloin pohjaveden laadun huononeminen on epätodennäköistä. Käyttöaikainen pohjaveden lisäsuojaus joudutaan harkitsemaan tapauskohtaisesti.



Kuva 27: Esimerkki pystyöjityksestä, kun pohjavesi on paineellista.

7 TYÖN VALVONTA JA SEURANTAMITTAUKSET

7.1 Laadunvarmistus

Tässä luvussa esitetyt liitenumerot vastaavat julkaisussa "Pystyöjanauhojen laatuvaatimukset", TIEL 3200057 esitetyjä liitenumeroita.

Pystyöjanauhojen työnaikainen laadunvalvonta

Pystyöjanauhojen hankekohtainen, työnaikainen laadunvalvonta sisältää seuraavat laadunvalvontatoimenpiteet (liite 7, TIEL 3200057):

1. Ojanauhatoimitusten ja varastoinnin tarkastus
 - Rakennuttajalla on käytettävissä tyyppitarkastustulokset ja näytekappale ojanauhasta.
 - Urakoitsija hankkii ojanauhan tunnistetiedot ja valmistajan tekemän laadunvalvonnan tulokset.
 - Rakennuttajan edustaja yhdessä urakoitsijan kanssa tarkastaa silmämääräisesti ojanauhaerän laadun sen saavuttua työmaalle. Tarkastamisesta tehdään pöytäkirja (liite 11, TIEL 3200057).
 - Nauhaerän laadun tarkastuksen yhteydessä tarkastetaan myös nauhaerän varastointi. Tarkastustulokset merkitään liitteessä 11 esitetyle lomakkeelle.
2. Nauhanäytteiden ottaminen
 - Urakoitsija ottaa rakennuttajan valvonnassa nauhanäytteet liitteissä 7 ja 8 (TIEL 3200057) esitetyn ohjelman mukaisesti. Näytteenotosta pidetään liitteessä 8 esitettyä pöytäkirjaa.
 - Otettuja näytteitä verrataan silmämääräisesti tyyppitarkastettuun näytekappaleeseen ja tehdään liitteissä 7 ja 8 esitetyt mittaukset ja arvioinnit sekä merkitään tulokset pöytäkirjaan (liite 8, TIEL 3200057).
 - Näytteet toimitetaan suunnittelijalle tai rakennuttajan hyväksymälle puolueettomalle laadunvalvojalle tuotteen tarkastamista ja mahdollisia, luvussa 2 taulukossa 2 esitettyjä laadunvalvontakokeita varten.
3. Laadun tasaisuuden tarkkailu
 - Urakoitsija vastaa nauhan laadun tasaisuuden tarkkailusta.
 - Tavanomaisen, jatkuvan tarkkailun lisäksi varmistetaan nauhan laatu vertaamalla silmämääräisesti vertailukappaleeseen (jonka laatu tunnetaan) vähintään kerran noin 10000 asennettua ojaometriä kohti. Vertailumenetelmät on esitetty liitteessä 7 (TIEL 3200057). Tarkastuksesta tehdään pöytäkirja (liite 8, TIEL 3200057).

Laadunvalvonta pystyöjien asennuksen yhteydessä

Ennen pystyöjituksen aloittamista tarkastetaan, että pystyöjituskone ja asennuksessa käytettävä suojaputki täyttävät niille asetetut vaatimukset (Pystyöjanauhojen laatuvaatimukset 1992, TIEL 3200057). Asennuskerroksen ja tiiviiden välikerrosten läpäisykyky tulee myös varmistaa.

Urakoitsijan tulee ennen työn aloittamista varmistaa, että käytettäväksi suunniteltu ankkurilevy soveltuu kohteen pohjasuhteisiin, ts. sen ankkurointikyky on riittävä eikä se aiheuta upotuksen aikana tarpeetonta maan häiriintymistä. Ankkurilevyn sopivuus voidaan varmistaa tekemällä koeojia.

Urakoitsijan tulee hyväksyttää rakennuttajalla ennen työn aloittamista käyttämänsä ankkurilevyn ja ojanauhan kiinnitystapa sekä ojanauhan jatkoksen tekotapa.

Pystyojan suunta-poikkeamaksi (pystysuorasta) suositellaan enintään ± 0.02 (20 mm/m).

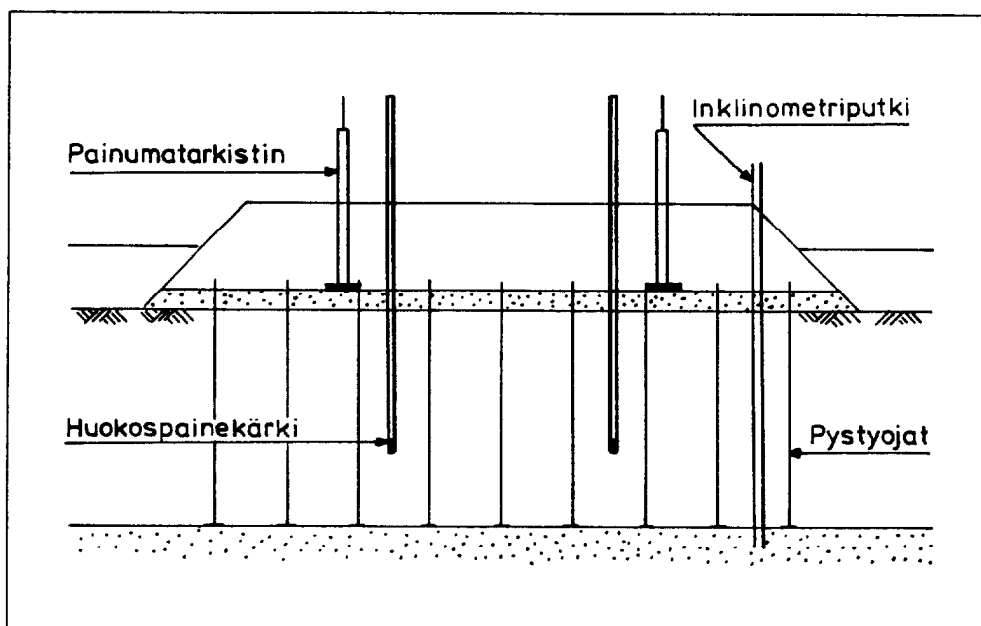
Pystyojien asennuksen yhteydessä tulee päähuomio kiinnittää ojanauhan ehjänä säilymiseen, maapohjan tarpeettoman häiriintymisen välttämiseen ja pystyojien sijainnin ja ojitussyvyyden toteutumiseen suunnitelmien mukaisesti. Pystyojien sijainti ja ojaväli eivät saa poiketa suunnitellusta yli 0.2 metriä. Pystyojaverkon geometriaa voidaan kuitenkin hieman tarkistaa työmenetelmiin soveltuvaksi suunnittelijan kanssa sopimalla.

Ojitustyön toteutumista suunnitelman mukaisena valvotaan urakoitsijan tai rakennuttajan pitämän pystyojituspöytäkirjan avulla (liite 10, TIEL 3200057).

7.2 Seurantamittaukset

Seurantamittausten tarkoituksena on selvittää tiepenkereen ja pystyojitetun maapohjan todellista käyttäytymistä. Tavallisimmat pystyojitushankkeessa tehtävät seurantamittaukset ovat seuraavat (kuva 28):

1. Poikkileikkausvaaitukset
 - Kaikki kohteet
2. Painumamittaukset
 - Kaikki kohteet
3. Huokospainemittaukset
 - Suunnittelijan harkinnan mukaan.



Kuva 28: Tyypillinen instrumentointi pystyojitushankkeessa.

Muita mahdollisia, lähinnä suurissa ja/tai pohjasuhteiltaan vaikeissa kerroksellisissa maapohjissa käytettäviä seurantamittauksia ovat eri kerrosten painuma- ja muodonmuutosmittaukset ekstensiometreillä.

Lisäksi, jos tiepenkereet tai niiden luiskat joudutaan mitoittamaan pienemmälle varmuuskertoimelle kuin $F = 1.5$, mitataan maapohjan sivusiirtymiä pengerialueiden alla inklinometrillä.

(1) Vaaitukset

Vaaitusten tarkoituksena on selvittää pystyöjitettua maapohjaa kuormittavan penkereen korkeus ja muoto esikuormitusaikana. Vaaitukset käsittävät poikkileikkausvaaituksia ja tarvittaessa myös vaaituksia tien pituussuunnassa. Poikkileikkausvaaitukset koko pystyöjitusalueella tehdään kerran sekä pengerrysvaiheen lopussa että myös painuma-ajan lopussa. Samanaikaisesti painuma- ja huokospainemittausten kanssa vaaitaan yksittäiset mittaripoikkileikkaukset. Poikkileikkausvaaitusten tulee ulottua vastapengerialueen ulkopuolelle yliperikereen ja vastaperikereiden rakentamisaikana ja myös kerran painuma-ajan lopussa.

(2) Painumamittaukset

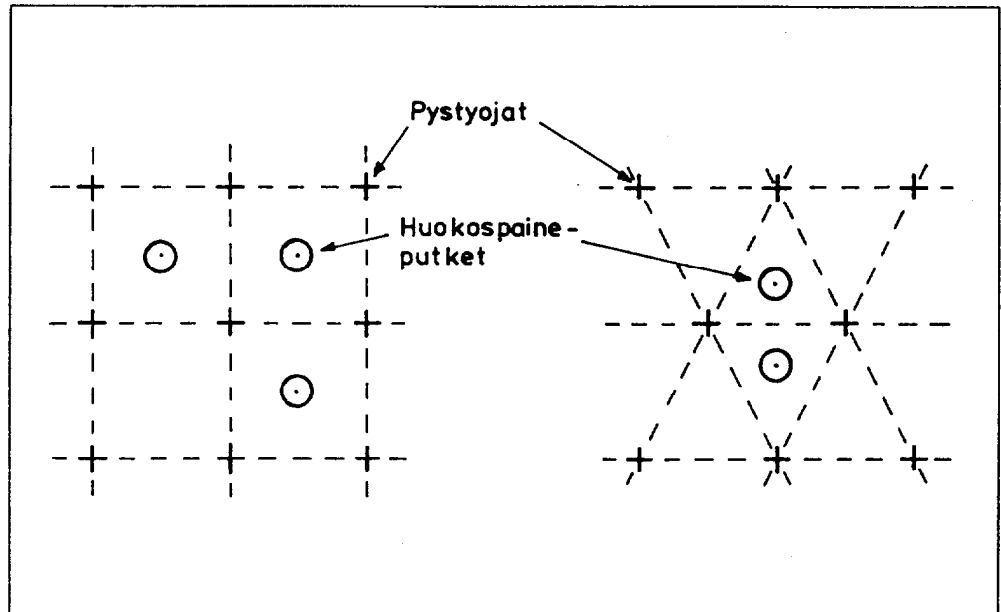
Painumamittausten tarkoituksena on tavallisesti selvittää pengerkuormasta aiheutuvan maan pinnan painuman kehittyminen ajan mukana. Tätä varten asennetaan teräsrakenteisia painumatarkistimia (painumalevyjä) ojituseroksen päälle suunnitelmassa esitettyihin kohtiin. Asennustyössä ja mitaustangon painumaaikaisessa suojauksessa noudatetaan TVO-88:ssa (Tienrakennustöiden valvontaohje. Pohjanvahvistustyöt. TVH 732177 1988.) esitettyjä ohjeita.

Painumien arvioinnin kannalta optimaalisin mittauskohde on tien keskilinjalla. Mittareiden tarkempi sijoitus ja lukumäärä poikkileikkausta kohti (tyypillisesti 2...4 kpl) riippuvat kuitenkin mm. tien leveydestä ja työnaikaisen liikenteen tarpeista. Mittareita sijoitetaan yleensä laskentapoikkileikkauksiin sekä tarpeen mukaan myös muihin poikkileikkauksiin. Asennustiheys tien pituussuunnassa riippuu kohteen laajuudesta, painuvien maakerrosten homogeenisuudesta jne, tyypillisesti mittauspöikkileikkausten väli on 100...200 metriä. Mittareiden tarkempi sijainti ja asennustiheys toteutetaan suunnittelijan antamien ohjeiden perusteella.

Paitsi painumalevyjä, mittauksissa voidaan käyttää myös letkupainumamittareita. Näiden etuna on, etteivät ne haittaa työnaikaista liikennettä, ja niiden avulla voidaan myös mitata painumia tien käyttöaikana.

(3) Huokospainemittaukset

Huokospainemittausten tarkoituksena on selvittää huokospaineen kehittyminen ajan mukana pystyöjien välissä pohjamaassa. Huokospainekärjet asennetaan heti pystyöjien asentamisen jälkeen pystyöjien väliin kuvassa 29 esitetyllä tavalla. Kärjet sijoitetaan pehmeään pohjamaahan mielellään useisiin eri syvyyksiin. Huokospainekärkinä voidaan käyttää sekä avoimia että suljettuja kärkityyppejä, kunhan kärjen suodatinosan on ko. maalajiin sopiva. Kärkien asennuksessa ja mittauksissa noudatetaan TVO-88:ssa esitettyjä sekä valmistajien ohjeita.



Kuva 29: Huokospaineputkien sijainti pystyöjien välissä.

Huokospainekärjet asennetaan mittaustulosten vertailun takia laskentapaikkileikkauksiin painumalevyjen lähelle.

Huokospainekärkien korkeustaso vaaitaan heti asentamisen jälkeen sekä myös jokaisella mittauskerralla. Vaaitusten tarkoituksena on selvittää kärkien painumat huokosylipaineiden määrittämistä varten.

Huokosylipaineen referenssitason selvittämiseksi asennetaan huokospainekärkiä usein myös kuormitettavan alueen ulkopuolelle. Tässä yhteydessä myös varmistetaan, että alueella on koko esirakentamisajan toimintakuntoisia pohjavesiputkia.

Mittareiden suojaus

Mittareiden työnaikaisessa suojauksessa noudatetaan TVO-88:ssa (TVH 732177) esitettyjä ohjeita.

Vaiheittain rakentaminen

Jos ylipenger rakennetaan vaiheittain, penkereeseen pystyöjien väliin asennetaan etukäteen suojaputkia (\varnothing 110 mm), joiden läpi voidaan tarvittaessa tehdä siipikairauksia tai CPTu-kairauksia pohjamaan lujittumisen seurauksista varten.

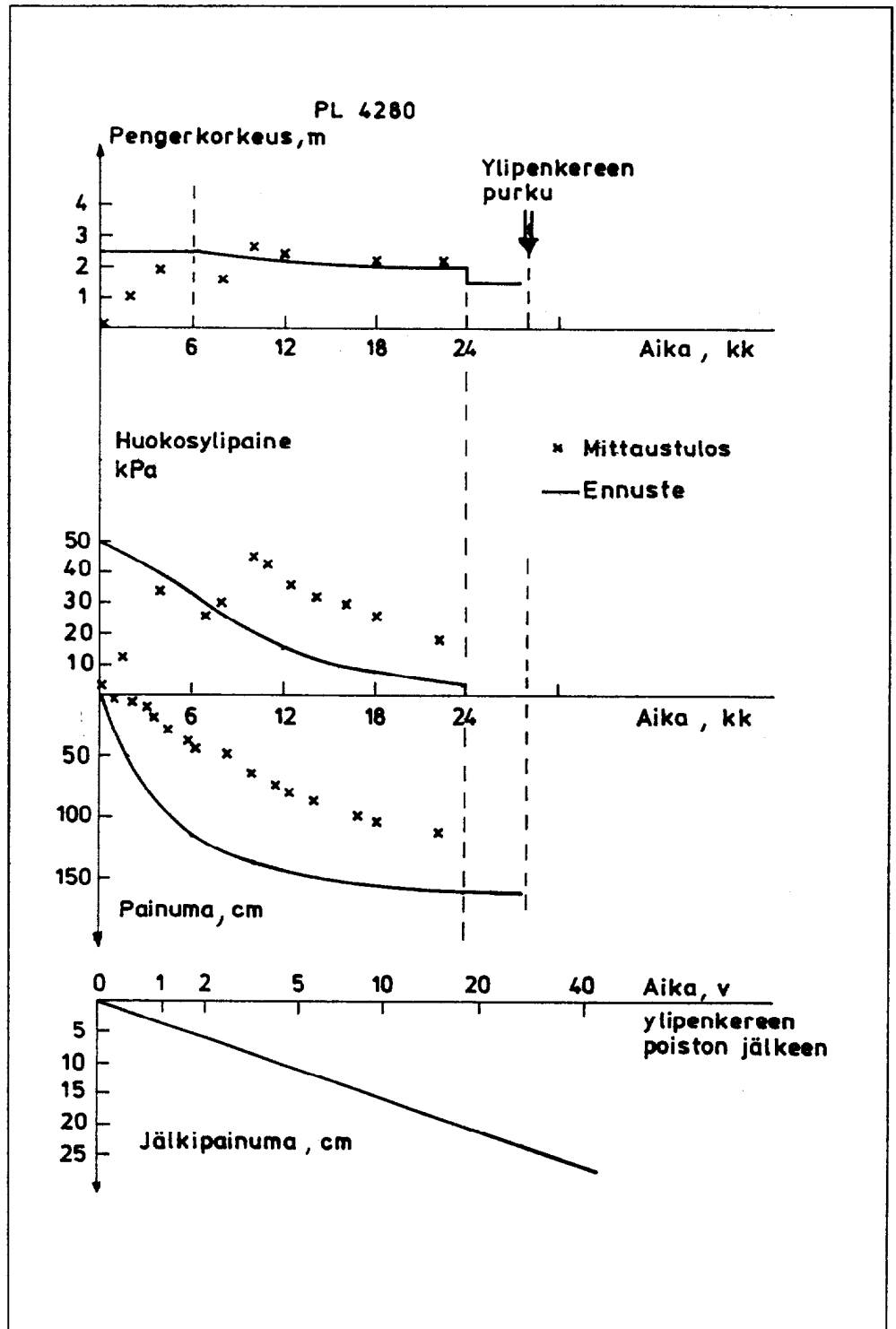
Mittaustiheys

Painuma- ja huokospainemittauksia sekä vaaituksia tehdään penkereen rakentamisaikana verraten tiheästi (kerran päivässä...kerran viikossa riippuen rakentamisaikataulusta), ja mittauskertoja harvennetaan esikuormitusajana (kerran 1...2 kk:ssa). Jos pengertä korotetaan välillä, tulee mittaukset tehdä vähintään sekä ennen että jälkeen korotuksen.

Tulostus

Painuma- ja huokospainemittaustulokset merkitään esivalmistettuihin tulostuspöytäkirjoihin. Vaaitustulokset esitetään joko pöytäkirjamuodossa tai valmiiksi tulostettuina poikkileikkauksina.

Osatavoitteiden ja myös lopullisen tavoitteen arvioimiseksi joudutaan käyttämään ekstrapolointia. Arviot ovat tästä syystä esikuormitusajan alkupuolella varsin karkeita mutta tarkentuvat yleensä esikuormitusajan loppua kohden. Lopullisena tavoitteena olevien käyttöaikaisten painumien arviointi pelkkien mittaustulosten perusteella saattaa joissakin tapauksissa (esim. humuspitoisissa maissa) jäädä epämääräiseksi, jolloin arvioissa joudutaan käyttämään hyväksi myös laboratoriotutkimustuloksia.



Kuva 31: Mittaustulosten ja ennusteen vertailu.

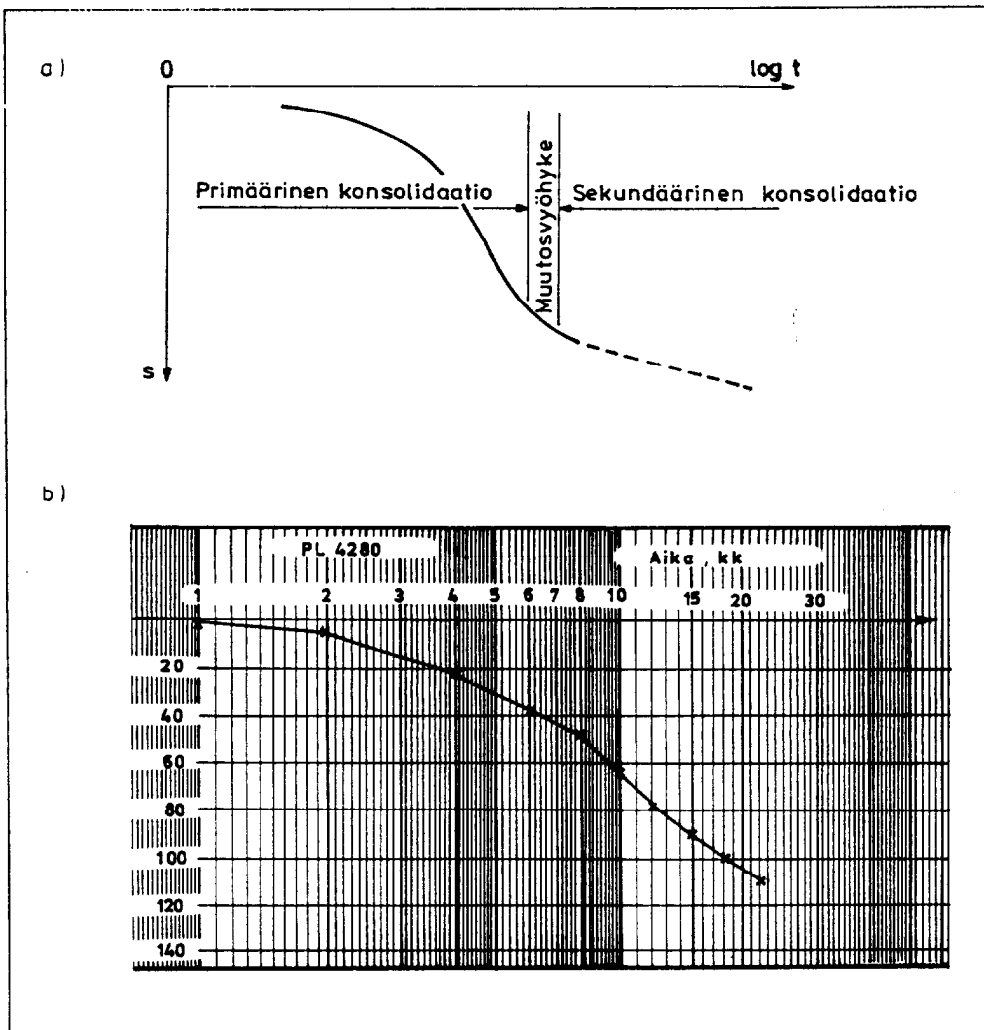
Ennen varsinaisten ekstrapolointimenetelmien käyttöä voidaan havainnoista tehdä muutamia johtopäätöksiä (kuva 31):

Huokosylipainehavainnot:

- Havaintopisteiden kaltevuuden perusteella saadaan karkea arvio huokosylipaineesta esikuormitusajan lopussa. Kun tästä vähennetään poistettavan ylipenkereen kuormitus, voidaan mahdollisen jäljelle jäävän huokosylipaineen perusteella arvioida jälkipainumia tai penkereen keventämistarvetta.

Painumahavainnot:

- Havaintopisteiden kaltevuuden ja kaltevuuden muutosten perusteella (ajan suhteen tasavälisessä koordinaatistossa) voidaan tehdä karkea arvio painuman suuruudesta esikuormitusajan lopussa.
- Piirtämällä painumahavainnot ajan suhteen logaritmiseen koordinaatistoon (kuva 32) voidaan tehdä arvio maakerrosten konsolidoitumistilasta. Tästä menetelmästä on erityistä hyötyä esikuormitusajan loppupuolella, kun painumanopeus on selvästi pienenevässä. Menetelmällä voidaan myös - yhdessä huokosylipaineista tehtyjen johtopäätösten kanssa - tehdä arvio tien käyttöaikaisista jälkipainumista.



Kuva 32: Painumahavainnot logaritmisessa koordinaatistossa. a) Tulkinnan periaate, b) esimerkki.

Tavallisimmat, ekstrapoloinnissa käytetyt tekniikat ovat seuraavat:

- (1) Asaokan menetelmä
- (2) Takaisinpäin laskennat
- (3) Käyrien sovitus

(1) Asaokan menetelmä

Asaokan menetelmä (Asaoka 1978) perustuu luvussa 5 esitettyyn radiaalisen konsolidaation differentiaaliyhtälöön ja sen ratkaisuihin. Menetelmää sovelletaan tavallisesti painumamittaustuloksiin. Asaokan menetelmän periaate on esitetty kuvassa 33.

Menetelmän lähtötietoina käytetään graafisia, ajan mukaan tasavälisessä koordinaatistossa esitettyjä painumamittaustuloksia. Käsittely jatkuu sen jälkeen seuraavasti:

- Valitaan aika-askel Δt . Teoreettisesti aika-askeleen suuruudella ei ole merkitystä, mutta käytännössä sopiva aika askel on tapauskohtainen ja löytyy kokeilemalla.
- Tehdään taulukko, jossa painumat on esitetty aika-askeleittain (kuva 33).
- Piirretään painumat taulukosta koordinaatistoon, jossa vaak akselina on painuma S_{i-1} ja pysty akselina painuma S_i (kuva 33).

S_i aikaa t_i vastaava painuma

S_{i-1} aikaa t_{i-1} vastaava painuma

- Piirretään origosta 45 asteen kulmassa oleva suora $S_i = S_{i-1}$.
- Piirretään havaintopisteiden kautta suora A, joka leikkaa origosta lähtevän suoran pisteessä B (kuva 33).

Painuma leikkauspisteessä B on lopullinen primaarinen konsolidaatiopainuma S_{pr} .

Suoran A kaltevuuskulman β avulla saadaan painuvien kerrosten keskimääräinen vaakasuora konsolidaatiokerroin c_h :

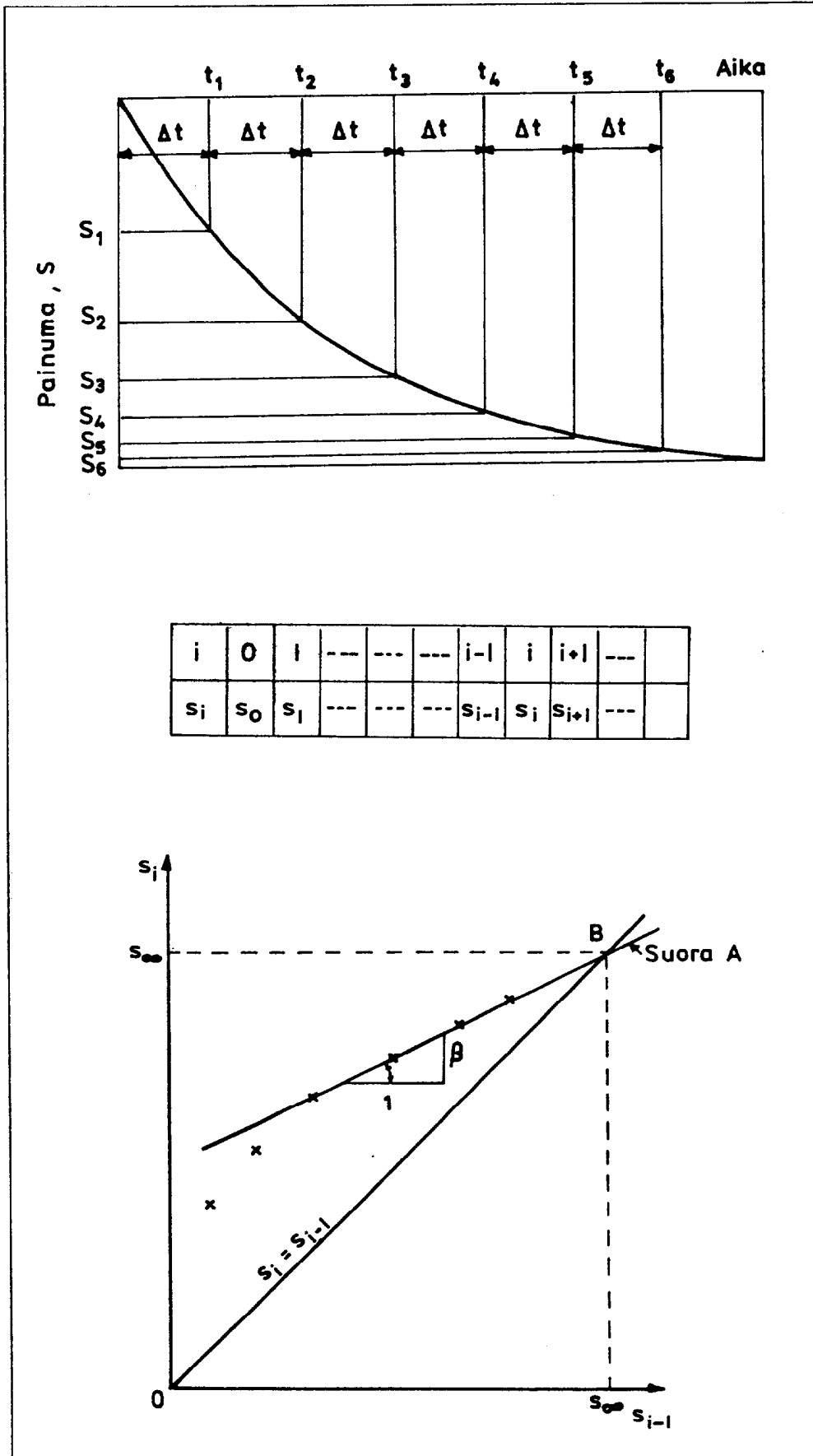
$$c_h = - D^2 F(n) \ln(\beta) / (8 \Delta t) \quad (7.1)$$

D pystyjojan vaikutusalueen halkaisija

F(n) funktio, katso luku 5.3.

Funktiolla F(n) voidaan ottaa huomioon myös maapohjan asennusaikeisen häiriintymisen ja pystyjojen virtausvastuksen vaikutus.

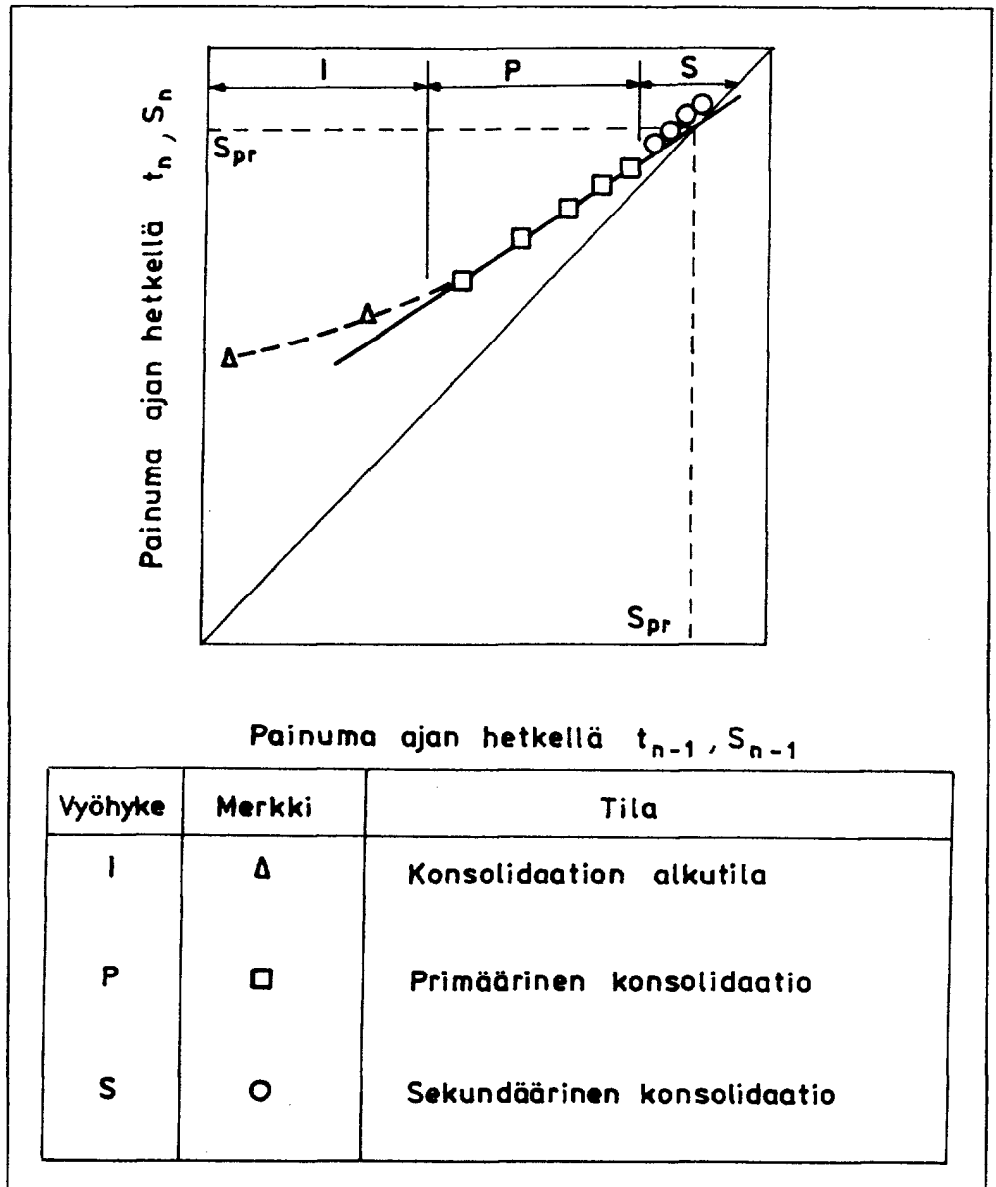
Edellä painuvaa maapohjaa on käsitelty yhtenä kerroksena (painumat mitattu suodatinkerrokseen asennetuilla painumalevyillä). Mikäli eri kerrosten painumia on mitattu esim. extensometreillä, voidaan Asaokan menetelmää soveltaa myös kerroskohtaisesti.



Kuva 33: Asaokan menetelmä.

Asaokan menetelmän käyttöön liittyy seuraavia rajoituksia:

- Menetelmä ei sovellu heterogeenisen kerroksellisen maapohjan analysointiin.
- Menetelmä ei sovellu tilanteisiin, joissa huokosveden virtaus ei ole pääasiallisesti radiaalista (esim. matalat pystyöjitetut pehmeiköt).
- Menetelmän käyttö edellyttää harkintaa, jos maapohjan sekundaariset painumat ovat merkittäviä (kuva 34).
- Menetelmä edellyttää kuormituksen pysyvän muuttumattomana.



Kuva 34: Asaokan menetelmän rajoituksia.

Asaokan menetelmän avulla saatua lopullista primaarista konsolidaatiopainumaa ja vaakasuoraa konsolidaatiokerrointa käytetään suunnitteluvaiheen laskentaparametrien tarkistukseen. Uusi, tarkistettu ennuste lasketaan tarkistettujen parametrien avulla, ja uuden ennusteen käyttökelpoisuutta verrataan vielä lisäksi mittaustuloksiin.

(2) Takaisinpäin laskennat

Takaisinpäin laskentojen (back-analysis) tarkoituksena on tavallisesti määrittää keskimääräinen vaakasuora konsolidaatiokerroin c_h . Jatkotyöskentelyssä tarvittava lopullinen primaarinen konsolidaatiopainuma selvitetään Asaokan menetelmän avulla.

Takaisinpäin laskennat voidaan tehdä sekä painuma- että huokosylipainehavaintojen avulla (kuva 35):

- Painumahavainnot:

Määritetään konsolidaatioaste $U_i = S_i / S_{pr}$

S_i painuma ajanhetkellä t_i (kuva 33)

S_{pr} lopullinen primaarinen konsolidaatiopainuma

Lasketaan aikatekijä T_{hi} (katso luvun 5.3 merkinnät):

$$T_{hi} = -F(n) \ln(1-U_i) / 8 \quad (7.2)$$

- Huokosylipainehavainnot:

Aikatekijä T_{hi} lasketaan seuraavasti:

$$T_{hi} = -F_u(n) \ln(u_i/u_0) / 8 \quad (7.3)$$

$F_u(n)$ funktio (luku 5.3)

u_i huokosylipaine ajanhetkellä t_i

u_0 huokosylipaine primaarisen konsolidaation alussa. u_0 määritetään joko mittaustulosten perusteella tai laskennallisesti (kaava 5.7 luvussa 5.3).

Vaakasuora konsolidaatiokerroin lasketaan sekä painuma- että huokosylipainehavainnoista aikatekijän määrittämisen jälkeen luotettavimmin ns. aikalisäysmenetelmällä (incremental-time method):

$$c_h = D^2(T_{hi} - T_{hj}) / (t_i - t_j) \quad (7.4)$$

$i > j$

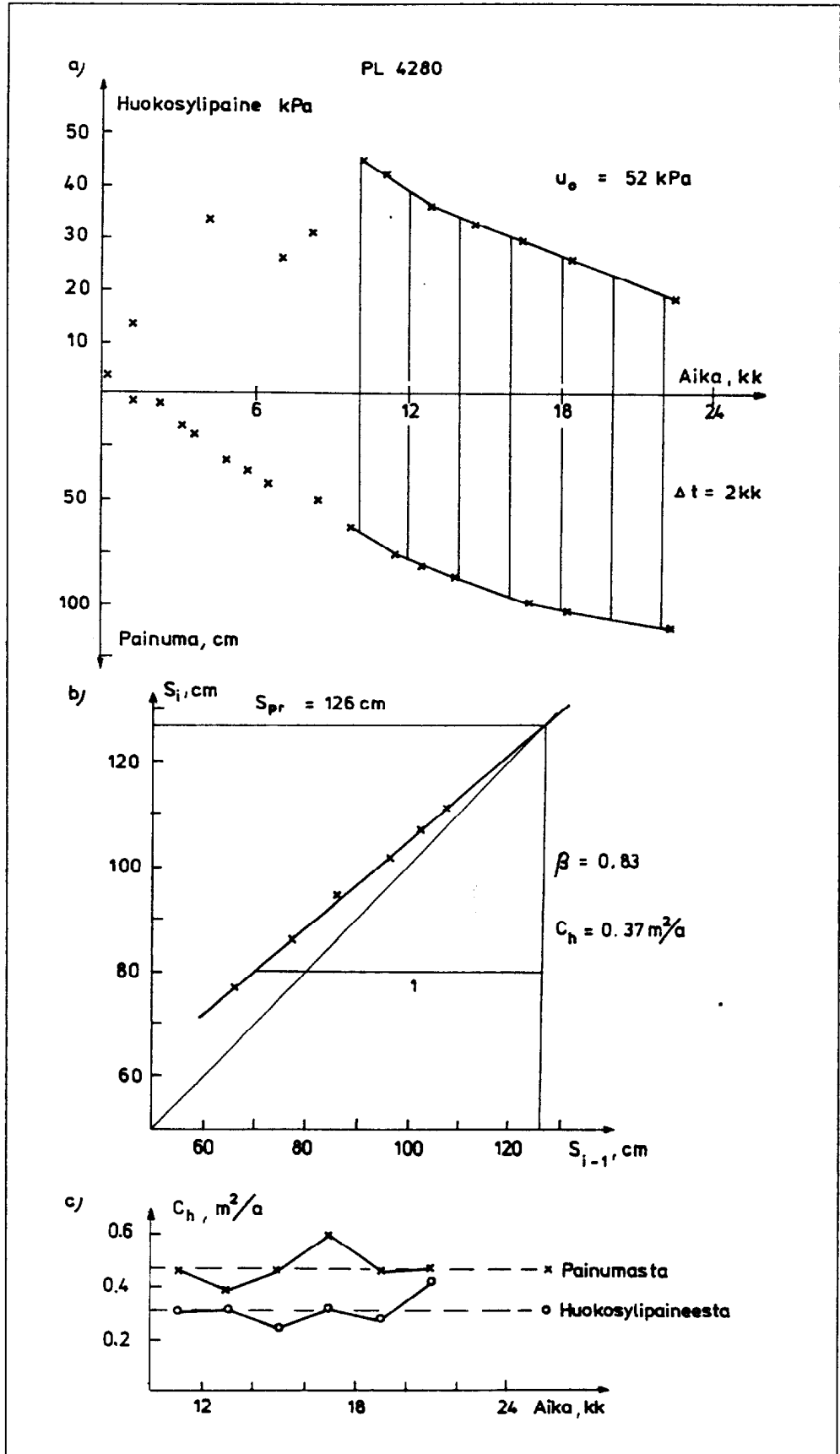
D pystyojan vaikutusalueen halkaisija

Painumahavainnoista lasketut konsolidaatiokertoimen arvot poikkeavat yleensä huokosylipaineista lasketuista. Jatkotyöskentelyssä huokosylipaineista saatuja arvoja käytetään lähinnä johtopäätösten varmistukseen.

Jatko tapahtuu tämän jälkeen samalla tavoin kuin Asaokan menetelmän yhteydessä.

Takaisinpäin laskentoihin liittyvät painumamittaustuloksia käytettäessä samat virhelähteet ja rajoitukset kuin Asaokan menetelmäänkin. Huokosylipainehavainnoja käytettäessä mahdollisia virhelähteitä ovat:

- Huokosveden virtaus ei ole radiaalista (pystyöjitetty matala tai kerroksellinen maapohja).
- u_0 :n määrittäminen (erityisesti ylikonsolidoituneessa maassa).
- Huokospainekärkien sijainti suhteessa pystyöjiin.
- Kuormituksesta aiheutuva huokosylipaineen kehittyminen tapahtuu ylikonsolidoituneissa savissa ja/tai pienillä varmuuskertoimilla eri tavalla kuin teoreettisissa malleissa, joissa maapohja otaksutaan normaali-konsolidoituneeksi ja varmuuskerroin suureksi.



Kuva 35: Esimerkki Asaokan menetelmän ja takaisinpäin laskennan käytöstä.
 a) Mittaustulokset, b) Asaokan menetelmä, c) takaisinpäin laskennan tulokset.

(3) Käyrien sovitus

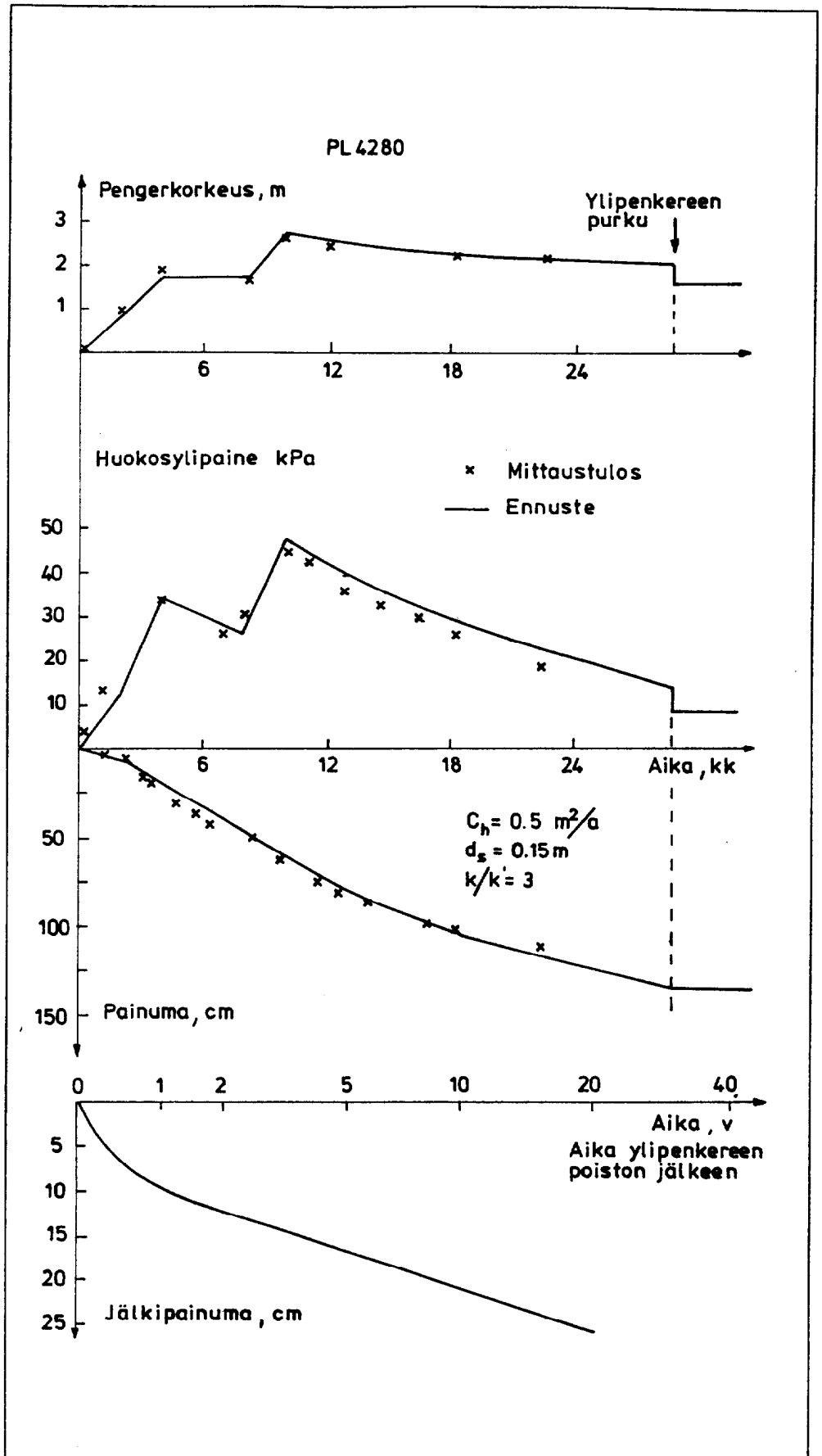
Menetelmän tarkoituksena on laskentaparametreja muuttamalla ja uudelleenlaskentoja käyttäen löytää parhaiten painuma- ja huokosylipainehavaintoja vastaavat jälkiennustekäyrät. Lähtökohtana laskentaparametrien arvioinneille voidaan käyttää Asaokan menetelmällä tai takaisinpäin laskennalla saatuja arvoja.

Käyrien sovituksessa kuten myös Asaokan menetelmän ja takaisinpäin laskentojen perusteella tehdyissä jälkilaskelmissa voidaan tarvittaessa ottaa huomioon jälkikäteen havaitut, kerrosrakenteeseen ja kuivatusreunaehtoihin liittyvät muutokset suunnittelutilanteeseen verrattuna.

Sovitus edellyttää laskelmien lukuisuuden ja mahdollisen monimutkaisuuden takia yleensä tietokoneohjelmien käyttöä. Ohjelmat voivat perustua luvussa 5 esitettyihin klassisiin pystyöjiteorioihin (normaalikonsolidoituneet tai lievästi ylikonsolidoituneet savet) tai elementtimenetelmään (ylikonsolidoitunut tai kerroksellinen maapohja, suotoveden moniulotteinen virtaus, plastisoituminen suljetussa tilassa). Edellisestä tapauksesta on esimerkkinä ohjelma PYSTIS (Vepsäläinen 1989) ja jälkimmäisestä CRISP (Britto & Gunn 1987), PLAXIS ja ZSOIL.

Käyrien sovituksessa on mahdollista ottaa - ohjelmasta riippuen huomioon myös sekundaaripainuman vaikutus, jolloin saadaan suoraan myös arviot tien käyttöaikaisista painumista.

Esimerkki käyrien sovituksesta on kuvassa 36.



Kuva 36: Esimerkki käyrien sovituksesta.

8 TYÖSAAVUTUKSIA JA KUSTANNUKSIA

Pystyöjituksen työteho työvuoroa kohti voi olla nykyaikaisilla pystyöjituskoineilla 6000 - 10000 jm. Keskimääräinen työteho on ollut noin 2000 jm (TIEL/U-piiri/1993).

Työsaavutusta lisääviä tekijöitä ovat (Rathmayer 1986):

- Suuri pehmeikön paksuus.
- Pehmeikkökerrostuman homogeenisuus.
- Pieni ojaväli.
- Asennusverkon suunnittelu koneelle sopivaksi.
- Ojan ankkuroinnin toimivuus.
- Työalustan kantavuus ja tasaisuus sekä pieni tunkeutumisvastus.
- Nauhapystyöjan katkaisun nopeus.

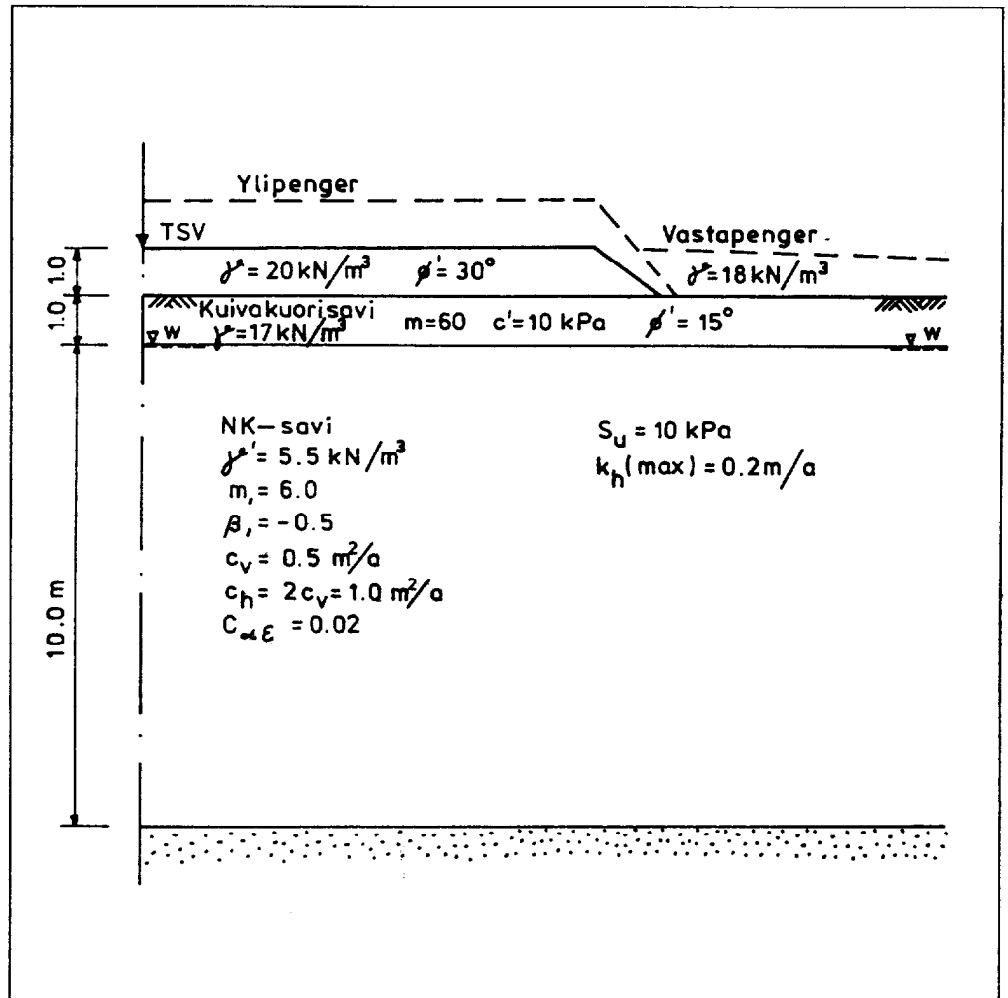
Hidastavia tekijöitä ovat:

- Ankkurilevyn kiinnityksen vaatima aika.
- Pehmeisiin kerroksiin ankkurointi.
- Työalustan kivisyys.
- Routaantunut pintakerros.
- Tiiviit kerrokset pehmeikön sisällä.

Nauhapystyöjien hinta asennettuna on vuonna 1993 ollut kohteen laajuudesta riippuen 4...7 mk/jm.

9 MITOITUSESIMERKKI

Tarkoituksena on määrittää taloudellisin pystyöjäväli kuvassa 37 esitetyllä tapauksella.



Kuva 37: Mitoitusesimerkki: Geometria ja parametrit.

Valmiin tiepenkereen leveys yläosastaan on 20 metriä ja korkeus alkuperäisestä maanpinnasta 1.0 m. Käytävissä oleva esikuormitusaika on 2 vuotta. Ojat rakennetaan nelikulmioverkkoon ja ulotetaan kovaan pohjaan.

Pystyöjien ekvivalenttihalkaisija $d = 0.065 \text{ m}$ ja virtauskapasiteetti $q_w = 300 \text{ m}^3/\text{a}$. Ojien asennusvaiheessa tapahtuvan häiriintymisen vaikutus otetaan huomioon seuraavilla parametreilla:

$$k_h / k' = 3$$

$$d_s = 0.15 \text{ m}$$

Tässä luvussa käytetään samoja symboleja ja niiden merkityksiä kuin luvussa 5.

Penkereen ja maakerrosten materiaaliparametrit on esitetty kuvassa 37.

Pystyöjavälin ja konsolidaatioasteen välinen suhde

Sijoitetaan parametrit kaavoihin 5.6 ja 5.9. Pystyöjien virtauskapasiteetin vaikutus havaitaan merkityksettömän pieneksi, jolloin kaavan 5.9 sijasta käytetään jatkossa kaavaa 5.8. Sijoitusten jälkeen saadaan seuraavat tulokset:

$$\begin{aligned} T_h &= 2 / D^2 \\ F(n) &= \ln(D) + 3.66 \\ U &= 1 - \exp(-8 T_h / F(n)) \end{aligned} \quad (9.1)$$

Taulukko 4: Pystyöjan vaikutusalueen halkaisijan D , konsolidaatioasteen U ja pystyöjavälin a välinen yhteys.

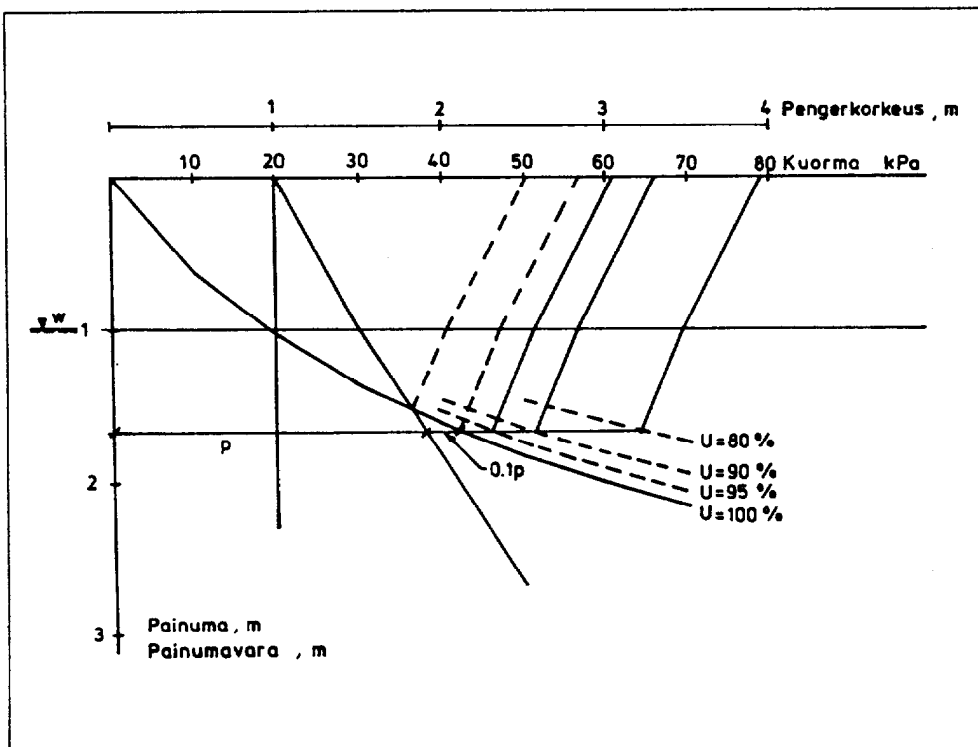
| $U, \%$ | D, m | a, m |
|---------|--------|--------|
| 80 | 1.56 | 1.38 |
| 90 | 1.33 | 1.18 |
| 95 | 1.18 | 1.05 |

Kaavassa 9.1 muuttujana on pystyöjan vaikutusalueen halkaisija D . Erilaisia D :n arvoja kokeilemalla laaditaan taulukossa 4 esitetyt yhteydet. Pystyöjaväli a nelikulmioverkossa lasketaan kuvan 13 perusteella.

$$a = D / 1.128$$

Esikuormituksen mitoitus

Esikuormituksen suuruus mitoitetaan kuvassa 16 esitettyä graafista menetelmää käyttäen. Koko pengerkuorma asetetaan vaikuttamaan heti esikuormitusajan alussa.



Kuva 38: Esikuormituksen mitoitus.

Ensiksi lasketaan primaarinen konsolidaatiopainuma tavanomaisella tavalla eri pengerkorkeuksille. Tulokset merkitään painumakuormakoordinaatioon kuvassa 38 esitetyllä tavalla. Samalla piirretään taulukossa 4 esitettyjä konsolidaatioasteita vastaavat painumakäyrät. Tämän jälkeen määritetään kokonaispengerkorkeus kuvassa 16 esitetyllä tavalla.

Sekundaaripainuman vaikutusta rajoitetaan lisäämällä pengerkorkeutta 0.1 p:n verran (kuva 38). Eri konsolidaatioasteita vastaavat pengerkorkeudet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Eri konsolidaatioasteita vastaavat pengerkorkeudet. Valmiin tiepenkereen korkeus 1.0 m.

| Konsolidaatioaste U % | Kokonaispengerkorkeus, m | Painumavara $s_p + \Delta s_p$, m | Poistettava ylipenger ΔH , m | Huom. |
|-----------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 100 | 2.50 | 1.50 | 0 | Pelkkä primaaripainuma |
| 100 | 2.85 | 1.65 | 0.20 | |
| 95 | 3.05 | 1.65 | 0.40 | |
| 90 | 3.30 | 1.65 | 0.65 | |
| 80 | 3.95 | 1.65 | 1.30 | |

Penkereen vakavuus

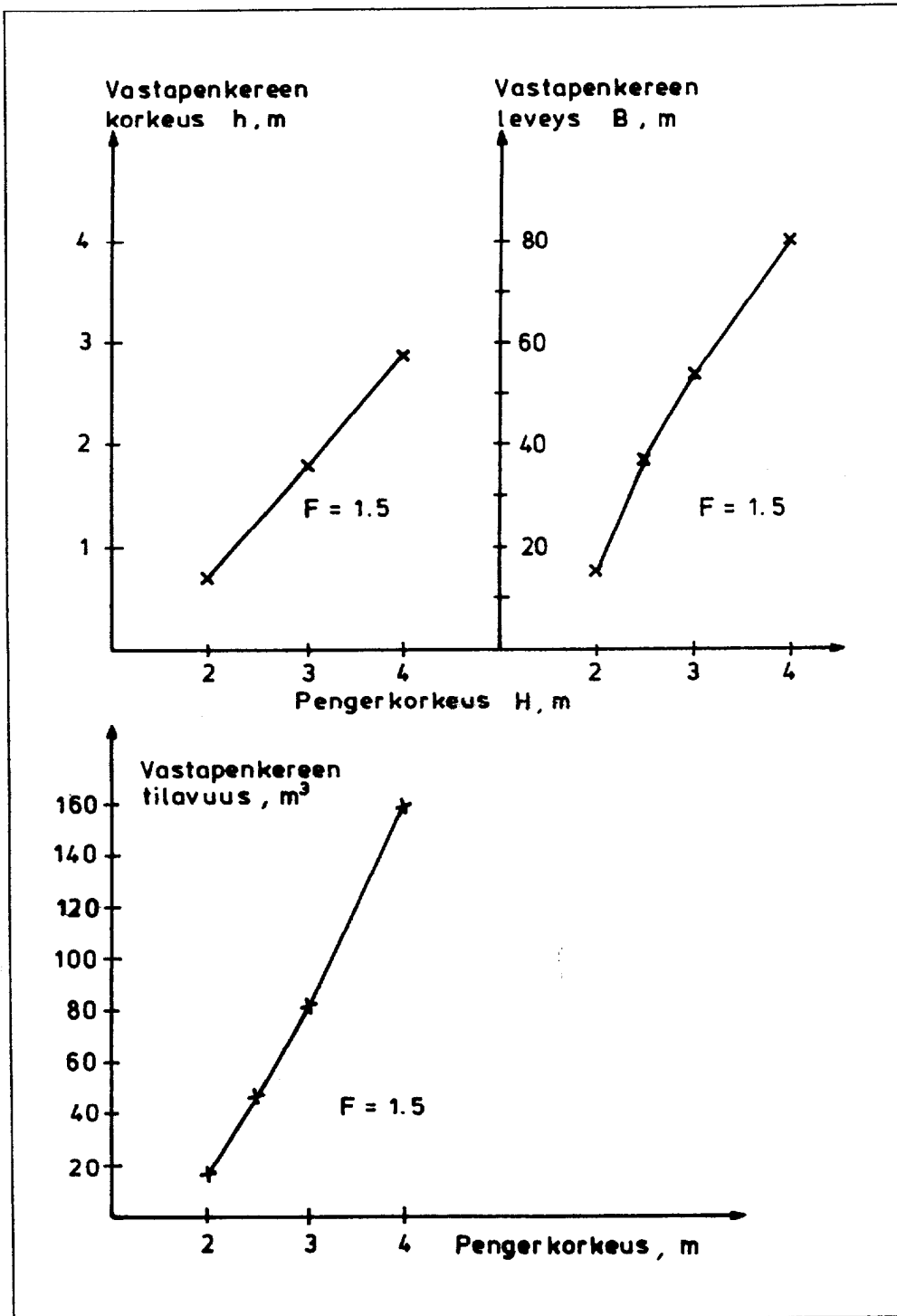
Penger ja vastapenkereet mitoitetaan siten että varmuuskerroin F on suurempi tai yhtäsuuri kuin 1.5. Mitoitus tehdään tavanomaisilla vakavuuslaskentamenetelmillä.

Vastapenkereen tarvittava korkeus, leveys ja massatilavuus tiepenkereen korkeuden funktiona on esitetty kuvassa 39.

Yhteenveto

Yhteenveto massamääristä ja kustannuksista tiemetriä kohti on esitetty taulukossa 6. Kustannuksista on jätetty pois ojituserroksen osuus, joka on katsottu likimain yhtä suureksi kaikissa vaihtoehdoissa.

Kustannusvertailun perusteella edullisin pystyöjaväli on 1.0 - 1.1 m.



Kuva 39: Vastapenkereen vakavuusmitoituksen tulokset.

Taulukko 6: Yhteenveto

| Konsolidaatioaste U % | 80 | 90 | 95 |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Pystyöjäväli, m | 1.38 | 1.18 | 1.05 |
| Pystyöjaa, m/tiem | 127 | 174 | 220 |
| Kustannus, mk á 6,- | <u>760</u> | <u>1040</u> | <u>1320</u> |
| Pengerkorkeus, m | 3.95 | 3.30 | 3.05 |
| Massamäärä, m ³ /tiem | 102 | 82 | 75 |
| Kustannus, mk á 30,- | <u>3060</u> | <u>2460</u> | <u>2250</u> |
| Vastapengeret | | | |
| Massat, m ³ /tiem | 320 | 210 | 160 |
| Kustannus, mk á 3,- (pengerrys) | <u>960</u> | <u>630</u> | <u>480</u> |
| Kustannukset yht. mk | <u>4780</u> | <u>4130</u> | <u>4050</u> |

10 KIRJALLISUUS

Asaoka, A., Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, no. 18, 1978.

Boman, P., Ny metod att dränera lera. *Väg- och vattenbyggaren* no 2, 1973.

Carrillo, N., Simple two- and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils. *J. Math. & Phys.*, 21, 1942.

Hansbo, S., Band drains. in *Ground Improvement*, edited by M.P. Moseley. Chapman & Hall, Cambridge, 1993.

Hansbo, S., Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. 10. ICSMFE, Stockholm, 1981. A.A. Balkema, Rotterdam, 1981.

Hansbo, S., Vertikaldränering. Byggnadsrådet, Stockholm, 1990.

Holtz, R.D., Treatment of problem foundations for highway embankments. National cooperative highway research program 147. Transportation research board, National research council, Washington, D.C., 1989. ISSN 0547-5570. ISBN 0-309-04557-6.

Holtz, R.D., Jamiolkowski, M.B., Lancellotta, R., Pedroni, R., Prefabricated vertical drains: Design and performance. CIRIA Ground Engineering Report: Ground Improvement. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford 1991.

Insinööritoimisto Y-Suunnittelu, Naantalin - Turun maantien nro 189 rakentaminen, pystyöjitus, loppuraportti. Helsinki 1989. TIEH 733342.

Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., Wolski, W., Precompression and speeding up consolidation. General Report. 8. ECSMFE, Helsinki 1983. A.A. Balkema, Rotterdam, 1984.

Komulainen, H., Rathmayer, H., Pystyöjanauhojen laatuvaatimukset. Laadunvalvonta ja testausmenetelmät. Tielaitoksen selvityksiä 1/1992, Helsinki 1992. TIEL 3200057.

Kremer, R., Recent findings in the field and laboratory on the integrity and the durability of prefab. drains. Spec. session 6., 8. ECSMFE, Helsinki 1983. A.A. Balkema, Rotterdam, 1984.

Leroueil, S., Embankments on soft clays. Luennot TKK, Otaniemi, 8.-10.06.1993.

Leroueil, S., Magnan, J.-P., Tavenas, F., Embankments on soft clays. Ellis Horwood, Chichester, 1990.

Olson, R.E., Ladd, C.C., One-dimensional consolidation problems. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 105, no. 1, 1979.

Pilot, G., Chaput, D., Queyroi, D., Improvement of soft clay properties - usual methods. Chapter 5 in *Embankments on soft clays*, Special Publication, Bulletin of the Public Works Research Centre (KEDE), Athens, 1987.

Pohjarakennussuunnitelmat. Esitystapa. Tielaitos. Tiehallitus. Toukokuu 1990. TIEL 703435.

Pohjonen, A., Liuskapystyöjäsentien toiminnasta. Tielaitoksen selvityksiä 2/1990, Helsinki 1990. TIEL 703344.

Rathmayer, H., Esikonsolidointi. Pohjarakenteet. RIL 166. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki 1986.

Tanska, H., Suljetun leikkauslujuuden kasvu konsolidaatiopainuman aikana. Erikoistyö, TKK, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, pohjarakennus ja maamekaniikka, 1993.

Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Perustus-, tukemis- ja lujitustyöt. Tielaitos. Tiehallitus. Helsinki 1991. TIEL 2212456.

Tsytoich, N., Soil mechanics. Mir Publishers, Moscow, 1976.

TVO Tienrakennustöiden valvontaohje. Pohjanvahvistustyöt. Tie- ja vesirakennushallitus. Maatutkimustoimisto. Helsinki 1988. TVH 732177.

Vepsäläinen, P., A calculation model for vertically drained fields. 12. ICSMFE, Rio de Janeiro 1989. A.A. Balkema, Rotterdam, 1989.

Vertikaldränering. Vägverket, Serviceavdelningen, Väg- och Brokonstruktion. Publ. 1987:30.

Vesala, E., Maapohjan esikonsolidointi. Geomekaniikka II. RIL 1572. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki 1990.

Yrjänä, J., Korhonen, O., Pystyöjitus Pikku-Huopalahdessa. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Tiedote 55/1991. Helsinki 1991.