

20030456



TIEHALLINTO

## Tien perustamistavan valinta

08 TIEH/TIE

VANHENTUNUI

# Tien perustamistavan valinta

Suunnitteluvaiheen ohjaus



Tiehallinto

Helsinki 2003

ISBN 951-803-060-X  
TIEH 2100019-03

Oy Edita Ab  
Helsinki 2003

Julkaisua myy/saatavana:  
Tiehallinto, julkaisumyynti  
Telefaksi 0204 22 2652  
S-posti [julkaisumyynti@Tiehallinto.fi](mailto:julkaisumyynti@Tiehallinto.fi)  
[www.Tiehallinto.fi/julk2.htm](http://www.Tiehallinto.fi/julk2.htm)



Painotuote

**Tiehallinto**  
TEKNISET PALVELUT  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelinvaihte 0204 2211

VASTAANOTTAJA  
Tiepiirit

SÄÄDÖSPERUSTA

KORVAA/MUUTTA  
TIEL 2180003 ja TIEL 3200446

KOHDISTUVUUS  
Tiehallinto

VOIMASSA  
Voimassa: 1.6.2003 – toistaiseksi

ASIASANAT

Pohjarakennus, geotekniikka, pehmeiköt, penkereet, luiskat, esisuunnitelmat, yleissuunnitelmat, tiesuunnitelmat, rakennussuunnitelmat

---

## TIEN PERUSTAMISTAVAN VALINTA, TIEH 2100019-03

Tämä ohje käsittelee pehmeiköille rakennettavien tiepenkereiden ja tieleikkausten pohjanvahvistusten ja pohjarakenteiden sekä luiskanvahvistusten ja tukirakenteiden valinnassa huomioonotettavia tekijöitä. Ohjeessa on pyritty tuomaan esille tämän hetkinen tiivistetty tieto elinkaarikustannusten laskennassa vaikuttavista asioista.

Tielaitoksen Geotekniikka ja geologia –sarjassa julkaistu suunnitteluohje Tiesuunnitelman pohjatutkimukset. Helsinki 1998. TIEL 2180003 ja Tielaitoksen selvityksiä –sarjassa julkaistu informaatiojulkaisu (79/1996) Pohjanvahvistusmenetelmän valinta Helsinki 1996. TIEL 3200446 poistetaan käytöstä.

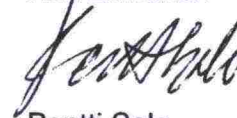
Ohjetta on painettu rajoitettu määrä ja sitä myy Tiehallinnon julkaisumyynti, email: [julkaisumyynti@tiehallinto.fi](mailto:julkaisumyynti@tiehallinto.fi). Se on myös kopioitavissa internetistä osoitteesta: <http://www.tiehallinto.fi/thohje>.

Kehittämispäällikkö  
Tie- ja geotekniikka

Tieinsinööri



Kari Lehtonen



Pentti Salo

LISÄTIETOJA

Pentti Salo  
Tiehallinto, Tekniset palvelut  
Puh. 0204 22 2145

JAKELU/MYYNTI

Tiehallinto, julkaisumyynti  
s-posti: [julkaisumyynti@tiehallinto.fi](mailto:julkaisumyynti@tiehallinto.fi)  
Telefaksi 0204 22 2652

TIEDOKSI

Ympäristöministeriö  
Tekniset yliopistot/korkeakoulut ja ammattikorkeakoulut  
VTT, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Suomen Kuntaliitto  
Rakennusteollisuus RT  
Suomen Maarakentajien Keskusliitto, SML  
Suomen toimitila- ja rakennuttajaliitto RAKLI  
Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL  
Ratahallintokeskus  
Ilmailulaitos  
Tieliikelaitos, konsultointi  
VR-Rata Oy Suunnitteluosasto  
Helsingin kaupungin geotekninen osasto  
Tie- ja geokonsultit  
Tiehallinto/Suunnittelu- ja hankintaprosessi

## ESIPUHE

Tien perustamistavan valinta on jatkuva prosessi, joka alkaa esisuunnitteluvaiheessa ja jatkuu yleis- ja tiensuunnitteluvaiheissa. Perustamistavan lopullinen valinta tapahtuu rakennussuunnitteluvaiheessa.

Tiehallinnon urakoissa rakennussuunnittelu tulee vastaisuudessa usein sisältymään urakkaan. Tämän tapaisissa urakoissa perustamistavan lopullisen valinnan tulee suorittamaan urakoitsija tilaajan antamien reunaehtojen mukaisesti.

Vaikka tien lopullinen perustamistapa valitaankin lopullisesti vasta rakennussuunnitteluvaiheessa, tiensuunnitteluvaihe ja sitä edeltävät suunnitteluvaiheet sekä urakkaohjelma ovat merkittäviä, koska niissä vaiheissa luodaan ne puitteet, joiden mukaan valinta tapahtuu. Rakennussuunnittelua edeltävissä vaiheissa valintaa säädellään mm seuraavin keinoin:

- viimeistään tiesuunnitelmavaiheessa määritetään tien painumatasaisuuden vaatimukset
- viimeistään tiesuunnitelmavaiheessa määritetään perustamistapaa tai pohjanvahvistustapaa varten käytettävissä oleva tiealue
- urakkaohjelmassa määritetään, miten erilaisten tarjottujen ratkaisujen aiheuttamat elinkaarikustannukset otetaan huomioon suunnittelussa
- budjettipäätöksellä määrätään hankkeen aikataulu. Lyhyt rakentamisaikataulu karsii pois pitkän rakentamisajan vaativat ratkaisut.

Tämä ohje painottuu pääasiassa käsittelemään eri pohjanvahvistusmenetelmien vertailua tiensuunnitteluvaiheessa ja rakennussuunnitteluvaiheessa. Esisuunnitteluvaiheita on käsitelty lyhyesti.

Ohjeen laatimista varten perustettiin työryhmä, johon ovat kuuluneet ohjeen kirjoittaja Antti Junnila Innogeo Oy:stä, Mikko Smura Tieliikelaitoksesta sekä Ari Perttu, Petter Sandin ja Pentti Salo Tiehallinnosta.

Ohjeluonnosta pyydettiin ja saatiin lausuntoja. Ohje on viimeistelty työryhmässä ja Tiehallinnon tie- ja geotekniikka -ryhmässä.

Helsinki, toukokuu 2003

Tiehallinto  
Tekniset palvelut

**Sisältö**

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>9</b>
1.1	Ohjeen tarkoitus ja sisältö	9
1.2	Ohjeen liittyminen muihin ohjeisiin	9
<b>2</b>	<b>POHJANVAHVISTUS- JA PERUSTAMISMENETELMÄT</b>	<b>10</b>
2.1	Penkereiden perustamistavat	10
2.1.1	Perustamistavan valinnan tavoitteet	10
2.1.2	Maanvarainen penger, vastapenger, esikuormitus	10
2.1.3	Pystyjoitus	12
2.1.4	Pengerkevennys	14
2.1.5	Lujitteet ja telat	16
2.1.6	Massanvaihto	17
2.1.7	Syvästabilointi	19
2.1.8	Paalulaatta- ja paaluhatturakenteet	21
2.1.9	Pehmeikkösillat	23
2.1.10	Ratkaisujen yhdistelmät	23
2.1.11	Meluvallien perustamistavat	23
2.2	Painumatarkastelut	24
2.2.1	Painumatarkastelut ratkaisun valintaa varten	24
2.2.2	Painumatarkastelujen riippuvuus pohjasuhteista	25
2.2.3	Eri tavoilla perustettavien penkereiden painumien vertailu	26
2.3	Leikkausten vahvistamismenetelmät	27
2.3.1	Vahvistamismenetelmän valinnan tavoitteet	27
2.3.2	Luiskan kaltevuuden valinta	27
2.3.3	Kevennysleikkaus	28
2.3.4	Massanvaihto luiskassa	29
2.3.5	Tukiseinärakenteet	30
2.3.6	Syvästabilointi luiskanvahvistuksena	31
2.3.7	Luiskapaalutus	32
2.3.8	Tukimuurit ja kaukalot	33
2.3.9	Luiskanvahvistusmenetelmien yhdistelmät	33
2.4	Pohjavedenalennus	33
<b>3</b>	<b>RATKAISUN VALINTA ELINKAARIKUSTANNUSTEN PERUSTEELLA</b>	<b>35</b>
3.1	Tekniset perusvaatimukset	35
3.2	Painumatasaisuuden vaatimukset	35
3.3	Rakentamiskustannukset	36
3.4	Ylläpitokustannukset	37
3.5	Ympäristövaikutukset ja ympäristökuormitukset	38

---

3.6	Pohjarakenteiden pitkäaikaiskestävyys	39
3.7	Pohjarakennustyön onnistumisvarmuus	41
3.8	Muut tekijät	41
3.8.1	Tilantarve	41
3.8.2	Tarvittava rakentamisaika	41
3.8.3	Työnaikainen liikenne	42
3.8.4	Tulevat rakentamisvaiheet	42
3.8.5	Tien käyttäjän kustannukset	42
3.9	Vaihtoehtojen karsiminen ja valikointi	43
3.9.1	Pohjasuhteet, tiegeometria ja pakkopisteet	43
3.9.2	Kirjavuuden vähentäminen	44
3.10	Ratkaisun valinta elinkaarikustannusten perusteella	45
4	POHJARAKENNUSRATKAISUN VALINTA ERI VAIHEISSA	46
4.1	Esisuunnitteluvaiheet	46
4.2	Tiesuunnitelmavaihe	47
4.3	Rakennussuunnitteluvaihe	47
4.4	Sopimusmuotojen vaikutus ratkaisun valintaan	48
5	KIRJALLISUUS	49
6	LIITTEET	51

---



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Ohjeen tarkoitus ja sisältö

Ohjeen tarkoitus on esittää pohjarakennusratkaisun valinnassa huomioon otettavat tekijät sekä kuvata elinkaarikustannusten perusteella tapahtuvan valinnan kulku.

Ohjeessa käsitellään sekä penkereitä että leikkauksia pehmeiköillä.

## 1.2 Ohjeen liittyminen muihin ohjeisiin

Tiehallinnon pohjarakentamista koskevat yleisohjeet:

- Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. TIEH 2100002-01. Tiehallinto 2001.
- Geotekniset laskelmat. TIEL 2180002. Tielaitos 1996.

Menetelmäkohtaiset suunnitteluohjeet, pohjatutkimuksia käsittelevät julkaisut ja muut julkaisut:

- Syvästabiloinnin suunnitteluohje, TIEH 2100008-01. Tiehallinto 2001. Ohje.
- Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, TIEH 2100007-01. Tiehallinto 2001. Ohje.
- Tien kevennysrakenteet, TIEL 3200475. Tielaitoksen selvityksiä 28/1997.
- Maanvarainen tiepenger savikolla: Suunnitteluohje, TIEL 3200276, Tielaitoksen selvityksiä 67/1994.
- Nauhapystyöjitus, TIEL 3200251. Tielaitoksen selvityksiä 42/1994.
- Tiepenkereen siirtymärakenteet pehmeiköillä, TIEL 3200248. Tielaitoksen selvityksiä 39/1994.
- Massanvaihto, TIEL 3200127, Tielaitoksen selvityksiä 2/1993.
- Teiden pehmeikkötutkimukset. TIEL 3200520. Tielaitos 1998.
- Tieleikkausten pohjatutkimukset. TIEL 3200354. Tielaitos 1995.
- Tien perustamistavan valinta. TIEH 2100019-03. Tiehallinto 2003

Tämän ohjeen aihepiiriin liittyvä Tiehallinnon julkaisu:

- Pohjarakentamisen kustannustietoja. TIEH 4000330. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 2002.

## 2 POHJANVAHVISTUS- JA PERUSTAMISMENETELMÄT

### 2.1 Penkereiden perustamistavat

#### 2.1.1 Perustamistavan valinnan tavoitteet

Tiepenkereen perustamistavan valinnassa perusvaatimukset ovat:

- riittävä varmuus tiepenkereen sortumaa ja heikosta vakavuudesta aiheutuvia siirtymiä vastaan
- painumien pysyminen hyväksyttävissä rajoissa.

Varmuuslukujen vaadittavat arvot sekä sallittujen painumien ohjearvot on esitetty Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteissa TIEH 2100002-01.

#### 2.1.2 Maanvarainen pengger, vastapenger, esikuormitus

Vakavuus- ja painumakriteerien salliessa tiepengger voidaan perustaa maanvaraisena ilman erikoistoimenpiteitä.

Vastapenger (ks. kuva 1) parantaa penkereen vakavuutta toimimalla vastapainona ja se mitoitetaan vakavuuden perusteella. Menetelmä soveltuu silloin, kun vakavuus on muutenkin melko lähellä riittävää (kokonaisvarmuusluvun suuntaa-antava arvo savipehmeiköillä vähintään 1,2). Maaston sivukaltevuus heikentää vastapengerin tehokkuutta.

Painumiin vastapengerin vaikutus on yleensä hyvin pieni. Syvillä pehmeiköillä vastapengerin kuormittava vaikutus ulottuu varsinaisen penkereen alle ja jonkin verran kasvattaa konsolidaatiopainumaa, mikä saattaa joskus olla edullista tien poikkikaltevuuksien säilyttämisen kannalta. Toisaalta vastapengerillä voidaan vakavuutta usein parantaa minimivaatimusta enemmän ja tällöin voidaan pienet plastiset muodonmuutokset kokonaankin estää.

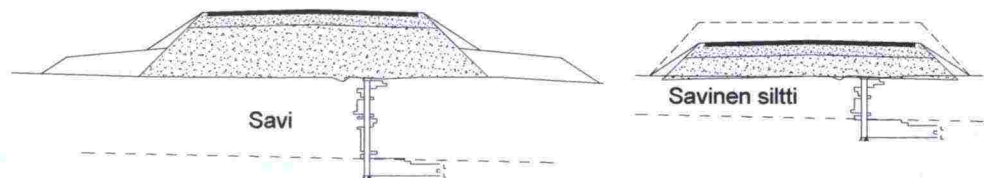
Vastapenger on rakennuskustannuksiltaan huokea menetelmä ja useimmiten suoranaista säästöä siihen nähden, että vastapengerin käyttöön käytettävät massat jouduttaisiin kuljettamaan läjitysalueelle. Useimmiten huonolaatuisetkin massat kelpaavat vastapengerin käyttöön. Vastapengerin käyttöä käytettäessä vakavuutta kannattaa useimmiten parantaa minimivaatimuksia enemmän.

Vastapengerin käyttöä rajoittaa usein tilantarve. Vastapengerin tarve ja käyttömahdollisuus on tiealueen hankintaa varten pystyttävä määrittämään tiesuunnitelmavaiheessa.

Jos vastapenger tulee painumaan huomattavasti, esimerkiksi turvepehmeiköillä, painuma voi vaikuttaa pääpenkereen vakavuuteen. Joissain erikoistapauksissa on päädytty osittaiseen massanvaihtoon vastapengerin alla painumien rajoittamiseksi ja vastapengerin painon lisäämiseksi.

Esikuormituksella voidaan pienentää käyttövaiheen aikaisia painumia. Esikuormituksen käyttäminen edellyttää varsinkin savipehmeiköillä, että penkereen vakavuus on riittävä. Erilaisia esikuormitusratkaisuja ovat:

- penkereen rakentaminen lopulliseen korkeuteensa hyvissä ajoin ennen tien ottamista liikenteelle.
- penkereen korottaminen em. tasoon vaiheittain vakavuuden pitämiseksi riittävänä (vain siltipehmeiköillä).
- penkereen kuormittaminen lopullista pengerkorkeutta suuremmalla kuormalla ennen tien ottamista liikenteelle (ylipenkereen käyttö, ks. kuva 1).



Kuva 1 Vasta- ja ylipenger

### Varmistettavat asiat

Perustettaessa penger maanvaraisena, mahdollisesti vastapenkereitä ja/tai esikuormitusta käyttäen, on varmistettava:

- Maakerrokset ja niiden lujuusominaisuudet erityisesti vakavuuden kannalta kriittisimmillä kohdilla ja varmuusluvun suuruusluokasta riippuen laajemmaltikin.
- Erityisesti vastapenkereitä käytettäessä maakerrokset ja niiden lujuusominaisuudet riittävän leveällä alueella.
- Maakerrosten painumaominaisuudet, yleensä ödometrikokein, jotta odotettavissa olevien painumien suuruus ja nopeus voidaan laskea. Eriyistä huomiota kiinnitetään painumaominaisuuksien ja kovan pohjan vaihteluun.
- Esikuormitusta käytettäessä kiinnitetään erityistä huomiota painumanopeuden selvittämiseen, jotta esikuormituksen tehokkuus voidaan arvioida. Varsinkin ylipengertä käytettäessä tarvitaan tarkat lujuustiedot, jotta ylipenger voidaan mitoittaa optimaalisesti.

### Ratkaisun riskit

Penkereen vakavuus voi jäädä tavoiteltua heikommaksi, jos maaston sivukaltevuuden vaikutus aliarvioidaan taikka lujuudeltaan heikko maakerros jää pohjatutkimuksissa löytymättä.

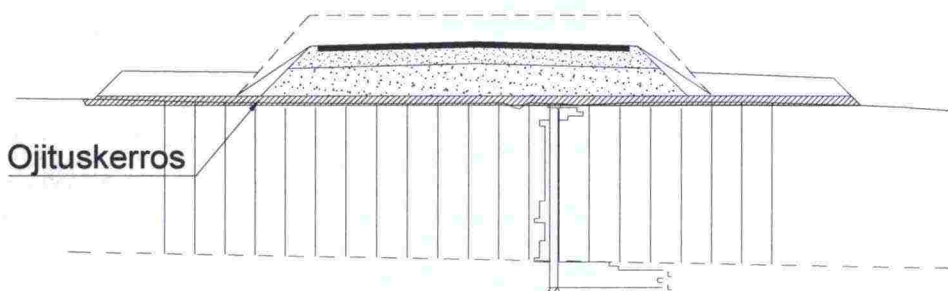
Painumat saattavat muodostua odotettua epätasaisemmiksi. Oikein tehdyn painumalaskelman tarkkuudeksi voidaan arvioida  $\pm 30\%$ . Tämä ei yleensä aiheuta ongelmia tasalaatuisina jatkuvissa pohjasuhteissa. Sen sijaan pohjasuhteiden muutoskohdissa tien kaltevuudenmuutokset voivat tulla tavoiteltua suuremmiksi muun muassa sen takia, että kahden pohjatutkimuspisteen välinen painumaero ei yleensä jakaudu tasan pisteiden välimatkalle vaan pohjasuhteiden muutos voi tapahtua oletettua jyrkemmin kyseisellä välillä.

Esikuormituksen pienentävä vaikutus käytönaikaisiin painumiin voi jäädä odotettua pienemmäksi painumanopeuslaskelmien epätarkkuuden taikka odotettua paksumpien savikerrosten takia.

### 2.1.3 Pystyjoitus

Pystyjoituksessa (ks. kuva 2) savikerrosten painumaa nopeutetaan 1-3 vuodessa tapahtuvaksi käyttäen nauhamaisia ojia, joiden avulla maahuokosista pusertuva vesi johdetaan maan pinnalle ja edelleen vettäjohtavan ojituskerroksen kautta avo-oihin. Tavallisesti pystyjoituksen yhteydessä tarvitaan painumien nopeuttamiseksi rakennusaikaisena esikuormituksena ylipenger ja riittävän vakavuuden varmistamiseksi vastapenkereet. Ylipenkereen asemasta on kokeiltu vakuumikonsolidaatiota, jossa esikuormitus aikaansaadään alipaineella ilman vakavuuden huononemista. Vakuumikonsolidaatio ei ole kuitenkaan osoittautunut normaalitapauksissa taloudellisesti kilpailukykyiseksi ratkaisuksi.

Pystyjoitus soveltuu käytettäväksi jokseenkin normaalikonsolidoituneilla savikoilla. Humuspitoisissa savissa voi esiintyä merkittävää sekundääripainumaa, johon pystyjoituksella ei voida vaikuttaa. Pystyjoitus on yleensä kustannuksiltaan edullinen pohjanvahvistusmenetelmä, jos rakentamisaikaa on riittävästi käytettävissä ja vakavuus saadaan riittäväksi.



Kuva 2 Pystyjoitus

### Varmistettavat asiat

Pystyöjituksen suunnittelua varten on selvitettävä:

- Penkereen vakavuus ja mahdolliset plastiset muodonmuutokset, myös ylipenkereen sekä mahdollisten vastapenkereiden käyttö huomioon ottaen.
- Eri maakerrosten painumaominaisuudet. Erityisen tärkeitä mitoituksen kannalta ovat konsolidaatiojännitys  $\sigma_c$  ja vaakasuuntainen konsolidaatiokerroin  $c_h$  sekä sekundäärisen konsolidaation tarkistaminen ainakin sillä tarkkuudella, onko se otettava huomioon.
- Rakentamisajan riittävyys ja vastapenkereiden käyttömahdollisuus.

### Ratkaisun riskit

Koska pystyöjituksen periaatteena on painumien nopeuttaminen, kaikki käyttövaiheen aikaiset painumat ovat erityisen haitallisia ja vaikeasti korjattavia, koska ne tapahtuvat nopeutuneina. Suunnittelunaikaisiin painumalaskelmiin taikka rakennusaikaisista painumahavainnoista tehtäviin johtopäätöksiin voi tulla liikaa optimistisuutta mm. seuraavista syistä:

- Pohjaveden alenemista ei oteta huomioon tai se aliarvioidaan, pohjaveden aleneminen tapahtuu vasta käyttöaikana taikka pohjavesi on esikuormitusvaiheen aikana tavallista korkeammalla, mikä kumoaa osan ylipenkereen vaikutuksesta.
- Kaikki esikuormitusvaiheen aikana tapahtuva painuma tulkitaan konsolidaatiopainumaksi, vaikka osa siitä onkin sekundääripainumaa taikka plastista muodonmuutosta. Em. painumalajit ovat oikeaan kohteeseen ja oikein suunnitellun pystyöjituksen yhteydessä lähes merkityksettömän pieniä.
- Painumaa ja konsolidoitumista tarkastellaan esikuormitusaikana yhtenä kokonaisuutena, mutta maakerrosten painumanopeus onkin vaihteleva.

Oleellinen asia pystyöjituksen onnistumisen kannalta on painuma-ajan riittävyys. Liian kireän aikataulun mukaisesti kuormitettujen pystyöjitusten epäonnistumisista on runsaasti kokemuksia.

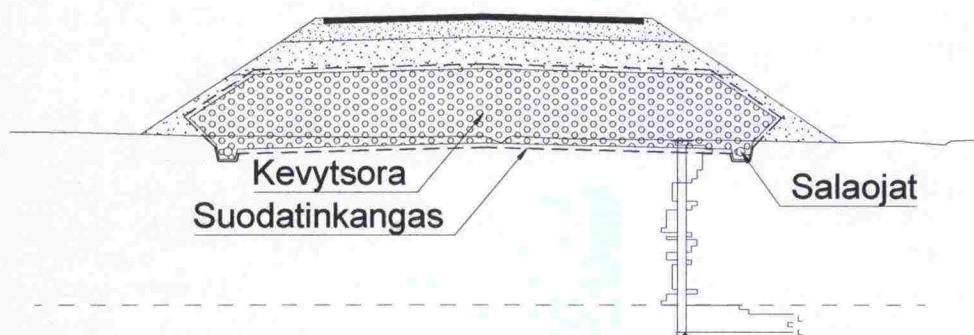
*Esikuormitukselle tulee suunnitella riittävän väljä aikataulu mm. työnaikaisten yllättävien viivästysten varalta. Esikuormitusta ei myöskään pidä lopettaa heti, kun se näyttäisi laskennallisesti olevan mahdollista.*

*Pystyöjituksen ja painumattomien perustamistapojen (paalulaattarakenne, syvästabilointi tai massanvaihto) väliset siirtymärakenteet ovat usein epäonnistuneet, vaikka laskelmat on tehty luotettavasti ja yleisesti hyväksytyjä menetelmiä käyttäen.*

### 2.1.4 Pengerkevennys

Käyttämällä tavallista kevyempiä pengermateriaaleja penkereen paino saadaan pieneneään, mikä parantaa penkereen vakavuutta ja pienentää painumia, ks. kuva 3. Tapauskohtaisesti vaihtelee varsin paljon, onko mitoituksessa määräävämpi kriteeri vakavuus vai painumat. Varsin tavallisia esimerkkitapauksia ovat seuraavat:

- Kevennys mitoitetaan vakavuuden perusteella ja kyseisellä kevennysmäärällä tapahtuvat painumat voidaan sallia.
- Painumakriteerien perusteella suunnitellaan suurempi kevennys kuin vakavuus vaatisi. Usein painuma pyritään kokonaan estämään keventämällä.
- Kevennys yhdistetään esikuormitukseen ja kevennyksen mitoitus voidaan varmentaa esikuormitusvaiheen tarkkailumittausten perusteella. Tämä on yleensä mahdollista vain siiltipehmeiköillä.



Kuva 3 Pengerkevennys

Pengerkevennys sopii monien muiden ratkaisujen kanssa yhdistettäväksi, se sopii muodoltaan helposti säädeltävänä esimerkiksi moniin siirtymärakenteisiin ja kevennyksen rakentaminen on nopeaa.

Tavallisin kevyt pengermateriaali on kevytsora. Sementillä tai bitumilla stabiloimalla kevytsoran kantavuutta voidaan lisätä. Suurimpaan kevennysvaiikutukseen päästään yleensä EPS-kevennyksellä. Muista materiaaleista yleisimpiä on rengasrouhe, joka materiaaliominaisuuksiensa takia soveltuu esimerkiksi nosteelle alttiisiin kohteisiin.

Erilaisilla kevyillä pengermateriaaleilla on hyvinkin toisistaan poikkeavat ominaisuudet päällysrakenteen mitoituksen kannalta ja päällysrakennerekaisun määrittäminen riittävällä tarkkuudella on välttämätöntä kevennysratkaisujen kustannustarkasteluja varten.

Kevennetyn penkereen suunnittelussa on tarkistettava myös nostesortuman vaara.

### Varmistettavat asiat

Pengerkevennystä varten tehtävien pohjatutkimusten ohjelmointi riippuu tapauskohtaisesti mitoituskriteereistä ja erilaisten kriteerien (vakavuus, painumat, joskus noste) määräävyys on selvitettävä etukäteen.

Penkereen vakavuuden selvittämistä varten maapohjan lujuus tutkitaan yleensä siipikairauksin. Niiden määrä riippuu siitä, kuinka määräävä kriteeri vakavuus on.

Kevennystä varten tarvittavan kaivannon vakavuuden tarkistaminen voi antaa aihetta siipikairausten lisäämiseen.

Maapohjan painumaominaisuudet, erityisesti konsolidaatiotila, tutkitaan ödometrikokein.

Pohjavedenpinta on selvitettävä maapohjan kuormitustilanteen määrittämistä varten. Mitoituksessa huomioonotettava pohjavedenaleneminen on erittäin tärkeä selvittää. Pohjavedenpinta ja penkereeseen rajoittuvien vesistöjen vedenpinta vaihteluineen on riittäväällä tarkkuudella tunnettava myös nostemitoitusta varten.

*Jos korkeinta mahdollista vedenpintaa ei pystytä luotettavasti arvioimaan, kannattaa nostemitoituksessa olettaa veden nousevan tienpintaan asti.*

### Ratkaisun riskit

Pengerkevennyksessä suurin epäonnistumisen riski on silloin, kun pyritään painumattomaan rakenteeseen, mutta tässä ei onnistuta. Melko pienikin painuma on haitallinen kevennetyn penkereen rajoutuessa painumattomaan rakenteeseen. Tällaisen ratkaisun epäonnistumiseen voi syynä useimmiten olla:

- pohjaveden alenemisen aliarviointi
- maapohjan konsolidaatiotilan väärinarviointi, jos esimerkiksi oletetaan nykyisen penkereen painumien jo tapahtuneen, mutta ne ovatkin vielä käynnissä
- mitoitusvirheet, esimerkiksi jos jännityksenjakautumaa ei ole huolellisesti tarkasteltu ottaen huomioon kevennyksen vaihteleva paksuus tien pituussuunnassa.

Muita syitä voivat olla:

- virheet toteutuksessa
- kevytsoran vettyminen ja muuttuminen painavammaksi puutteellisesti kuivatettuna.

Käytettäessä esikuormituksen ja pengerkevennyksen yhdistelmää sekä esikuormituksen aikaisia tarkkailumittauksia kevennyksen mitoitus voidaan tarkistaa optimaalisesti todellisen tarpeen mukaiseksi. Tämä on mahdollista yleensä vain siltipehmeiköillä.

Kevennettyjen penkereiden painumien korjaaminen savipehmeiköillä on hankalaa eikä painumattomaan ratkaisuun yleensä päästä ilman syvästabilointia tai paalulaattarakennetta.

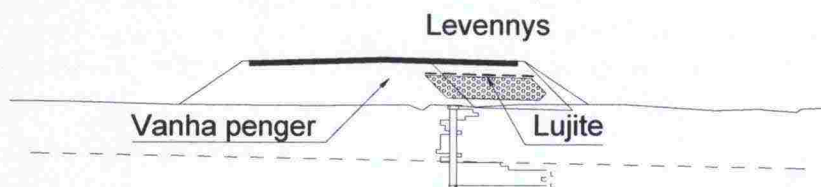
*Erilaisia vaihtoehtoja kevennetyn penkereen jälkipainumien korjaamiseksi ovat:*

- kevennyksen kasvattaminen syvemmälle kaivaen
- kevennysmateriaalin vaihtaminen vielä kevyempään
- päällysrakenteen ohentaminen erikoisratkaisuin, mikä puolestaan saattaa aiheuttaa liukkausriskiä
- syvästabilointi tai paalulaatta.

### 2.1.5 Lujitteet ja telat

Lujiteverkoilla (terasverkoilla ja hyvän jännitys – muodonmuutoskäyttäytymisen omaavilla muoviverkoilla), teräspoimulevyillä, puuteloilla taikka myös lujitekankailla voidaan parantaa penkereen vakavuutta ja riittävän järeillä lujitteilla hieman tasoittaa painumia. Menetelmä soveltuu käytettäväksi, kun vakavuus on muutenkin lähellä riittävää ja painumia voidaan sallia. Lujitteet soveltuvat käytettäväksi myös:

- pengerkevennyksen yhteydessä penkereen reunaosan vakavuuden parantamiseen, ks. kuva 4
- paaluhatturakenteissa estämään pengertäytteen valumista hattujen väleihin ja parantamaan hattujen pysymistä vaakasuorassa
- lisävarmistuksena siirtymärakenteissa
- tukimuurimaisissa rakenteissa.



Kuva 4 Lujite pengerkevennyksen yhteydessä.

Lujitteita on kokeiltu myös syvästabiloinnin ja paaluhatturakenteiden yhteydessä tehostamaan kuormien siirtymistä pilareille taikka paaluille, kun pilari-tiheys tai paaluhattujen peittävyys on tavanomaista pienempi.

Syvästabiloinnin yhteydessä käytettävän lujitemateriaalin tulee olla emäksisiä pilareita kestävä.

#### Varmistettavat asiat

Penkereen vakavuus ja painumat on selvitettävä samoin kuin maanvaraista pengertä varten.



Lujiterakenteen toiminnalle on välttämätöntä, että lujitteeseen mobilisoituu alkujännitys, mikä edellyttää jonkinsuuruista muodonmuutosta. Riittävän jäykästä lujitteesta on hyötyä pienehköilläkin muodonmuutoksilla. Kuitenkin esimerkiksi siirtymärakenteissa voi kahden rakenteen rajakohdassa käytettävä lujite olla hyödyllinen vastustamaan painumaeron syntymistä, vaikka painumaero ei laskennallisesti olisikaan odotettavissa.

Harkittaessa teräslujitteiden korroosion taikka muiden materiaalien vanhenemisen huomioonottamista mitoituksessa on syytä ottaa huomioon lujitteen tarpeellisuuden väheneminen maapohjan konsolidoituessa.

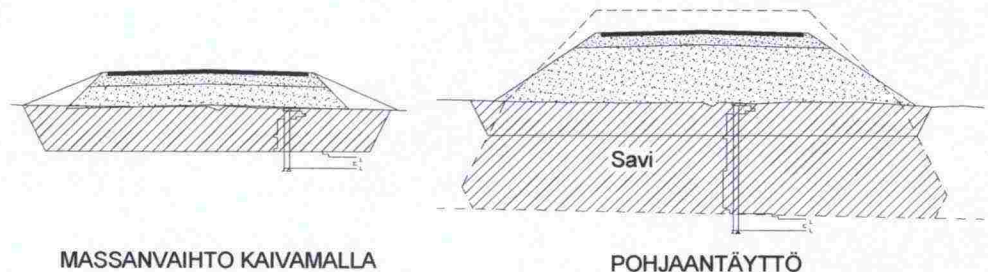
### Ratkaisun riskit

Lujite ei toimi, jos se ei ole riittävän jäykkä, jotta siihen mobilisoituisi jännitystä pienillä muodonmuutoksilla. Lujitteita tehdään mm teräksestä, puusta ja muovista. Eri materiaalien pitkäaikaiskestävyys on erilainen ja myös maaperäolosuhteet vaikuttavat kestävyteen. Lujitteita käytetään harvoin yksinomaaisena pohjanvahvistuskeinona, joten rakenteen sortumariskiä niihin ei yleensä sisälly.

### 2.1.6 Massanvaihto

Massanvaihdossa kaivamalla (ks. kuva 5) pehmeät maakerrokset kaivetaan pois kovaan pohjaan tai määräsyyvyyteen saakka ja korvataan karkearakeisemmilla täyttömassoilla. Menetelmän käyttöä rajoittavat lähinnä kaivannon vakavuuteen liittyvät tekijät ja kaivumassojen käsittelyn ympäristöhaitat erityisesti taajama-alueilla.

Massanvaihdossa pengertämällä eli pohjaantäytössä (ks. kuva 5) pehmeiden syvyys on niin suuri, ettei massanvaihto kaivamalla onnistu. Korkeana päätypengerryksenä etenevä täyttö syrjäyttää ja puristaa pehmeät maakerrokset penkereen sivuille ja eteen. Pohjamaata kaivetaan sekä ennen pengerrystä että yleensä myös pengerryksen aikana. Toteutettujen pohjaantäyttöjen syvyydet ovat yleensä olleet 4-13 m, syvin tietyvästi 18 m. Jotta syrjäyttäminen onnistuisi, kokonaisvakavuuden täytön etenemään suuntaan tulee olla riittävästi alle 1. Pehmeiden massojen syrjäytymisestä aiheutuvat ympäristövaikutukset voivat rajoittaa menetelmän käyttöä.



Kuva 5 Massanvaihto

## Varmistettavat asiat

Massanvaihdossa kaivamalla on varmistettava:

- Massanvaihtosyvyys riittävällä tarkkuudella.
- Kaivantoluiskien työnaikainen vakavuus varsinkin silloin, kun luiskan sortuminen tai liikkuminen voi aiheuttaa vahinkoa muille rakenteille taikka kaivussyvyys on poikkeuksellisen suuri. Kaivantoluiskien hetkellinen heikko vakavuus kuuluu menetelmän luonteeseen. Työturvallisuutta ei voida kuitenkaan missään tilanteissa vaarantaa.
- Massojen läjitettävyyden ja läjitysalueiden pohjasuhteet.
- Erikoistapauksissa massanvaihtokaivannon vaikutus pohjavedenpintaan tai pohjaveden laatuun taikka paineellisen pohjaveden vaikutus.

Massanvaihtosyvyyden tutkimustarkkuuteen liittyy seuraavia näkökohtia:

- Tärkeintä on varmistaa, ettei pehmeiden kerrosten paksuus jossain ole niin suuri, ettei massanvaihto kaivamalla onnistu.
- Jos kaivantoluiskan lähettyvillä on varottavia rakenteita, massanvaihtosyvyys on määritettävä tavallista tarkemmin, koska se vaikuttaa ratkaisevasti työnaikaiseen vakavuuteen.
- Massanvaihdon alle jätettävästä maakerroksesta on oltava näytetietoja, jotta tunnetaan maalajit ja niiden häiriintymisherkkyys ja kuinka hyvin suunniteltu massanvaihtoraja on kaivutöiden aikana tunnistettavissa.

Pohjaantäyttöä varten pitää pohjatutkimuksissa edellä esitettyjen asioiden lisäksi kiinnittää erityistä huomiota seuraaviin seikkoihin:

- Maapohjan lujuusominaisuudet: luonnontilainen lujuus, häiriintymisherkkyys ja häiriintynyt lujuus, lujuudenpalautumisominaisuudet häiriintymisen jälkeen, työtä hankaloittavat lujat välikerrokset.
- Pehmeiden massojen sivusiirtymien ympäristövaikutukset.
- Pohjaveden asema.

## Ratkaisun riskit

Massanvaihdot kaivamalla ovat yleensä onnistuneet. Massanvaihtosyvyyden kasvaessa kasvaa riski, että poiskaivu ja täytön tiivistäminen ei täysin onnistu ja pieniä jälkipainumia voi tapahtua. Massanvaihdon jälkipainumat ovat yleensä melko hyvin korjattavissa.

Jos massanvaihdon alle jätetään pehmeitä maakerroksia eli tehdään osittainen massanvaihto, tulee täyttömateriaalin valinnalla pyrkiä minimoimaan riski, että täyttömassat painuvat epätasaisesti pohjamaahan suunnitellun massanvaihtosyvyyden alapuolelle.

Pohjaantäytöt ovat yleensä onnistuneet. Epäonnistumisen riskiä kasvattaa suuri täyttösyvyys, täytön alarajan epämääräisyys, syrjäytettävien maakerrosten leikkauslujuuden vaihtelu taikka silttisyydestä aiheutuva nopea konsolidoituminen työn ollessa kesken. Riskejä voidaan pienentää mahdollisimman perusteellisella poiskaivulla, riittävän korkean murtoylipenkereen käytöllä, räjäytyksillä sekä pohjaantäyttötyön jälkeisellä esikuormituksella ylipengertä käyttäen.

Epäonnistuneissa pohjaantäytöissä voi esiintyä jälkipainumia, jotka ovat osin konsolidaatiopainumia ja osin plastisia muodonmuutoksia ja sivusiirtymiä. Niiden perusteellinen korjaaminen voi vaatia täytön leventämistä, penkereen alle jääneiden pehmeiden maakerrosten syrjäyttämistä räjäyttämällä tai täytön pudotustiivistämistä, mutta useimmiten ko. painumat hidastuvat ja loppuvat ajan myötä. Penkereen tasoittaminen päällysteellä on pohjaantäytöissä niin pieni lisäkuorma, ettei se yleensä kiihdytä painumia.

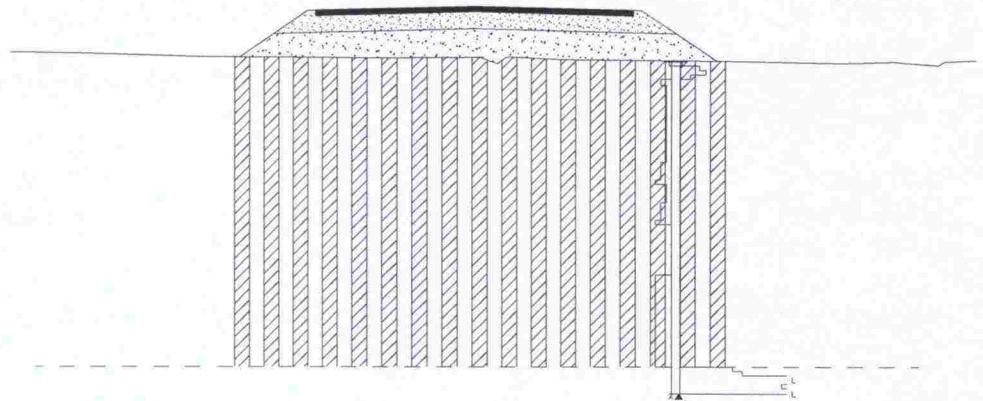
### 2.1.7 Syvästabilointi

Syvästabiloinnissa heikosti kantavaa maapohjaa lujitetaan sekoittamalla maahan sideainetta. Tavallisimpia sideaineita ovat nykyisin kalkin ja sementin seokset sekä kalkin, sementin ja teollisuuden sivutuotteiden seokset.

Yleisimmin käytetään pilaristabilointia. Pilarien halkaisija on nykyisin tavallisesti 600-800 mm. Nykyisellä kalustolla pystytään tekemään 18-20 m pilaireita, mutta maksimia lähentelevät pilaripituudet ovat melko harvoin teknis-taloudellisesti edullisia. Pilaristabiloinnin luontevin käyttöalue on penkereiden perustaminen savipehmeiköillä, ks. kuva 6.

Massasyvästabilointi on 1990-luvulla kehitetty menetelmä, jossa sideaine sekoitetaan maahan moneen suuntaan liikkuvalla sekoittimella, jolloin pyritään muodostamaan yhtenäinen stabiloitu vyöhyke. Massasyvästabilointia on käytetty savipehmeiköillä mutta myös lieju- ja turvepehmeiköillä. Nykyisillä koneilla massasyvästabiloinnin maksimisyvyys on noin 5 metriä.

Syvästabilointi parantaa penkereen vakavuutta huomattavasti ja pienentää painumia taikka useimmissa tapauksissa poistaa käyttövaiheen painumat kokonaan.



Kuva 6 Syvästabilointi pilareilla

Syvästabilointi suunnitellaan noudattaen Syvästabiloinnin suunnitteluohjetta TIEH 2100008-01.

### Varmistettavat asiat

Syvästabilointia varten tarvittavat lopulliset pohjatutkimukset ovat varsin erilaiset mm. seuraavissa eri tapauksissa:

- Kimmoiset pilarit ulotettuina painuvien kerrosten alarajaan.
- Myötäävät pilarit.
- Määrämittaiset pilarit.

Stabiloidun maan lujuuden selvittäminen on kaikissa tapauksissa oleellisin tutkimusten kohde, mutta maakerrosten lujuuden ja painumaominaisuuksien sekä maakerrosten paksuuden vaihtelun selvittämistarkkuudelle asetettavat vaatimukset ovat eri tapauksissa erilaisia. Kun lopullinen ratkaisu ei ole selvillä, pohjatutkimuksissa on varauduttava kaikkiin kyseisessä tapauksessa teknistaloudellisesti mahdollisiin ratkaisuihin.

Kun kimmoiset pilarit ulotetaan painuvien kerrosten alarajaan ja kyseinen kerrosraja on selväpiirteinen (esimerkiksi saven alla suoraan moreeni), pilaripituuden määrittäminen onnistuu vähimmillä kairauksilla. Jos pilarien tavoitetaso on sellainen maakerrosraja, jota ei toteutusvaiheessa pystytä tunnistamaan, tarvitaan enemmän kairauksia. Määrämittaisia pilareja käytettäessä tarvitaan tarkkoja pohjatutkimuksia pilarien alapuolelle jätettävien maakerrosten painumaominaisuuksista ja niiden vaihtelusta epätasaisten painumien välttämiseksi.

Maakerrosten painumaparametrien merkityksestä voidaan todeta:

- Kimmoisten pilarien tapauksessa esikonsolidaatiojännitys on tärkein ja muiden parametrien merkitys pienempi, koska joka tapauksessa suurin osa kuormasta menee pilarien kannettavaksi.
- Myötäävien pilarien tapauksessa muidenkin parametrien merkitys kasvaa.
- Määrämittaisia pilareita käytettäessä tarvitaan tarkimpia tietoja ja nimenomaan vaikeimmin tutkittavista savikerrosten alaosista.

Stabilointia mahdollisesti vaikeuttavat täytemaakerrokset on selvitettävä. Maakerrokset, joita ei pilarointikoneen terällä voida läpäistä, on kaivettava pois ennen stabilointityötä.

Erilaisten syvästabilointiratkaisujen pohjatutkimustarkkuuteen vaikuttavia näkökohtia on tarkemmin käsitelty julkaisussa Teiden pehmeikkötutkimukset TIEL 3200520.

### Ratkaisun riskit

Tiepengerten perustamiseen käytetyt syvästabiloinnit ovat onnistuneet. Käyttövaiheen aikaisia 1-2 vuodessa jokseenkin pysähtyneitä epätasaisia painumia on tiettävästi parissa tapauksessa tapahtunut työvirheiden takia hyvin pehmeissä pohjasuhteissa. Myötäävät pilaroinnit ovat useimmissa tapauksissa toimineet käytännössä kimmoisina, koska pilarien lujuus on ylittänyt suunnitellun.

Sivukaltevassa maastossa syvästabiloinnin epäonnistuminen saattaa tavallisia olosuhteita helpommin vaarantaa vakavuuden. Käytännön kokemuksia epäonnistumisista ei ole, vaan edellä mainittu perustuu teoreettisiin tarkasteluihin.

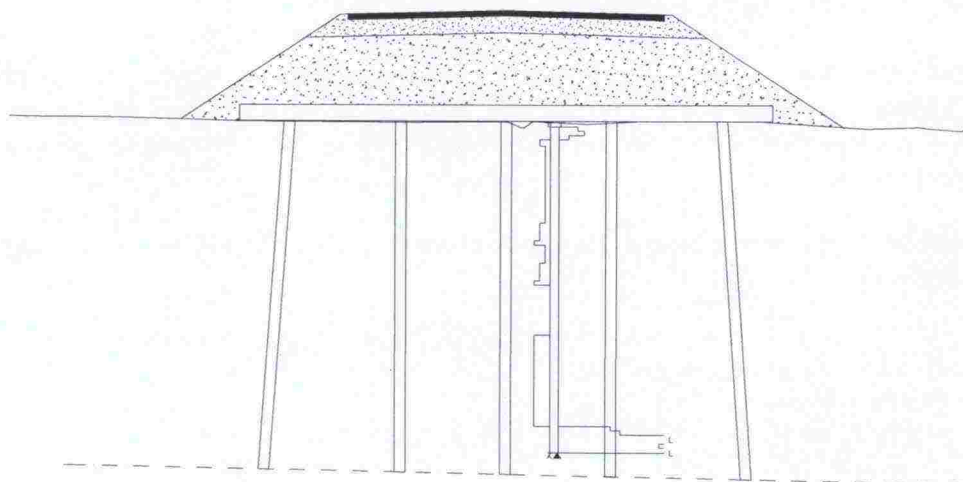
Määrämittaisia pilarointeja on käytetty lähinnä siirtymärakenteissa, joissa ratkaisu on osoittautunut lupaavaksi. Muut käyttökokemukset ovat vähäisiä.

Useissa kohteissa on aiheutunut työnaikaisia hankaluuksia (lähinnä lisäkaivua) puutteellisesti selvitetystä täytemaakerroksista, joita ei ole pilarointikoneen terällä voitu läpäistä.

### 2.1.8 Paalulaatta- ja paaluhatturakenteet

Paalulaatta- ja paaluhatturakenteissa (ks. kuva 7) pengerkuorma siirretään paalujen välityksellä kantaviin maakerrokseen. Kuorma välitetään paaluille joko yhtenäistä laattaa tai paaluhattuja käyttäen. Puupaaluja ei nykyisin käytetä pysyvissä rakenteissa penkereiden perustamiseen.

Tyypillisiä paalulaatta- ja paaluhatturakenteiden käyttökohteita ovat korkeat penkereet silloin, kun esimerkiksi massanvaihto ei onnistu maakerrosten paksuuden tai työssä varottavien viereisten rakenteiden takia. Paalulaatta- ja paaluhatturakenteita käytetään usein myös paaluilla perustettavien siltojen tms. rakenteiden läheisyydessä. Paalulaatta- ja paaluhatturakenteet ovat yleensä rakennuskustannuksiltaan kalliita menetelmiä.



Kuva 7 Paalulaattarakenne

Paalulaatta- ja paaluhatturakenteet suunnitellaan Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen TIEH 2100007-01 mukaan.

### Varmistettavat asiat

Paalulaatta- ja paaluhatturakenteiden kustannuksiin vaikuttavat ratkaisevasti paalupituus ja pengerkorkeus. Paalupituuden määrittämiseen tarvittavia pohjatutkimuksia on käsitelty julkaisussa Teiden pehmeikkötutkimukset TIEL 3200520.

Paalulaatta sijoitetaan yleensä maanpinnan tuntumaan. Jos maapohja on ylikonsolidoitunutta, voidaan laatta sijoittaa ylemmäs penkereeseen, jolloin saadaan säästöä. Tätä varten tarvitaan ödometrikokeita. Jos paalulaatan alapuolinen vakavuus on riittämätön (esimerkiksi sillan tulopenkereessä), laatta joudutaan sijoittamaan maanpintaa alemmas. Vakavuustarkasteluja varten tarvitaan tiedot maakerrosten lujuudesta. Negatiivisen vaippahankauksen tarkastelemiseen tarvitaan ödometrikokeita.

On tarkistettava, aiheutuuko paalutukseen erityisiä työtekniisiä vaikeuksia maakerrosten kivisyydestä tai lohkaraisuudesta, kaltevasta kallionpinnasta, paalutuskaluston vaikeasta liikkumisesta tai paalulaatan vaikeasta rakennettavuudesta.

Paalutuksen ympäristövaikutukset (vaikutus paineelliseen pohjaveteen, maakerrosten häiriintyminen, huokosvedenpaineen nousu, värinä) ja niiden minimointi voivat vaatia pohjatutkimuksia.

### Ratkaisun riskit

Paalulaattarakenne on varsin varma ratkaisu.

Paaluhatturakenne on epäonnistunut joissain sellaisissa kohteissa, joissa maapohja on erityisen pehmeä ja nykykäsityksen mukaan paalulaatta olisi ainoa oikea ratkaisu ja paaluhattujen peittävyys on ollut nykykäsitystä pienempi.

*Monissa epäonnistuneissa paaluhatturakenteissa (lähinnä 1960-70-luvulla tehdyissä) on ollut seuraavia piirteitä:*

- Maaperä turvetta, liejua tai hyvin pehmeää savea (nykyohjeiden mukaan pitäisi käyttää paalulaattaa).
- Pengerkorkeus pieni.
- Paaluhattut on suunniteltu maanpintaan, mutta on ollut pakko tehdä työalusta ja tällöin paaluhattujen alla on ollut painumia aiheuttava täyttö ja penkereen alle on muodostunut tyhjättilä.
- Paaluhattut ovat alkaneet kallistua jo työn aikana.
- Edellä kerrotun seurauksena myös pengerkorkeus on jäänyt suunniteltua pienemmäksi, mikä on edelleen heikentänyt rakenteen toimintaa.
- Liikennekuorma on otettu huomioon nykykäsitystä pienempänä.
- Paaluhattujen peittävyys on ollut nykykäsitystä pienempi.
- Painumaa on huonolla menestyksellä yritetty korjata päällysteellä.

*Puupaalujen lahoamisesta aiheutuneita vaurioita on todettu erityisesti jokisilltojen tulopenkereissä (usein toistuvaa kastumista ja kuivumista).*

### 2.1.9 Pehmeikkösillat

Suurilla pengerkorkeuksilla silta voi olla edullisempi kuin paalulaattarakenne, erityisesti tien ollessa kapea. Pehmeikkösillan etuina on myös pienempi tilantarve, jolla on merkitystä erityisesti taajama-alueilla, sekä ulkoilijoiden ja eläinten vapaa liikkuminen maastossa tien poikkisuunnassa. Pehmeikkösillan kunnan tarkkailu on helpompaa kuin penkereen alla olevan pohjarakenteen.

### 2.1.10 Ratkaisujen yhdistelmät

Seuraavassa käsitellään erilaisten perustamistapojen tunnettuja yhdistelmiä. Yhdistelmällä tarkoitetaan tässä eri menetelmien yhdistämistä samalla kohdalla toimiviksi eikä tien pituus- tai poikkisuuntaista perustamistavan vaihtamista ja siirtymärakennetta.

Vastapenger ja esikuormitus voidaan usein yhdistää.

Pystyojitukseen yhdistetään aina esikuormitus, lähes aina ylipengertä käytäen. Myös vastapenkereitä käytetään useimmissa tapauksissa. Pystyojituksista voidaan täydentää pengerkevennyksellä, mutta tämä on tuntuva kustannuslisäys ja kevennyksen käyttäminen esimerkiksi lyhyen kuormitusajan kompensoimiseksi ei ole toiminut toivotulla tavalla.

Pengerkevennykseen yhdistetään usein lujite parantamaan penkereen reunaosan vakavuutta.

Lujitteita käytetään useimmiten muiden menetelmien yhteydessä, ks. kohta 2.1.5.

Osittaiseen (syvyys- tai leveyssuunnassa) massanvaihtoon voidaan joskus yhdistää kevennys. Esimerkki tällaisesta ratkaisusta (myös vastapenger) on esitetty liitteessä.

Syvästabilointiin voidaan yhdistää vastapenger, kun halutaan parantaa "alkutilanteen" (ilman stabilointia) vakavuutta. Esikuormituksella voidaan myötäävän syvästabiloinnin yhteydessä varmistaa painumien tapahtuminen rakentamisaikana. Pengerkevennys syvästabiloinnin yhteydessä on teknisesti täysin mahdollinen ratkaisu, mutta varsin useissa tapauksissa paalulaattarakenne on taloudellisesti sen kanssa hyvin kilpailukykyinen. Syvästabilointiin on joskus yhdistetty matala massanvaihto, jos pinnassa on esiintynyt esimerkiksi turvekerros, jonka stabiloituvuus on ollut selvästi huonompi kuin alapuolisen maan eikä massasyvästabilointikaan ole ollut teknistaloudellisesti mielekäs ratkaisu.

### 2.1.11 Meluvallien perustamistavat

Meluvallien erikoispiirteitä tavallisiin tiepenkereisiin verrattuna ovat:

- Vallin huippu on kapea.
- Liikennekuormaa ei ole.

- Painumat saavat joskus olla melko suuret, kunhan ne eivät huononna meluntorjuntavaikutusta alle suunnitelmassa esitettyjen vaatimusten taikka vaikuta haitallisesti vallin päälle mahdollisesti tehtäviin aitarakenteisiin taikka vieressä olevan tierakenteen painumiin.
- Painumaa voidaan helposti ennakoida esikoroituksella.

Meluvallit perustetaan usein ilman erikoistoimenpiteitä. Jos tämä ei vakavuuden kannalta ole mahdollista, vallia on useimmiten mahdollista keventää riittävästi. Vallin korkeimman kohdan kapeus helpottaa ratkaisun saamista taloudelliseksi. Meluvalleissa käytetään kevennysmateriaalina ehkä yleisimmin rengasrouhetta. Myös kevytsoraa käytetään. Meluvallien perustamistapa on sovitettava yhteen tien perustamistavan kanssa.

Meluvallien perustamistapana käytetään joskus myös syvästabilointia tai massanvaihtoa, erityisesti tarvittavan massanvaihdon ollessa matala. Massanvaihdon tarvittava leveys voidaan usein mitoittaa pelkän vakavuuden perusteella, kun perustamistavan rajasta aiheutuva poikittainen painumaero ei ole vallissa haitallinen.

## 2.2 Painumatarkastelut

### 2.2.1 Painumatarkastelut ratkaisun valintaa varten

Perustamismenetelmän valintaa varten ja ylipäänsä perustamistoimenpiteiden tarpeellisuuden arviointia varten lasketaan, kuinka suuria painumat olisivat, jos tiepenger perustettaisiin maanvaraisena ilman erikoistoimenpiteitä.

Tiepenkereen vakavuus on tarkistettava ennen painumalaskelmien aloittamista. Varmuusluvun sortumaa vastaan on oltava vähintään Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteiden TIEH 2100002-01 mukainen.

Painumatarkastelut aloitetaan laskemalla primäärinen konsolidaatiopainuma. Laskelmaan ei ole tarpeen ottaa mukaan ylikonsolidoituneen alueen painumaa. Sekundääripainuman huomioonottaminen tarkastellaan tarvittaessa erikseen.

Painumatarkastelut aloitetaan tavallisesti laskemalla painuman maksimiarvo ja painumanopeus pohjasuhteiltaan heikoimmalla kohdalla. Tämän jälkeen tehdään alustavia arvioita, ovatko painumat jäämässä edes lähelle hyväksyttäviä raja-arvoja. Jos painumat jo tässä vaiheessa vaikuttavat selvästi liian suurilta, ei painumatarkasteluja kannata tihentää. Muussa tapauksessa painumalaskelmia tihennetään, esimerkiksi seuraavasti:

- Lasketaan painumat muidenkin ödometrikoepisteiden kohdalla.
- Määritetään ödometrikoepisteiden perusteella korjauskertoimet vesipitoisuuteen perustuville likimääräisille painumalaskentamenetelmille ja lasketaan näitä korjauskertoimia käyttäen painumat muiden näytepisteiden kohdalla. Tämä menettely toimii suhteellisen hyvin normaalikonsolidoituneilla savikoilla. Maan ollessa ylikonsolidoitunutta ödometrikoepisteiden perusteella tehtävä interpolaatio vaatii suurempaa varovaisuutta tehtäessä



johtopäätöksiä maan konsolidaatiotilasta ja muista painumaparametreista.

- Interpoloidaan tuloksia muiden pohjatutkimusten perusteella niillä kohdilla, joilla näytetietoja ei ole.

Edellä kuvatun sijasta voidaan painumatarkastelu tehdä sähkövastusluotauksen perusteella jatkuvana. Sähkövastusluotauksen käyttö painumalaskelmiin perustuu saven vesipitoisuusprofiilin tulkintaan ja painumien ja vesipitoisuuden väliseen korrelaatioon. Ennen kyseisen kaltaista erikoistutkimusta kannattaa varmistua siitä, että olosuhteet ovat sellaiset, että tarkastelusta on hyötyä (painumat hyväksyttävän tuntumassa ja erityisesti pituussuuntaiset epätasaisuudet kriittisiä). Pienipiirteisesti vaihtelevalla pehmeiköllä sähkövastusluotauksen tarkkuus ei aina ole riittävä. Tarkempia tietoja menetelmästä on esitetty raportissa Menetelmäkuvaus TPPT 19, Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pikselimallilla.

Sallittavien painumien kriteerit on asetettu Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteissa :

- Sallittu pituuskaltevuuden muutos 30 vuoden ajanjakson kuluessa.
- Sallittu poikkikaltevuuden muutos 30 vuoden ajanjakson kuluessa.
- Sallittu kokonaispainuma 30 vuoden ajan kuluessa rakentamisen jälkeen.

Pituuskaltevuuden muutoskriteeri perustuu tien ajodynamiikalle asettaviin vaatimuksiin eikä siitä voida poiketa huonompaan suuntaan. Kokonaispainumarajoituksesta voidaan joissakin tapauksissa perustellusti poiketa. Hankekohtaisissa tuotevaatimuksissa määritellään tiekohtaisesti käytettävät painumaepätasaisuuden vaatimukset (kohta 3.2).

On huomattava, että painuma lähes aina on epätasaisempaa, kuin laskelmat näyttävät, sillä painumaominaisuudet vaihtelevat samanlaisilta näyttävienkin kohtien välillä ja pohjasuhteiden muutos tapahtuu useimmiten jyrkemmin kuin tasaisesti kahden lasketun pisteen välillä. Sallittu poikkikaltevuuden muutos on lähes aina määräävin silloin, kun levennetään nykyistä tietä.

Varsinkin korkealuokkaisilla teillä taikka taajamaolosuhteissa sallitun painuman määräävät useissa tapauksissa muut tekijät kuin "tie itse ja sen ajettavuus". Tällaisia tekijöitä voivat olla mm.:

- tiehen liittyvät putkijohdot
- tien pinnan kuivatus (etenkin reunakivellisissä rakenteissa) taikka tie-rakenteen kuivatus (salaojien toimivuus)
- tiehen liittyvät melu- tms. rakenteet
- ulkonäköseikat (itse tien ulkonäkö, kaiteet, erityisesti kiveykset tms. pintarakenteet).

### 2.2.2 Painumatarkastelujen riippuvuus pohjasuhteista

Painumanopeus on savi- ja siltti-pehmeiköillä erilainen. Tätä eroa korostaa vielä se, että silttikerrokset käytännöllisesti katsoen aina ovat hyvin epähomogeenisia (kerrallisia ja kerroksellisia), jolloin pystysuuntaiseen huokosveden virtaukseen perustuvat teoriat eivät päde. Siltti-pehmeiköillä painumano-

peus on näin ollen enemmän kokemusperäistä ja paikallistuntemukseen perustuvaa kuin laskennallista.

Silttipehmeiköillä yleensä hyvin suuri osa painumista ja usein koko painuma on mahdollista saada tapahtumaan rakentamisaikana. Tämä voidaan usein ottaa huomioon painumaparametrien määritystarkkuutta valittaessa. Tällöin rakentamisaikaisten tarkkailumittausten merkitys on suuri.

### 2.2.3 Eri tavoilla perustettavien penkereiden painumien vertailu

Eri tavoilla perustettavien penkereiden käyttäytyminen tulee tuntee, koska painumien luonne voi olla hyvin erilainen.

Paalulaattarakenne on painumaton. Paaluhatturakenne on painumaton, mutta epäonnistuneissa hattupaalutuksissa, ks. kohta 2.1.8, voi esiintyä hallitsemattomia epätasaisia painumia, jotka voivat olla rakenteen kannalta vaarallisia ja joiden syyt on heti selvitettävä.

Kimmoisiksi mitoitetuissa syvästabiloinneissa tapahtuu rakentamisaikana vähäistä painumaa, joka on käytännöllisesti katsoen välitöntä. Myötäävissä pilaroinneissa tapahtuu myös pilareita ympäröivän saven konsolidaatiopainumaa, jonka pilareiden pystyjojamainen vaikutus nopeuttaa rakentamisaikana muutamassa kuukaudessa tapahtuvaksi.

Määrämittaisissa syvästabiloinneissa esiintyy käyttövaiheen aikaista pilareiden alapuolisen saven konsolidaatiopainumaa, jonka erikoispiirteenä on painumanopeuden tavallista huonompi ennustettavuus savikerrostumien epähomogeenisissa alaosissa.

Pystyjojitukselle perustetun penkereen pienetkin jälkipainumat ovat erityisen haitallisia, koska ne tapahtuvat nopeutetusti. Niiden korjaaminen on myös hankalaa.

Massanvaihto kaivamalla on yleensä käytännöllisesti katsoen painumaton. Pieniä jälkipainumia voi tapahtua työvirheiden (pienää puutteellisuutta poiskaivussa taikka vaikeissa olosuhteissa tiivistystyön puutteita) vaikutuksesta. Jälkipainumat ovat yleensä helposti päällysteellä korjattavia.

Pohjaantäytöissä jälkipainumien riski on suurempi kuin massanvaihdossa kaivamalla. Pohjaantäyttöjen jälkipainumat ovat usein yhdistelmä konsolidaatiopainumaa ja plastisia muodonmuutoksia.

Kevennetyn penkereen taikka esikuormitetun penkereen mahdolliset jälkipainumat ovat periaatteessa samankaltaista normaalia konsolidaatiopainumaa kuin maanvaraisen penkereen.

Kuten edellä esitetystä havaitaan, penkereen käyttövaiheen painumia voidaan arvioida seuraavilta näkökannoilta:

- Laskennallinen jälkipainuma.
- Laskennallisen jälkipainuman määrityksen erehtymisriski.
- Toteutusvirheistä aiheutuvien painumien riski.

Menetelmiä ei periaatteessa voida asettaa yleispätevään paremmuusjärjestykseen, sillä esimerkiksi eri lailla mitoitettujen syvästabilointien taikka eripaksuisiksi mitoitettujen pengerkevennyksien eivät ole käyttöaikaisten painumien taikka toteutusvirheiden riskin taikka käyttöaikaisten yllättävien olosuhdemuutosten kannalta samanarvoisia, vaan riskitarkastelu pitäisi tehdä tapauskohtaiset olosuhteet huomioon ottaen.

### 2.3 Leikkausten vahvistamismenetelmät

#### 2.3.1 Vahvistamismenetelmän valinnan tavoitteet

Leikkausten vahvistamismenetelmän valinnassa ratkaisevimmat kriteerit ovat:

- leikkausluiskien ja -pohjan riittävä vakavuus
- leikkauspohjan hydraulisen murtuman välttäminen
- haitallisten ympäristövaikutusten välttäminen sekä
- kestävyys eroosiota vastaan

Joissain tapauksissa on tarpeen lujittaa leikkauspohjaa kantavuuden lisäämiseksi, pohjamaan häiriintymisen vähentämiseksi taikka jäätymisestä ja sulamisesta aiheutuvien painumien välttämiseksi. Tähän käytettäviä menetelmiä voivat olla:

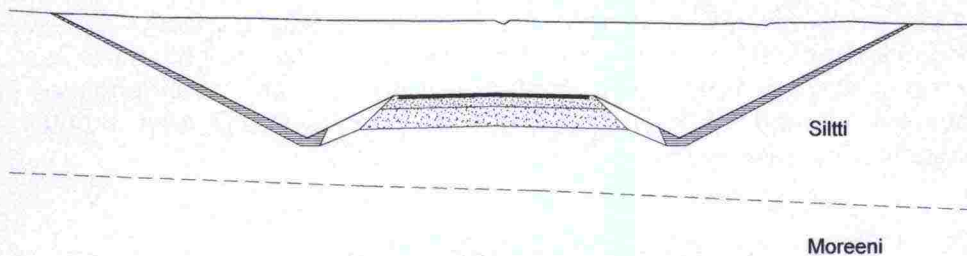
- syvästabilointi, usein lyhyilläkin pilareilla
- lujitteet
- massanvaihto.

#### 2.3.2 Luiskan kaltevuuden valinta

Luiskan kaltevuus valitaan siltissä, hiekassa ja moreenissa riittävästi maalaajin kitkakulmaa loivemmaksi. Kaltevuuden valinnassa otetaan huomioon erityisesti pohjaveden ja huokosvesipaineen vaikutus sekä pintavesierosio. Koheesiomaassa luiskan vakavuus riippuu enemmän kokonaiskorkeudesta kuin kaltevuudesta. Luiskakaltevuus mitoitetaan lyhyt- ja pitkäaikaiselle tilanteelle ja periaatteessa  $c\phi$ -laskelmin.

Luiskaverhous (ks. kuva 8) tehdään lähinnä eroosiosuojausta varten. Verhous ja sen taustalla oleva suodatinkangas estävät pohjavesierosion ja suojaavat myös pintavesierosiolta. Verhouksella on myös jonkin verran luiskan pysyvyyttä parantavaa vaikutusta, koska verhousmateriaalilla on parempi kitkakulma ja sen paino on suurempi kuin pehmeällä pohjamaalla.

Luiskaverhous tarvitaan yleensä siltissä, silttisissä moreenissa, hienossa hiekassa ja usein savessa. Pohjavesiolosuhteet vaikuttavat merkittävästi asiaan. Verhous tehdään yleensä murskeesta, sorasta tai soraisesta hiekasta. Pohjamaan ja verhouksen välissä käytetään nykyisin yleensä suodatinkangasta. Yleensä verhous tehdään alaspäin paksunevaksi ja usein verhous ulotetaan ojanpohjaan.



Kuva 8 Luiskaverhous silltileikkauksessa

Leikkausluiskien vakavuuden kannalta useissa tapauksissa kriittisin tilanne on kaivuvaihe seuraavista syistä:

- Luiskaverhoukset ja leikkauspohjalle tehtävät päällysrakennekerrokset ovat keskeneräisiä tai puuttuvat.
- Kaivutyö on saattanut aiheuttaa maakerrosten häiriintymistä.
- Työkone- tai kaivumassakuormitukset saattavat poiketa suunnitelmassa otaksutuista.

#### Varmistettavat asiat

Luiskan kaltevuuden valintaa ja luiskaverhouksen suunnittelua varten tarvitaan tiedot luiskan maakerroksista ja niiden ominaisuuksista sekä pohjavesiolosuhteista. Luiskaverhousten tarve tarkentuu usein työn aikana olosuhteiden selvityksessä tarkemmin.

#### Ratkaisun riskit

Suurin virhemahdollisuus hienorakeiseen maaperään tehtävässä leikkauksessa liittyy vakavuuslaskentamenetelmän valintaan ja  $c\phi$ -menetelmässä huokosvedenpaineen oikeaan arviointiin taikka työnaikaisten tilanteiden (maksimaalinen kaivussyvyys, työkonekuormat, häiriintyminen) puutteelliseen huomioonottamiseen.

Luiskaverhoukset ovat epäonnistuneet usein, kun suunnitteluvaiheessa saatu maaperä- ja pohjavesitieto poikkeaa todellisesta maaperäolosuhteista. Luiskaverhousten mitoituksen tarkistaminen työvaiheessa tehtävien maalaji- ja pohjavesihavaintojen perusteella on tärkeää.

### 2.3.3 Kevennysleikkaus

Yleensä kevennysleikkaus on kustannuksiltaan edullinen ratkaisu. Sen haittapuolena on tilantarve. Luiskanloivennus on toimintatavaltaan samankaltainen, mutta vähemmän tehokas.

### Varmistettavat asiat

Kevennysleikkauksen mitoitusta varten on selvítettävä maakerrosten lujuusominaisuudet. Suuntaa-antava mitoitus voidaan tehdä  $\phi=0$ -menetelmällä, mutta tarkistus tulee tehdä  $c\phi$ -menetelmällä, vähintään arvioiduilla parametreilla.

Kevennysleikkauksen tilantarve on määritettävä tiesuunnitelmavaiheessa.

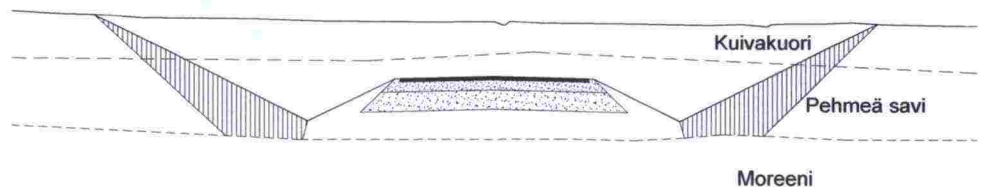
### Ratkaisun riskit

Ratkaisun riskit ovat samat kuin kohdassa 2.3.2.

## 2.3.4 Massanvaihto luiskassa

Luiskassa tehtävä massanvaihto (ks. kuva 9) on pehmeissä maakerroksissa, kuten savessa, käytettävä menetelmä, kun vakavuutta pitää parantaa runsaasti. Raja paksun luiskaverhouksen ja massanvaihdon välillä on liukuva.

Massanvaihto luiskassa on hyvin monissa tapauksissa kustannuksiltaan kevennysleikkauksen jälkeen edullisin luiskanvahvistusmenetelmä, jos tarvittava massanvaihtosyvyys on kohtuullinen ja massanvaihto rajoittuu selvästi lujempaan maakerrokseen. Menetelmän tehokkuus heikkenee ja kustannukset kasvavat jyrkästi massanvaihtosyvyyden ylittäessä ojanpohjan syvyyden.



Kuva 9 Massanvaihto luiskassa

### Varmistettavat asiat

Oleellista on määrittää tarvittava massanvaihtosyvyys, sillä se vaikuttaa ratkaisevasti menetelmän tehokkuuteen ja kustannuksiin. On myös selvítettävä massanvaihdon alapuolisten kerrosten maalaji ja lujuus ainakin sillä tarkkuudella, että tiedetään, voivatko vaarallisimmat liukupinnat kulkea massanvaihdon alapuolelta.

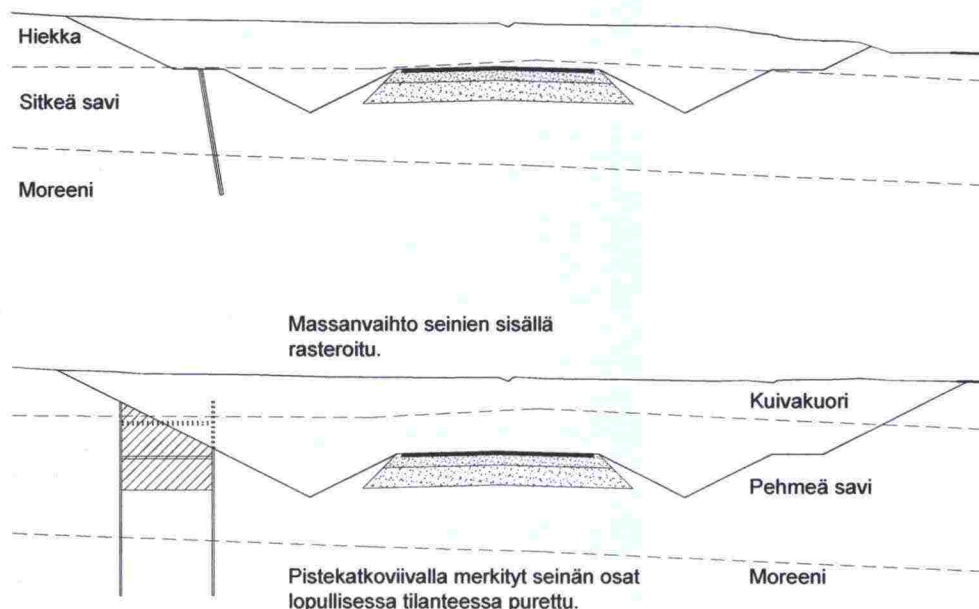
Massanvaihtokaivannon riittävän vakavuuden varmistamiseen tarvitaan tiedot pehmeän kerroksen lujuusominaisuuksista.

### Ratkaisun riskit

Suurin riski on, että tarvittava massanvaihtosyvyys olisi arvioitua suurempi ja massanvaihtoa ei pystyttäisi tekemään luotettavasti pohjaa myöten.

### 2.3.5 Tukiseinärakenteet

Pysyvät tukiseinät leikkausluiskan vahvistuksina (ks. kuva 10) ovat melko harvinaisia ja kalliita erikoisratkaisuja, mutta joissain tapauksissa tarpeellisia ja käytännöllisiä. Eri tapauksilla on omia erikoispiirteitään.



Kuva 10. Erilaisia tukiseinärakenteita pysyvinä luiskanvahvistuksina. Ylhäällä ankkuroimaton ponttiseinä ja alempana kaksoisponttiseinä.

#### Varmistettavat asiat

Pysyvän tukiseinän suunnittelua varten tulee selvittää:

- maapohjan lujuusominaisuudet alkutilanteen vakavuuden selvittämiseksi sekä seinän mitoitusta varten
- pohjavesiolosuhteet
- korroosion vaikutus seinään
- ulkonäkökysymykset, jos osa seinästä jää näkyviin.

#### Ratkaisun riskit

Ankkuroimattoman tukiseinän osalta voidaan todeta:

- Maaperään liittyvistä lähtötiedoista kriittisin lienee pehmeiden kerrosten paksuuden vaihtelu. Myös tiedot maakerrosten lujuudesta ja ponttien tunkeutuvuudesta ovat tärkeitä.

- Jos ankkuroimattomassa tukiseinässä on näkyviin jäävää vapaata korkeutta, mitoitus on varsin herkkä ko. korkeuden vaihtelulle.
- Tukiseinän lievä kallistaminen on edullista maanpaineiden kannalta.

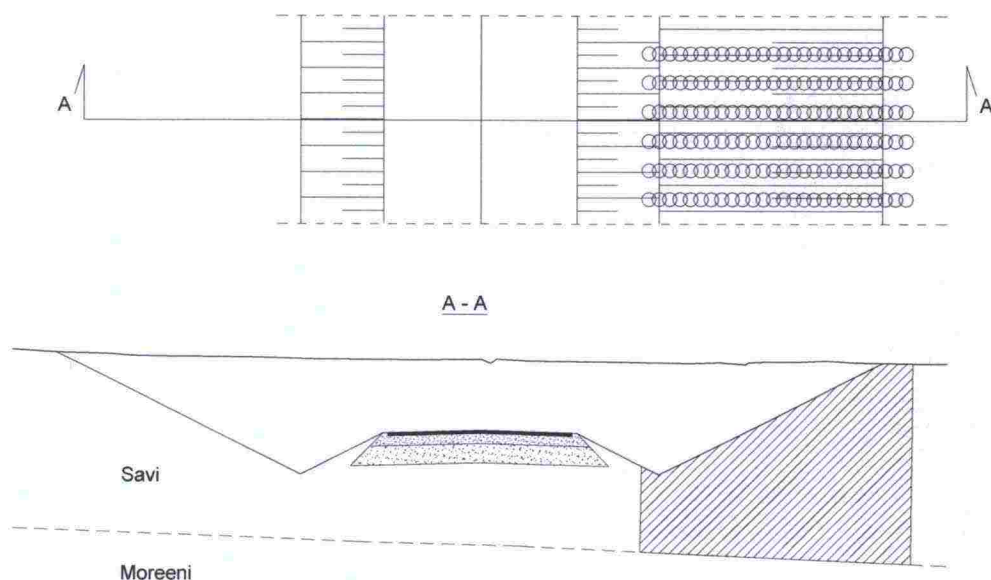
Tien alta toisiinsa tuettuihin tukiseiniin pätevät samat seikat. Lisäksi on todettava, että tuen asentamisvaihe on erityisen mitoittava. Ratkaisu on mahdollinen vain melko kapeilla teillä ja tuet voivat aiheuttaa tiehen epätasaisuutta. Joskus terästuki on korvattu seinien väliin tehdyllä syvästabiloinnilla.

Kaksoistukiseinän osalta voidaan todeta:

- Mitoittavin tilanne on kaivuvaihe seinien välissä ja se on normaalia tuetun kaivannon mitoitusta.
- Pysyvässä tilanteessa rakenteen rasitukset ovat selvästi pienemmät, joskin työläästi mitoittavat.
- Tukiseinien välisen etäisyyden kohtuullinen kasvattaminen lisää kustannuksia vain vähän, mutta antaa runsaasti lisää varmuutta pysyvän tilanteen vakavuuteen.

### 2.3.6 Syvästabilointi luiskanvahvistuksena

Syvästabiloinnin heikkous luiskanvahvistuksena on se, että pilarit kestävät varsin heikosti vaakasuuntaisia rasituksia. Luiskanvahvistuksissa ei käytetä yksittäisiä pilareita, vaan pilareista muodostetaan luiskan poikkisuunnassa yhtenäisiä rakenteita, ks. kuva 11.



Kuva 11 Syvästabilointi luiskanvahvistuksena

### Varmistettavat asiat

Luiskanvahvistuksena toimivaa syvästabilointia varten selvitetään:

- maakerrosten stabiilituuvuus vielä varmemmin kuin tavanomaisessa syvästabiloinnissa, sillä liukupinnat hakeutuvat heikkousvyöhykkeisiin helpommin kuin tavanomaisissa syvästabiloinneissa
- vastaavasta syystä myös työtä hankaloittavat täytemaakerrokset ym. häiriökohdat tavallista tarkemmin
- maakerrosten lujuusominaisuudet ja lujuuden ja muodonmuutoksen väliset riippuvuudet
- pehmeiden kerrosten syvyys tavallista tarkemmin, koska liukupinnat voivat kulkea pilarien alapään tuntumassa toisin kuin tavanomaisissa syvästabiloinneissa.

### Ratkaisun riskit

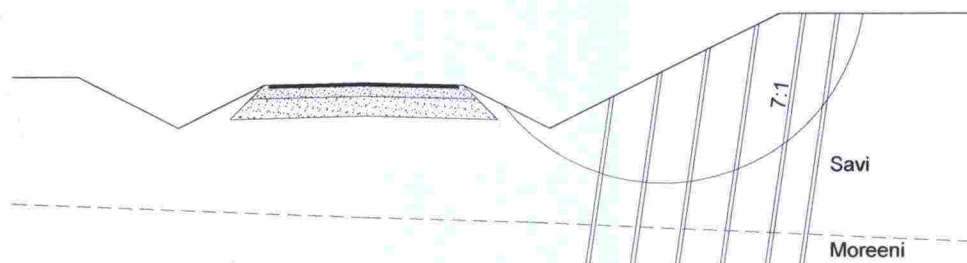
Erillisillä pilareilla stabiloituja luiskia on sortunut edellisessä kohdassa esitettyjen riskitekijöiden toteutumisen johdosta, vaikka kokonaisvarmuusluku sortumaa vastaan on ollut suuruusluokkaa 1,5. Yhtenäisillä seinämillä varustetut luiskat ovat onnistuneet, mutta ratkaisu on usein kallis.

### 2.3.7 Luiskapaalutus

Luiskapaalutus (ks. kuva 12) on harvinaistunut luiskanvahvistusmenetelmä, jonka periaate yksinkertaistettuna on:

- Paalut vastustavat liukupintasortumaa pienimmällä seuraavista vaikutuksista: paalun läpileikkautuminen liukupinnan yläpuolisella osalla, paalun alapään kantokyvyn pettäminen, paalun poikkileikkautuminen.
- Lisäksi paalut voivat kantaa paalujen päiden yläpuolisen kuorman, jos ne on varustettu laattarakenteella taikka harkinnanvaraisen osan yläpuolisesta kuormasta, jos paalut on varustettu paaluhatuilla.

Luiskapaalutus soveltuu käytettäväksi siltti- ja savimaassa, kun pehmeiden kerrosten syvyys on liian suuri luiskaan tehtävää massanvaihtoa ajatellen. Liian pehmeisiin saviin menetelmä ei sovellu, koska ne voivat sortua valumalla paalujen välistä. Luiskapaalutuksissa käytetään myös puupaaluja. Paalujen lyönti aiheuttaa maakerrosten häiriintymistä, eikä luiskan kaivutyötä pidä aloittaa ennen lujuuden riittävää palautumista.



Kuva 12. Luiskapaalutus.



### 2.3.8 Tukimuurit ja kaukalot

Tukimuurirakenteiden (esimerkiksi teräsbetonisten kulmatukimuurien, lujite-  
maamuurien taikka kivikorimuurien) käyttöön on yleensä olennaisempaa  
syynä tilanpuute kuin luiskan vakavuuden parantaminen. Monissa tapauk-  
sissa, varsinkin savipehmeiköillä, tukimuurirakenteiden työnaikaiset kaivan-  
not vaativat huomattavia tuentatoimenpiteitä.

Teräsbetonikaukaloiden käyttöön on yleensä ratkaisevimpana syynä pohja-  
veden alenemisen estäminen. Myös tilanpuute sekä luiskien vakavuuskysy-  
mykset vaikuttavat usein kaukalaratkaisun valintaan. Kaukaloiden mitoitus  
joudutaan tarkistamaan myös nosteen kannalta.

### 2.3.9 Luiskanvahvistusmenetelmien yhdistelmät

Seuraavassa käsitellään erilaisten vahvistusmenetelmien tunnettuja yhdis-  
telmiä. Yleensä luiskanvahvistusmenetelmät ovat hyvin yhdisteltävissä ja  
muitakin yhdistelmiä voidaan keksiä.

Kevennysleikkaus voidaan yhdistää kaikkiin muihin vahvistusmenetelmiin ja  
yhdistelmä on yleensä teknistaloudellisesti edullinen, jos sille on tilaa.

Kohdassa 2.3.5 esitetty kaksoisponttiseinäratkaisu on eräänlainen tukisei-  
nän ja massanvaihdon yhdistelmä.

## 2.4 Pohjavedenalennus

Pohjaveden alentaminen pienentää hiukan maan vesipitoisuutta, mikä usein  
ratkaisevasti pienentää häiriintymisherkkyyttä. Pohjaveden pumppaamisesta  
aiheutuva imupaine lisää tilapäisesti maan lujuutta ja parantaa luiskien va-  
kavuutta sekä estää leikkauspohjan hydraulisen murtuman vaaraa.

Yleisin varsinainen pohjavedenalennusmenetelmä on tyhjiöpumppaus (ns.  
wellpoint-menetelmä). Siinä päästään enimmillään noin 5 m alennussyvyy-  
teen ja porrastettuna suurempaan. Menetelmä onnistuu parhaiten hie-  
nossa hiekassa, siltissä tai moreenissa. Silttikerrokset ovat usein kerrallisia,  
joten välissä olevien karkeampien linssien kautta imeminen onnistuu yllättä-  
vänkin hyvin. On huomattava, että alennuksen onnistumisen mittapuu ei ole  
pumppattu vesimäärä, vaan pohjavedenpaineen aleneminen. Lohkareisessa  
moreenissa imukärjet joudutaan asentamaan poraamalla, mikä likimain kak-  
sinkertaistaa kustannukset.

Muita toimenpiteitä, joilla pohjavettä voidaan alentaa ja kaivutöitä helpottaa,  
ovat:

- työjärjestyksen suunnitteleminen sellaiseksi, että työn alkuvaiheessa  
tehtävät kaivut ja kuivatusjärjestelyt ehtivät alentaa pohjavettä
- leikkauspohjaan tehtävistä kaivoista pumppaaminen, mikä vaikuttaa par-  
haiten karkeissa moreeneissa taikka hiekoissa.

Pohjaveden alentamista varten on selvitettävä tarkasti maakerrokset ja nii-  
den vaihtelu sekä pohjavedenpinta vaihteluineen ja mahdollinen orsivesi.

Pohjaveden alentamisen onnistumisen kannalta riskitekijöitä ovat maakerrosten vaihtelevuus ja työvirheet. Toisaalta pohjaveden alentamisen onnistumisen täsmällinen määrittäminen on vaikeaa. Epätäydellisestikin onnistunut pohjavedenalennus voi ratkaisevasti helpottaa kaivutyötä.

### 3 RATKAISUN VALINTA ELINKAARIKUSTANNUSTEN PERUSTEELLA

#### 3.1 Tekniset perusvaatimukset

Pohjarakennusratkaisun tulee täyttää seuraavat liikennetekniset ja rakennetekniset perusvaatimukset:

- Vakavuuden tulee olla riittävä sortumavaaran sekä haitallisten siirtymien välttämiseksi. Varmuusvaatimukset on esitetty Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteissa TIEH 2100002-01.
- Tien pinnan kaltevuuden muutokset ja painumat eivät saa olla haitallisen suuret. Suurimmat sallitut kaltevuudenmuutokset ja painumat on esitetty Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteissa TIEH 2100002-01 taulukossa 13. Lähtökohtana taulukon arvoissa ovat tien pituussuuntaisen ajodynamiikan vaatimukset sekä muut tien geometrian liikennetekniset vaatimukset kuten tien riittävä sivukaltevuus pinnan kuivatuksen toimivuuden takaamiseksi. Liikennetekniset vaatimukset asettavat suurimmille sallituille kaltevuuden muutoksille maksimiarvot, joita tiukennetaan taulukko-kohtaisesti kohdassa 3.2 esitettävien näkökohtien perusteella.
- Tie ei saa aiheuttaa haitallisia siirtymiä tai painumia tien ympäristössä.
- Ratkaisun tulee sopia yhteen muiden rakenteiden, esimerkiksi siltojen kanssa.

Tien pohjarakenteiden tekninen käyttöikä on Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteiden TIEH 2100002-01 mukaan 100 vuotta. Poikkeuksena ovat aallotettuihin teräsputkisiltoihin liittyvät pohjarakenteet, joiden käyttöikä on pääteillä 60 vuotta ja muilla teillä 40 vuotta. Maanvaraisten painuvien penkereiden painumat lasketaan 30 vuoden ajanjaksolle.

Tien päällysrakenteiden sekä varusteiden ja laitteiden tekninen käyttöikä on 30 vuotta.

#### 3.2 Painumatasaisuuden vaatimukset

*Tiepenkereen rakentamisen lähtökohtana on ollut rakentaa pehmeikölle rakennuskustannuksiltaan edullinen maanvarainen penger, jonka painumat eivät ylitä kulloinkin voimassa olleita suurimpien sallittujen kaltevuudenmuutosten ja maksimipainuman arvoja. Järeämpiä keinoja on käytetty silloin kun se tien vakavuuden kannalta on ollut tarpeellista tai painuma on laskennallisesti ylittänyt tavoitetaso. Käytettäessä pohjavahvistuksia tai perustettaessa tie esim paalulaatan varaan saadaan usein selvästi tasaisempaa tietä kuin maanvaraista ratkaisua käytettäessä. Erilaisia ratkaisuja on kuitenkin harvoin vertailtu muuten kuin rakennuskustannusten suhteen. Käytön aikaisia kustannuksia on voitu ottaa huomioon rakennuskustannuksiltaan tasaveroisissa ratkaisuissa sillä tavalla, että on valittu käyttökustannuksiltaan edullisempi ratkaisu.*

Kun pyritään ottamaan huomioon tien koko elinkaaren kustannuksia on painumatasaisuudelle asetettavat vaatimukset arvioitava ja määritettävä uudelta pohjalta. Tämä edellyttää hankekohtaista painumatasaisuusvaatimusten tarkastelua sekä tiekohtaisten ja usein pehmeikkökohtaisten vaatimusten asettamista. Hankekohtaisessa tarkastelussa on arvioitava tien rakenteelliset tekijät kuten rakennemateriaalien jäykkyys (asfaltti/betoni ja sitomaton/sidottu materiaali) ja tiehen sijoitettavaksi tulevat putkistot ja muut laitteet ja muut sellaiset tekijät. Pohjanvahvistuskustannukset otetaan huomioon mutta myös painumien korjauskustannukset ja tien käyttäjien kustannukset voidaan huomioida tien elinkaarikustannusten osana.

Painuvalla tiellä tien käyttäjän kustannukset ovat suuremmat kuin painumattomalla tiellä ja tämä johtuu pääasiassa siitä, että painuvaa tietä joudutaan korjaamaan ja siitä aiheutuu haittaa liikenteelle. Vilkaasti liikennöidyn tien elinkaarikustannuksia laskettaessa voi olla perusteltua asettaa painumatasaisuuden standardi kireäksi ja välttää näin liikennöintikustannuksia.

Tulevaisuudessa elinkaarikustannukset otetaan huomioon entistä monipuolisemmin. Vaikka elinkaarikustannuksia ei laskettaisikaan, on nykykäytännönkin mukaisesti hyvä käyttää painumatonta tai lähes painumatonta pengertä mm siltojen tulopenkereissä. Tällä varmistetaan, että maaperän kautta vaikuttavat pengerkuormat eivät rasita siltarakennetta kohtuuttomasti. Painumaton tai lähes painumaton standardi voisi soveltua myös korkealuokkaiselle tielle, johon sisältyy muutama lyhyt ja pohjanvahvistuskustannusten osalta halpa pehmeikkö. Myös pohjasuhteiltaan hyvin vaihtelevalle, vilkasliikenteiselle tielle voisi soveltua sallittuja arvoja kireämpi painumatasaisuuden vaatimustaso.

Jos pehmeikkö on pitkä ja homogeeninen ja pohjanvahvistuskustannukset ovat suuret, voi olla perusteltua sallia kokonaispainumalle normaalia suurempia arvoja. Siirtymärakenteiden suunnitteluun on kiinnitettävä tällöin erityistä huomiota.

### 3.3 Rakentamiskustannukset

Tien perustamistavat on perinteisesti valittu pääosin rakennuskustannusten perusteella ja niiden merkitys tulee olemaan suuri elinkaarikustannuksiin perustuvissa laskelmissa ja niiden perusteella tehtävässä valinnassa. Kustannukset lasketaan tapaukseen sopivalla tarkkuudella mitoitettujen ratkaisujen pohjalta.

Vertailuja varten lasketaan pohjarakentamisen kokonaiskustannukset tarkasteltavaa pehmeikköosuutta kohti. Vertailussa otetaan huomioon eri vaihtoehtojen mahdollisesti erilaiset päällysrakennusratkaisut taikka muut kustannusvaikutukset. Verrattuna tyyppipoikkileikkaustarkasteluun ja prosentuaalisiin kustannuseroihin saadaan seuraavat hyödyt:

- Saadaan havainnollinen käsitys suoritettavan kustannustarkastelun rahallisesta merkityksestä sekä merkityksestä suhteessa hankkeen kokoon.
- Saadaan käsitys siitä, voiko mahdollinen suurikin prosentuaalinen säästö pienessä asiassa kumoutua jollain muulla näkökohdalla, kuten esimerkiksi rakennusajan pitenemisellä taikka rakennuttajan työmäärän kasvulla.
- Saadaan käsitys vaihtoehtoisten ratkaisujen seurannaisvaikutuksista, esimerkiksi erilaisten siirtymärakenteiden vaikutuksista kustannuksiin.

Kustannusarvion laadintaohjeita ja yksikköhintoja on esitetty esimerkiksi julkaisussa Pohjarakentamisen kustannustietoja TIEH 4000330. Yksikkökustannusten muodostumiseen vaikuttavat myös urakoitsijakohtaiset tekijät. Kustannusarvion laadinnassa on erityisesti hankkeen olennaisten kustannusten osalta hyödynnettävä toteutumatietoja vastaavankaltaisista saman seudun kohteista yhteistyössä urakoitsijoiden kanssa.

Kustannusarvion luotettavuus ja sen mahdolliset vaihtelurajat arvioidaan. Tähän liittyviä näkökohtia ovat muun muassa:

- Hankkeen massatalouden vaikutus. Esimerkiksi massanvaihdon hinta riippuu ratkaisevasti siitä, saadanko täyttömassat tielinjalta vai joudutaanko ne hankkimaan muualta ja minkälaiset ovat läjitysmahdollisuudet.
- Jos menetelmä on vain harvojen urakoitsijoiden käytössä, sen hinta on suhdanneherkempi kuin yleisempien menetelmien.

Kohdissa 4.1-4.2 on käsitelty alustavissa suunnitteluvaiheissa tehtävän kustannusten arvioinnin erityispiirteitä.

### 3.4 Ylläpitokustannukset

Laatutasoltaan erilaiset ratkaisut johtavat erilaiseen ylläpitotarpeeseen ja erilaisiin ylläpitokustannuksiin, jotka on pohjarakennusratkaisuja tehtäessä aina otettava huomioon.

Ylläpitotarve arvioidaan ensin laskennallisten painumien pohjalta. Tämän lisäksi arvioidaan yllättävien painumien riski. Tiehen tulevat epäjatkuvuuskohdat (sillat, putkijohdot) otetaan huomioon ylläpitotarvetta lisäävänä tekijänä.

Ylläpitotarvetta ei pidä arvioida pelkkinä päällystysteknisinä toimenpiteinä, jos pohjarakennusratkaisu on sellainen, että painumien tasoittaminen päällysteellä on tehotonta. Tällöin tulee varautua johonkin laajempaan korjaustoimenpiteeseen.

### 3.5 Ympäristövaikutukset ja ympäristökuormitukset

Seuraavassa käytetään termiä:

- ympäristövaikutus sellaisista vaikutuksista, joiden välttäminen tai lieventäminen on suunnittelussa pakollinen reunaehto ja joista aiheutuvat kustannukset suoraan vaikuttavat hankkeen talouteen
- ympäristökuormitus sellaisista vaikutuksista, joista aiheutuvat mahdolliset kustannukset eivät ainakaan nykytilanteessa suoraan vaikuta hankkeen talouteen.

Usein toistuvia perustamistavan valinnassa huomioonotettavia ympäristövaikutuksia ovat:

- pehmeiden massojen sivusiirtymät (pohjaantäytössä)
- kaivantoluiskan sortuman vaara (erityisesti massanvaihdossa kaivamalla, mutta joskus muissakin ratkaisuissa)
- kaivumassojen kuljetuksesta ja läjityksestä aiheutuvat maisemahaitat, liikenneväylien likaantuminen ja lisääntyneen liikenteen haitat (massanvaihdossa)
- melu ja tärinä (erityisesti paalutuksessa, mutta myös muissa menetelmissä)
- pohjaveden aleneminen (kaivutöiden vaikutuksesta)

Edellä on esitetty ympäristövaikutuksia, jotka usein vaikuttavat ratkaisun valintaan. Näiden lisäksi otetaan huomioon sellaisia ympäristövaikutuksia, jotka tarkalla suunnittelulla ja toteutuksella joudutaan vain minimoimaan, koska menetelmää ei pystytä vaihtamaan ympäristövaikutuksiltaan lievempään. Tällaisia ovat esimerkiksi paalutukseen liittyvät tärinä, häiriintyminen, tai huokosvedenpaineen nousu taikka syvästabilointiin liittyvä työnaikainen pohjamaan häiriintyminen.

Useimmat esitetyistä ympäristövaikutuksista ovat joko kokonaan työnaikaisia tai työn aikana voimakkaimmillaan esiintyviä. Pysyviä voivat olla lähinnä vaikutukset pohjaveteen.

Erialaisten pohja- ja päällysrakennerratkaisujen ympäristökuormitusten arviointiin on kehitetty alustavia työkaluja. Luettelot huomioonotettavista tekijöistä voidaan likimain lyhentää seuraavankaltaisiksi:

- energiankulutus (melko hyvin määritettävissä)
- luonnon maamateriaalien käyttö (määrä melko hyvin määritettävissä, mutta materiaalien paikallisen saatavuus ja ottoalueen herkkyys ympäristöhaitoille voivat olla varsin vaihtelevia)
- päästöt (esimerkiksi hiilidioksidin osalta melko hyvin määritettävissä).
- melu ja pöly (kohtalaisen hyvin määritettävissä)
- liukoisuudet maaperään (vaikeammin määritettävissä, samoin vaikutusten todellinen haitallisuus).

Eri vaikutukset pitää arvottaa niin, että ne tulevat yhteismitallisiksi. Menetelmien ollessa kehittelyn alaisia voidaan tarkastelua yksinkertaistaa esimerkiksi:

- jättämällä tarkastelun ulkopuolelle tekijät, joiden välillä ei eri vaihtoehtoissa ole eroja
- tinkimällä arvotuksen tarkkuudesta varsinkin, jos vaihtoehtojen väliset erot eri tekijöiden osalta ovat samansuuntaiset
- jättämällä vaikeasti arvioitavat ja ympäristöä vain vähän kuormittavat tekijät huomioonottamatta

Ympäristökuormituksista voidaan arvotusmenettelyä käyttäen muodostaa ympäristökuormitusindeksi. Eri vaihtoehtojen erilaisten kustannusten ja erilaisten ympäristökuormitusindeksien yhteismitalliseen vertailuun ei ole tois-taiseksi suosituksia ja kyseisten tekijöiden keskinäinen painotus on joka tapauksessa tarpeen ratkaista hankekohtaisesti.

### 3.6 Pohjarakenteiden pitkäaikaiskestävyys

Pohjarakenteiden vanhenemisominaisuuksia voidaan tarkastella seuraavasti:

- Painumattomien pohjarakenteiden kestävyys riippuu rakenteessa käytettävien materiaalien (massanvaihtotäyttö, betoni, teräs, puu) kestävyydestä edellyttäen, että alueellinen vakavuus on kunnossa.
- Painuvissa pohjarakenteissa (kevennetty penger, osittainen massanvaihto, pystyjoitus, syvästabilointi määrämittaisilla pilareilla) rakenteen kestävyys riippuu materiaalien kestävyyden lisäksi myös rakenteen kanssa kosketuksissa olevan maapohjan herkkyydestä mitoitusvirheille ja olosuhteiden muutoksille (esimerkiksi pohjaveden alenemiselle).
- Saven alarajaan ulotetun syvästabiloinnin käyttäytyminen on näiden ääritapausten väliltä.

Pohjarakenteiden vaurioiden ennakoitavuudesta voidaan todeta:

- Painumattomaksi mitoitettujen rakenteiden painuma on hälyttävä merkki ja ko. rakenteiden vaurioituttua sortuman vaara kasvaa äkillisesti. Erityisesti paalulaatta- tai paaluhatturakenteiden kunto on selvitettävä välittömästi, jos havaitaan painumista.
- Painuvissa rakenteissa varmuus sortumaa vastaan riippuu myös maaperästä. Sortumavaaran jostain syystä kasvaessa ilmenee usein (ei aina) painumia, joiden syyn arviointi auttaa selvittämään, onko sortumavaara kasvanut.

Eri pohjarakennusratkaisuista voidaan todeta:

- Paalulaattarakenteiden käyttöikä voitaneen arvioida teräsbetonirakenteiden normaalien periaatteiden mukaisesti ottaen huomioon ko. rakenteiden kosteusolosuhteet ja betonin kestävyys maaperässä. Paalulaattarakenteen ja maapohjan yhteistoiminta on vähäistä ja paalulaattoja käytetään usein sellaisissa pohjasuhteissa, että paalujen tai laatan rikkoutuminen voi aiheuttaa sortuman. Maapohjan heikko alueellinen vakavuus

- voi vaurioittaa paalulaattarakenteita, mutta painumia tms. lievempiä maapohjan liikkeitä paalulaattarakenteet kestävät melko hyvin.
- Paaluhatturakenne on paalulaattarakenteeseen verrattuna toiminnallisesti epämääräisempi ja siihen sisältyy riskejä (paaluhattujen liikkuminen ja kallistuminen). Muuten paaluhatturakenteen toimintaperiaatteet ovat samankaltaiset kuin paalulaattarakenteen.
  - Syvästabilointipilarien mahdollisesta heikkenemisestä ajan myötä ei ole tietoa suuntaan eikä toiseen. Jos pilarien lujuus merkittävästi heikkenisi, se saattaisi aiheuttaa kuormituksen vähenemistä pilareilla ja lisääntymistä savella sekä tämän seurauksena pientä nopeaa käyttövaiheen painumaa ja tämän jälkeen uuden tasapainotilanteen. Ainakaan tavallisissa tapauksissa ei voine syntyä vakavuuden kannalta vaarallisia tilanteita. Tarkkoja tietoja ei ole myöskään päinvastaista muutosta aiheuttavasta pilarien lujuudenlisäyksestä 3 kk iän jälkeen. Pilarien yläpäiden jäätyminen voi joissain tapauksissa olla pitkäaikaiskestävyyttä heikentävä tekijä, mutta harvoin merkittävä.
  - Onnistuneen massanvaihdon voidaan arvioida olevan muuttumaton rakenne.
  - Pystyjoituksessa painumia ja erityisesti painumanopeutta harkitusti kasvatetaan ylipenkereellä ja konsolidaatiopainuman saaminen luotettavasti pysähtymään on monissa tapauksissa osoittautunut ongelmalliseksi. Kun konsolidaatiopainumia nopeutetaan, myös tavallisissa tapauksissa erittäin hitaat ja usein haitattomat sekundääripainumat alkavat vaikuttaa aikaisemmin.
  - Teräsrakenteiden korroosio on ennustettavissa oleva pohjarakenteen vanhenemisilmiö.
  - Koska synteettiset lujitteet viruvat, niiden pitkäaikaislujuus huononee. Tähänastinen tieto perustuu lähinnä ekstrapolaatioon. Lujitteen pitkäaikatarve monissa tapauksissa vähenee konsolidaation edetessä (maanvaraiset rakenteet), mutta paaluhatturakenteeseen taikka syvästabilointiin yhdistetyn lujitteen osalta ei.
  - Kevytsoran ominaisuuksien kestävydestä on jonkin verran tietoa. Aina-kin 20-30 vuotta vanhoista kevytsorakevennyksistä kaivettu materiaali on ollut täysin uudelleenkäyttökelpoista. Kevytsoran mahdollisessa vanhenemisessä kriittisin tekijä lienee vaara kevytsorarakenteiden murenemisestä dynaamisten kuormitusten alaisena, mikä rajoittunee aivan kevennyksen pintaosiin. Puutteellisesti kuivatetuissa kevennyksissä vettyminen voi kasvattaa tilavuuspainoa ja heikentää kevennyksen tehokkuutta.
  - Yleensä kevennysmateriaaleissa voi esiintyä murenemistä, tiivistymistä, vettymistä tai kemikaalien aiheuttamaa syöpymistä vaihtelevassa määrin ko. materiaalin ominaisuuksista riippuen.
  - Kevennysrakenteen kokonaiskestävyys voi varsin pientenkin mitoitus- tai toteutusvirheiden taikka pohjaveden alenemisen johdosta olla huonompi kuin itse kevennysmateriaalin ja rakenne olla hankalastikin korjattava. Tämä on tilanne erityisesti, jos kevennyksellä pyritään täysin painumattomaan rakenteeseen ja tavoitteessa ei onnistuta. Sen sijaan silltipohjalla esikuormituksen ja kevennyksen yhdistelmä rakenteiden mitoituksen onnistuneisuus voidaan usein todeta työnaikaisilla tarkkailumittauksilla.



### 3.7 Pohjarakennustyön onnistumisvarmuus

Perustamisratkaisuja vertailtaessa tulee ottaa huomioon ratkaisun onnistumisvarmuus. Ratkaisun työnaikaista onnistumista voidaan tarkastella ainakin seuraavilta näkökannoilta:

- vakavuus pysyvässä tilanteessa
- vakavuus työnaikaisissa tilanteissa
- ympäristövaikutusten pysyminen sallituissa rajoissa
- työn onnistuminen niin, ettei työvirheillä ole aiheutettu jatkossa tapahtuvia lisäpainumia
- työn aikana ilmenevien lisäkustannusten ja työn viivästymisen riski.

Pysyvän tilanteen vakavuuden tulee olla Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteissa TIEH 2100002-01 esitetyn mukainen. Minimivaatimukset ylittävä vakavuus voidaan ottaa jonkin ratkaisun ylimääräisenä etuna huomioon. Työnaikaisten tilanteiden vakavuuksissa (esimerkiksi massanvaihtokaivannon vakavuus vapaassa maastossa tai pohjaantäytöt) voidaan hyväksyä pysyvää lopullista tilannetta huonompi varmuustaso, jos mahdolliset haitat rajoittuvat vähäisiksi ja ratkaisulla on saavutettavissa merkittäviä säästöjä.

Erittäin oleellinen tarkasteltava asia on ratkaisun herkkyys lähtötietojen virheille, pienille työvirheille tai suunnitelman epätarkalle noudattamiselle. Riskitekijöitä on kohdissa 2.1 ja 2.3 käsitelty menetelmäkohtaisesti.

Tarkkailumittauksilla voidaan perustamismenetelmästä ja tapauksesta riippuen ohjata työtä ja varmistaa lopputulos, tarkkailla vaikutuksia ympäristöön tai tarkentaa mitoitusta ja saavuttaa vielä rakentamisvaiheessa säästöä.

### 3.8 Muut tekijät

#### 3.8.1 Tilantarve

Varsinkin taajama-alueilla tilantarve on merkittävä pohjanvahvistusmenetelmän valintaan vaikuttava tekijä. Tilaa vaativia menetelmiä ovat lähinnä vastapenkereet ja kevennysleikkaukset sekä pystyjoitus, koska se useimmiten edellyttää vastapenkereitä. Esimerkiksi viereen tulevat muut liikenneväylät, kunnallistekniikka, kuivatusrakenteet, asemakaavojen rajat tai muu tilanahaus estävät usein näiden menetelmien käytön.

#### 3.8.2 Tarvittava rakentamisaika

Rakentamisaikaa tarvitaan eniten käytettäessä pystyjoitusta, ylipengertä tai vaiheittain pengertämistä, koska tällöin painumien halutaan tapahtuvan rakentamisen aikana. Myös pelkkää painuma-ajan varaamista ilman muita erikoistoimenpiteitä käytetään perustamisratkaisuna. Jos syvästabilointi mitoitetaan myötääväksi, tarvitaan muutamien kuukausien painuma-aika. Lisäksi pohjaantäytössä on yleensä tarpeen ilman laskennallisia perusteita varata itse työn ja tien päällystämisen välille aikaa jälkipainumien välttämiseksi.

Muissa menetelmissä tällaisia aikoja ei yleensä tarvita. Joissain tapauksissa on tarpeen valita erityisen nopeasti toteutettava ratkaisu.

### 3.8.3 Työnaikainen liikenne

Työnaikaisella liikenteellä voi olla seuraavia vaikutuksia pohjarakennusmenetelmän valintaan:

- Liikenteelle aiheutuva haitta voi pakottaa lyhyeen rakentamisaikaan.
- Nykyiset liikenneväylät tai rakennettavat kiertotiet voivat rajoittaa käytettävissä olevaa tilaa ja aiheuttaa tuentatarvetta.
- Nykyisten liikenneväylien vaurioitumista on varottava.
- Uudet liikenneväylät voidaan joutua rakentamaan vaiheittain.
- Rakennettavat kiertotiet voivat vaatia perustamistoimenpiteitä.

### 3.8.4 Tulevat rakentamistavavaiheet

Tierakenteiden perustamistavoja suunniteltaessa tulee aina jollain tarkkuudella tarkastella ratkaisun sopivuus mahdollisiin tuleviin rakennusvaiheisiin. Usein on mahdollista pienin lisäkustannuksin helpottaa tien myöhempää leventämistä, esimerkiksi pienellä levennyksellä perustamistoimenpiteeseen taikka vinopaalujen välttämällä. Pohjanvahvistusten tekeminen kokonaan valmiiksi tulevia rakennusvaiheita varten on harvoin taloudellisesti perusteltua. Lähinnä saattaa tulla kysymykseen pohjaantäytön leveyden valitseminen tulevia tarpeita silmälläpitäen, koska pohjaantäyttöjen leventämiseen usein liittyy teknisiä hankaluuksia ja ratkaisu saattaa massatilanteesta riippuen olla edullinen.

Eri aikoina rakennettavien tien osien perustamistavan tulisi yleensä olla sama. Joissain tapauksissa voidaan eri aikoina rakennettavien ajoratojen linjauksella vähentää perustamistavojen riippuvuutta toisistaan. Saman ajoradan alueella perustamistavan vaihtaminen poikkisuunnassa on perusteltua vain poikkeustapauksissa ja ratkaisu on suunniteltava erittäin tarkasti nimenomaan poikkisuuntaisten painumaerojen minimoinnin näkökulmasta.

### 3.8.5 Tien käyttäjän kustannukset

Varsinkin pääteillä voidaan tien käyttäjän kustannusten olettaa pysyvän jokseenkin vakioina erilaisia pohjarakennusratkaisuja verrattaessa. Korkealuokkaisilla teillä ei epätasaisuuksien ja muiden vaurioiden voida sallia kehittyvän niin haitallisiksi, että ne merkittävästi kasvattaisivat tien käyttäjien aika- ja ajoneuvokustannuksia.

Erilaatuisille pohjarakennusratkaisuille ei tarvitse arvioida onnettomuuskustannuksia, sillä tien painumatasaisuuden vaihtelulla, kun se pysyy sallituissa rajoissa, ei ole havaittu olevan vaikutusta onnettomuuskustannuksiin.

Konkreettinen tien käyttäjän kustannuksiin vaikuttava tekijä ovat kunnossapitotoimenpiteet, jotka voivat aiheuttaa:

- aikakustannusten lisääntymistä työmaiden nopeusrajoitusten ja mahdollisten kiertoteiden vaikutuksesta
- ajoneuvokustannusten lisääntymistä kiertoteiden vaikutuksesta.

Tietyömaiden aiheuttamia tien käyttäjien lisäkustannuksia on käsitelty selvityksessä Tietyömaiden liikennehaittojen arviointi, Tielaitoksen selvityksiä 14/2000.

### 3.9 Vaihtoehtojen karsiminen ja valikointi

#### 3.9.1 Pohjasuhteet, tiegeometria ja pakkopisteet

Useissa tapauksissa voidaan perustamistapavaihtoehtoista nopeasti valikoida kysymykseen tulevat vaihtoehdot, joiden välillä tehdään tarkempia vertailuja. Vaihtoehtojen ensimmäiseen valikointiin vaikuttavia tekijöitä ovat pohjasuhteet ja tiegeometria sekä pakkopisteet, kuten esimerkiksi penkereeseen rajoittuvat sillat ja niiden perustamistapa. Tarkastelussa on aina otettava huomioon mahdollisuus muuttaa tilannetta tiegeometrian muutoksella, varsinkin alustavissa suunnitteluvaiheissa.

#### Penger savipehmeiköllä

Jos pengerkorkeus on niin suuri, että tiepenkereen vakavuus ilman perustamistoimenpiteitä ei ole lähelläkään riittävää, kysymykseen tulevat lähinnä paalulaattarakenne tai massanvaihto. Silloin, kun pehmeikkö on matala, massanvaihto kaivamalla on useimmiten taloudellisesti paalulaattarakennetta edullisempi. Suuremmilla pehmeikkösyvyyksillä vertaillaan usein paalulaattarakennetta ja pohjaantäyttöä. Näiden välinen teknistaloudellinen ero on tapauskohtainen, mutta yleisesti voidaan todeta paalulaattarakenteen kustannusten suurempi riippuvuus pengerkorkeudesta kuin pehmeikkösyvyydestä, kun taas pohjaantäytön osalta tilanne on päinvastainen. Suurilla pengerkorkeuksilla eivät siis painumatarkastelut ole tarpeen perustamistavan valinnassa.

Kun varmuus penkereen sortumaa vastaan on vähintään ykkösen luokkaa, myös syvästabilointi alkaa tulla kysymykseen perustamistapana. Tapauksesta riippuen lähtötilanteen vakavuudelle asetetaan hiukan toisistaan poikkeavia vaatimuksia ja tilannetta voidaan säädellä esimerkiksi vastapenkereillä. Lähtötilanteen riittävä vakavuus ei varsinaisesti ole syvästabiloinnille välttämätön tekninen edellytys, vaan varovaisuuden sanelema vakiintunut suunnitteluperuste. Useimmilla syvästabilointiratkaisuilla voidaan päästä käyttövaiheessa jokseenkin varmasti painumattomaan tiepenkereeseen. Tapauksesta riippuen syvästabilointia voidaan joutua vertailemaan joko paalulaattarakenteeseen ja massanvaihtoon taikka painumastandardiltaan epävarmempiin pystyojitukseen tai pengerveennykseen.

Kun varmuus penkereen sortumaa vastaan on vähintään jonkin verran yli ykkösen ja vastapenkereille on tilaa, alkaa kysymykseen tulla myös pysty-

ojitus, kun pyritään hyvään painumastandardiin, taikka pelkät vastapengerit alempiluokkaisilla teillä, kun tapahtuvat painumat voidaan sallia.

Kun varmuus penkereen sortumaa vastaan on lähellä riittävää, alkaa kysymykseen tulla myös pengerkevennys. Pengerkevennyksellä saavutettava painumastandardi on hyvin tapauskohtainen.

Pienuhkö vakavuuden parannus voidaan aikaansaada myös lujitteilla.

Vakavuuden ollessa riittävä tulee hyvin matalilla savipehmeiköillä kysymykseen myös esikuormitus.

Savipehmeiköillä paaluilla perustettavaan siltaan rajoittuva penger useimmiten perustetaan paalulaattarakennetta käyttäen.

### **Penger silttipehmeiköillä**

Silttipehmeiköiden erikoispiirteinä on painumien nopeus ja vakavuuden huomattava paraneminen jo rakennusaikaisen esikuormituksen vaikutuksesta. Näistä syistä edellämainitut savikkoa koskevat nyrkkisäännöt eivät ole samalla lailla voimassa. Silttipehmeiköillä tulee perustamistoimenpiteiden valinnassa ja mitoituksessa ottaa huomioon mahdollisuus taloudellisimpiin ratkaisuihin esikuormituksen, tarkkailumittausten ja yhdistelmä rakenteiden avulla.

Silttipehmeiköillä käytetään paalulaatta- tai paaluhatturakennetta varsin harvoin muuten kuin paaluilla perustettavien siltojen tulopenkereissä. Silttipehmeiköillä myös muut tulopenkereen perustamistavat saattavat tulla kysymykseen paaluilla perustettavan sillan yhteydessä.

### **Leikkausluiska**

Leikkausluiskan todennäköinen vahvistamismenetelmä ratkeaa useimmiten seuraavalla tarkastelulla:

- Millä luiskan kaltevuudella leikkausluiska voidaan tehdä?
- Onko mahdollista tehdä kevennysleikkaus (yleensä kustannuksiltaan varsin edullinen)?
- Jos ei, onko pehmeikkösyvyys sellainen, että massanvaihto luiskassa on mahdollinen?
- Jos ei, tarkastellaan luiskanvahvistuksia tai luiskan tukirakenteita
- Tarvitaanko eroosiosuojauksia?

### **3.9.2 Kirjavuuden vähentäminen**

Perustamistapojen suunnittelussa pitää toisaalta pyrkiä kustannuksiltaan taloudellisiin ratkaisuihin ja toisaalta suunnitelman pohjarakennusratkaisuista ei pidä tehdä tarpeettoman tiheästi vaihtelevia.

Ratkaisujen sopivan vaihtamistiheyden valintaan liittyvistä näkökohdista ehdottomasti olennaisin on muutoskohtien välisten siirtymärakenteiden epäonnistumisen riski. Jos kysymyksessä ovat esimerkiksi herkästi epäonnistuvat

pystyjoituksen ja painumattomampien perustamistapojen rajakohdat, niiden määrän minimointi on tärkeämpää kuin yleensä moitteettomasti onnistuvien massanvaihdon ja paalutuksen rajakohtien minimointi.

Vaikeampi on määrittää, paljonko pitkät yhtenäiset perustamistapajaksot vaikuttavat alentavasti rakentamisen yksikkökustannuksiin silloin, kun kaikkia käytettäviä ratkaisuja joka tapauksessa esiintyy hankkeessa. Asiaa kannattaa pohtia urakoitsijan kanssa. Hankkeen ainoan erikoistyön taloudellisuutta kannattaa vakavammin pohtia, mutta esimerkiksi syvästabiloinnissa ei kohteen pienuus sinänsä kovin olennaisesti nosta yksikköhintaa.

Perustamisratkaisujen kustannuksia ja niiden eroja tulee tarkastella suhteessa hankkeen kokonaiskustannuksiin ja yleiseen luonteeseen.

Perustamistapojen muutoskohtia pohdittaessa tulee luonnollisesti ottaa huomioon, perustuvatko ne olennaisesti pohjasuhteiden muutoksiin vai hyvin pieniin lähes tulkinnanvaraisiin eroihin.

### 3.10 Ratkaisun valinta elinkaarikustannusten perusteella

Aluksi on tarkistettu (vrt. kohta 3.8.1), mitkä ratkaisuvaihtoehdot täyttävät tekniset perusvaatimukset. Ympäristövaikutusten perusteella jotkin vaihtoehdoista ovat voineet karsiutua pois. Jäljellejääneitä vaihtoehtoja verrataan:

- laatutasoltaan (ks. kohta 3.8.2)
- rahallisilta kustannuksiltaan (rakennuskustannukset, ylläpitokustannukset, tien käyttäjän kustannukset)
- ympäristökuormituksiltaan (ks. kohta 3.4), jotka tarkastelumenetelmien kehittyessä opittaneen yhä paremmin muuttamaan kustannusten kanssa vertailukelpoiseen muotoon.

Elinkaarikustannuksia tarkasteltaessa on perusteltua jättää tarkastelun ulkopuolelle sellaiset kustannukset, joissa ei ole eroja vaihtoehtojen välillä.

Rakennuskustannukset kerrotaan tarvittaessa hankekohtaisesti harkiten työnaikaista riskiä kuvaavalla kertoimella (>1,00).

Kunnossapitokustannukset ja kunnossapitotoimenpiteistä aiheutuvat tienkäyttäjän kustannukset kerrotaan tapauskohtaisesti harkitulla pohjarakennusmenetelmäkohtaisella kertoimella ja diskontataan nykyhetkeen.

Elinkaarikustannuksiltaan edullisin ratkaisu valitaan toteutettavaksi.

Liitteen 1 taulukossa on esitetty menetelmäkohtaisesti elinkaarietäisyyteen vaikuttavia tekijöitä.

Liitteessä 2 on kuvattu erään suopehmeikkörampin pohjarakennusmenetelmien valinnan kulku. Tapaus on 1980-luvulta, joten siinä ei tule ilmi elinkaarikustannusten käyttö. Esimerkki kuvaa joka tapauksessa todellista tapausta dokumentoituine erikoispiirteineen.

## 4 POHJARAKENNUSRATKAISUN VALINTA ERI VAIHEISSA

### 4.1 Esisuunnitteluvaiheet

Hankkeen kustannukset määräytyvät varsin pitkälle esisuunnitteluvaiheissa tehtävien ratkaisujen pohjalta ja näissä vaiheissa geosuunnittelun tärkein tavoite on arvioida oikein erilaisten tie- ja siltateknisten ratkaisuvaihtoehtojen pohjarakennuskustannukset. Pohjarakennusratkaisun valinta tehdään lähinnä kustannusten arviointia varten. Sopivien menetelmien valinnassa, niiden mitoituksessa ja kustannusten arvioinnissa käytetään varovaisuutta seuraavista syistä:

- Maaperätutkimusten määrä on alustavissa vaiheissa pieni ja pohjasuhteiden arviointi sisältää riskiä.
- Karkealla tarkkuudella tehtävässä suunnittelussa ei yleensä pystytä ennakoidaan kaikkia työjärjestykseen, ympäristövaikutuksiin ja tiehen liittyviin muihin rakenteisiin liittyviä tekijöitä, jotka voivat rajoittaa pohjarakennusmenetelmän valintaa tai muuten nostaa pohjarakennuskustannuksia.
- Käytettävissä olevan rakentamisajan pituutta ei yleensä vielä tiedetä.

Yleensä esisuunnitteluvaiheissa pohjarakennuskustannukset arvioidaan ns. varmojen ratkaisujen pohjalta. Näitä ovat tiepenkereillä esimerkiksi:

- Paalulaattarakenteet.
- Massanvaihto kaivamalla, kun riittävin pohjatutkimuksin tiedetään, että pehmeikkösyvyys pysyy sopivana eivätkä lähistöllä sijaitsevat varottavat rakenteet tee kaivantoa erityisen hankalaksi.
- Pohjaantäyttö vapaassa maastossa, kun massojen läjitysmahdollisuus on varmistettu.
- Varovaisesti mitoitettu syvästabilointi, jos maaperän stabiloituvuus tunnetaan kohdekohtaisten kokeiden perusteella taikka voidaan arvioida hyvän paikallistuntemuksen perusteella, kun kysymyksessä ei ole turve tai lieju.

E erityisen vaativissa kohteissa pohjarakennusratkaisuja ja niiden kustannuksia voidaan tutkia ja varmistaa normaalia tarkemmin.

Esisuunnitteluvaiheissa pohjarakennusmenetelmän valinta perustuu määrällisesti vähäisiin pohjatutkimuksiin. Tällöin on erityisen tärkeää valita tapauskohtaisesti hyödyllisimmät pohjatutkimusmenetelmät. Pohjatutkimusten ja niiden ohjelmoinnin tukena käytetään erityisesti näissä vaiheissa:

- kartta- ja ilmakuvatulkintaa
- geofysikaalisia tutkimuksia
- vanhojen suunnitelmien inventointia
- maastokäynneillä tehtäviä havaintoja.

Esisuunnitteluvaiheissa geoteknisten laskelmien määrä on yleensä vähäinen. Kuitenkin vaikeissa olosuhteissa voidaan tarvita laajojakin laskelmia hankkeen toteutettavuuden, kustannusten sekä väylien linjauksen ja tasauk-

sen valinnan kannalta oleellisten kysymysten ratkaisemiseen. Tällaisia tilanteita voivat olla:

- heikko alueellinen vakavuus
- syvät leikkaukset pehmeikköalueilla
- merkittävät ympäristövaikutukset, kuten pohjaveden aleneminen pehmeikköalueilla pohjarakennustoimenpiteiden johdosta
- rakentamiskustannuksiltaan huomattavat pengerosuudet pehmeiköillä.

#### 4.2 Tiesuunnitelmavaihe

Tiesuunnitelmavaiheessa pohjarakennusratkaisun suunnittelu on vietävä niin pitkälle, että voidaan täyttää tielain mukaiset vaatimukset:

- Määrittää tarvittava tiealue.
- Määrittää hankkeen kustannukset.

Nämä vaatimukset edellyttävät sitä, että 1-2 ratkaisua suunnitellaan niin tarkasti, että niiden toteutettavuudesta voidaan olla varmoja ja että kaikki kustannuksiin vaikuttavat oleelliset tekijät sekä tilantarve ja rakentamisaika saadaan selville.

Mahdolliset muut realistiset pohjarakennusratkaisut tulee mahdollisuuksien mukaan määrittää, jotta voidaan varmistaa pohjatutkimusten riittävyys siihen, että urakoitsija pystyy hinnoittelemaan omat vaihtoehdonsa. Hylättyjen vaihtoehtojen hylkäämisen perustelut taikka yleisemminkin eri ratkaisuvaihtoehtoisissa todetut käyttökelpoisuutta rajoittavat tekijät on syytä dokumentoida.

Tarvittaessa tiesuunnitelmaa on suositeltavaa täydentää, jotta sen tarkkuus täyttää suunnittelua sisältävän urakkamenettelyn vaatimukset.

Yleisperiaatteena voidaan pitää, että tiesuunnitelmassa tehtäisiin kaikkia hankkeessa tarvittavia pohjatutkimuslajeja ja rakennussuunnitteluvaiheessa vain täydennettäisiin joidenkin tutkimusten määrää.

Aikaa vievät erikoistutkimukset, kuten stabiloituvuustutkimukset laboratoriossa tai maastossa taikka pohjaveden koepumppaukset, tulee tehdä tiesuunnitelmavaiheessa.

Ratkaisujen valintaa varten tarvittavat vakavuus- ja painumalaskelmat pyritään tekemään tiesuunnitelmavaiheessa.

#### 4.3 Rakennussuunnitteluvaihe

Rakennussuunnitteluvaiheessa tarkennetaan tiesuunnitelmavaiheen ratkaisuja rakentamisen vaatimusten mukaiseen tarkkuuteen. Pohjarakennusratkaisuja voidaan myös vaihtaa mm. seuraavista syistä:

- Ratkaisuvaihtoehtojen rakennuskustannuksiin vaikuttavat urakoitsija-kohtaiset tekijät muuttavat vaihtoehtojen edullisuusjärjestystä.

- Muuten saadaan aikaisemmasta poikkeavaa tietoa ratkaisuvaihtoehtojen kustannuksista (tilaajan teettämässä rakennussuunnitelmissa).
- Pohjatutkimusten tarkentaminen muuttaa ratkaisuvaihtoehtojen edullisuusjärjestystä.
- On ilmennyt tarvetta korjata aikaisemmissa suunnitteluvaiheissa tehtyjä ratkaisuja.

Rakennustoimenpiteiden yksityiskohtaiseen mitoitukseen liittyvät laskelmat, urakoitsijan vaihtoehtojen mitoituslaskelmat sekä hankkeen lopulliseen dokumentointiin liittyvät laskelmat tehdään rakennussuunnitteluvaiheessa.

Eri suunnitteluvaiheissa tehtäviä pohjatutkimuksia on tarkemmin selostettu julkaisussa Teiden pehmeikkötutkimukset TIEL 320520 ja laskelmia julkaisussa Geotekniset laskelmat TIEL 2180002.

#### **4.4 Sopimusmuotojen vaikutus ratkaisun valintaan**

Tien suunnittelun jakaminen esisuunnittelu-, tiesuunnittelu- ja rakennussuunnitteluvaiheisiin on periaatteessa riippumaton siitä, vastaako tilaaja rakennussuunnittelun teettämisestä vai kuuluuko se urakkaan. Suunnittelua sisältävä urakkamenettely (nykyinen nimitys ST-urakka) tuo ratkaisujen valintaprosessiin käytännössä yhden vaiheen lisää, kun käsitellään urakoitsijan tarjousta varten teettämää alustavaa rakennussuunnitelmaa.

ST-urakkatarjousten ollessa käytettävissä tiedetään rakennuskustannukset tilaajan näkökulmasta lopullisella varmuudella.

Menettelyt eri urakoitsijoiden esittämien ratkaisujen teknisen laadun arvottamiseksi taikka urakan aikana tapahtuvien ratkaisumuutosten arvottamiseksi ovat kehitysvaiheessa. Eräitä alustavia ehdotuksia ovat:

- liite 3 (kokeiluvaiheessa)
- liite 4 (tämän työn yhteydessä kehitelty).



## 5 KIRJALLISUUS

Kalliokoski, A., Tolla, P., Valkeisenmäki, A. Elinkaarikustannuslaskennan käytön kehittäminen tienpidossa. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 3200670.

Lehmus, E., Eskola, P., Häkkinen, T., Korkiala-Tanttu, L., Mroueh, U-M., Tuohola, M. Infra-alan elinkaaritarkastelut. Esiselvitys. VTT. Espoo 2002. Sisäinen raportti RTE50-IR-22/2002.

Länsivaara, T. Painuman ennustaminen painumahavaintojen perusteella. Tiehallinto. Helsinki 2001. TIEH 3200695.

Mroueh, U-M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K., Mäkelä, E., Juvankoski, M., Ruotoistenmäki, A. Life cycle assessment of road construction. Finnish National Road Administration. Helsinki 2000. TIEL 3200606E.

Tamminne, M. Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus. Tiehallinto. Helsinki 2002. TIEH 3200741.

Tiehallinto, Maastotietojen hankinta. Toimintaohjeet. Helsinki 2002.

Tiehallinto, Pohjarakentamisen kustannustietoja. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja. Helsinki 2002. TIEH 4000330.

Tiehallinto, Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki 2001. TIEH 2100002-01.

Tiehallinto, Tien jatkuvan painumaprofiilin laskenta pikselimallilla. Menetelmäkuvaus TPPT 19. Espoo 2001.

Tiehallinto, Tiesuunnitelman kustannusarvioon ja vaihtoehtovertailuun sopivia yksikköhintoja. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja. Helsinki 2002. TIEH 4000305.

Tielaitos, Geotekniset laskelmat. Helsinki 1996. TIEL 2180002.

Tielaitos, Painumalaskentamenetelmien käyttökelpoisuuden arviointi. Helsinki 2000. TIEL 3200630.

Tielaitos, Teiden pehmeikkötutkimukset. Helsinki 1998. TIEL 3200520.

Tielaitos, Tieleikkausten pohjatutkimukset. Helsinki 1995. TIEL 3200354.

Tielaitos, Tiesuunnitelman pohjatutkimukset. Helsinki 1998. TIEL 2180003.

## 6 LIITTEET

- Liite 1 Pohjarakennusmenetelmien elinkaariedullisuuteen vaikuttavia tekijöitä
- Liite 2 Esimerkki pohjarakennusmenetelmän valinnasta
- Liite 3 Penkereen luokittaminen urakan hankintaa varten odotettavissa olevan painumatasaisuuden mukaan
- Liite 4 Pisteytysmalli

# POHJARAKENNUSMENETELMIEN ELINKAARIEDULLISUUTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Liittyy lukuun 3. Tarkoitus esittää hyvin yksinkertaistettu yhteenvedo menetelmän ominaisuuksista.

Pohjarakennusmenetelmä	Rakentamis- kustannukset	Rakentamisen onnistuminen	Tyypillisiä mahdollisia ympäristö- vaikutuksia	Tyypillisiä ympäristö- kuormituksia	Työturvallisuuden kannalta kriittistä	Pitkäaikaiskestävyys	Korjattavuus
------------------------	-----------------------------	------------------------------	---	---	--	----------------------	--------------

<b>Paalulaattarakenteet</b>	Yleensä suuret. Melko jyrkkä riippuvuus sekä pengerkorkeudesta että paalupituudesta	Yleensä onnistuu. Suopehmeiköt hankalimpia	Tärinä, häiriintyminen	paalujen valmistus	paalujen/koneiden kaatuminen	Yleensä hyvä. Jos vaurioituu, sortumavaara usein suuri	Harvoin tarpeen korjata
<b>Paaluhatturakenteet</b>	Yleensä suuret. Jyrkkä riippuvuus paalupituudesta	Nykyohjeiden mukaan ei käytetä suopehmeiköillä tms. joilla aikaisemmin epäonnistumisia	Tärinä, häiriintyminen	paalujen valmistus	paalujen/koneiden kaatuminen	Yleensä hyvä. Jos vaurioituu, sortumavaara usein suuri	Harvoin korjattavissa muuten kuin paalulaattarakenteella
<b>Massanvaihto kaivamalla</b>	Yleensä pienehköt. Jyrkkä riippuvuus pehmeikkösyvyydestä, ei pengerkorkeudesta	Syvyyden kasvaessa tulee vaativammaksi	Kaivuluiskan vakavuus	massojen kuljetus	luiskien työnaikainen vakavuus	Hyvä	Pienet jälkipainumat helposti korjattavissa
<b>Pohjaantäyttö</b>	Yleensä suuret. Jyrkkä riippuvuus pehmeikkösyvyydestä, ei pengerkorkeudesta.	Vaatii taitoa	Massojen sivusiirtymät	massojen kuljetus	täytön työaikainen vakavuus oltava alle 1, jolloin täytön liikkeitä äkillisiäkin	Hyvä, jos työ on onnistunut	Pienet jälkipainumat helposti korjattavissa, isommat joskus hyvinkin hankalia
<b>Syvästabilointi</b>	Jyrkkä riippuvuus sekä pehmeikkösyvyydestä että pengerkorkeudesta	Yleensä onnistuu. Työn tasa-laatuudessa ja laadunvalvonnassa kehittämisen varaa.		sideaineen valmistus	sideaineen pölyäminen	Todennäköisesti hyvä.	Ei juuri tarvittu korjata
<b>Pystyjoitus</b>	Yleensä huokeat	Vaatii kuormitusaikaa. Liian hätäisesti kuormitettuja ikäviä kokemuksia.		ojanauhojen valmistus		Herkkä lisäkuormituksille (lisäpäälystys, pohjaveden aleneminen)	Erittäin vaikeasti korjattava
<b>Pengerkevennys</b>	Jyrkkä riippuvuus pengerkorkeudesta ja pehmeiden kerrosten ominaisuuksista	Siittimaalla mahdollista tarkkailumittauksin varmistaa mitoituksen oikeellisuus		kevennysmateriaalin valmistus ja usein pitkät kuljetusmatkat	kaivantojen työturvallisuus	Herkkä mitoitustuloksille ja esim. pohjaveden alenemalle	Usein hankala korjattava

## ESIMERKKI POHJARAKENNUSMENETELMÄN VALINNASTA

Liittyy lukuun 3 dokumentoituna käytännön esimerkkinä.

Kantatie 60 (nykyinen 46) välillä Heparo-Voikkaa, ramppi E1/R2  
Tie- ja rakennussuunnittelu 1985-88, rakentaminen 1990.

Olosuhteet:

- \* Pengerkorkeus 1...6 m
- \* Pinnassa 2...4 m turvetta
- \* Turpeen alla 3...6 m savea (su = 10...25 kPa, viimeksimainittu arvo tyypillisempi, pinnassa lujempi kerros)
- \* Saven alla 1...4 m hiekkaa tai moreenia
- \* Korkean penkereen alueelle oli suunniteltu alikulkukäytävä (6 m aukko)

Korkean (yli n. 4 m) penkereen osuuksilla ratkaisu muotoutui seuraavasti:

- \* Riittävä vakavuus voitiin saavuttaa vain pengerpaalutuksella (paalupituus keskimäärin 11 m) tai pohjaantäytöllä (syvyys keskimäärin 7 m)
- \* Koska kyseessä oli suopehmeikkö, hylättiin paaluhatut ja katsottiin välttämättömäksi käyttää mahdollisen pengerpaalutuksen yhteydessä yhtenäistä paalulaattaa.
- \* Pohjaantäytössä katsottiin tarpeelliseksi käyttää täyttömateriaalina louhetta.
- \* Pohjaantäytön yhteydessä alikulkukäytävä tehtäisiin rengaskehänä, joka perustettaisiin yhtenäiselle laatalle. Pengerpaalutuksen yhteydessä myös ulokelaattasilta tulisi kysymykseen.
- \* Pohjaantäyttöön päädyttiin, koska se oli halvempi (pohjaantäyttö 1,0 milj. mk, pengerpaalutus 1,3 milj. mk, lisäksi pohjaantäytön yhteydessä käytettävä siltatyyppi n. 0,3 milj. mk halvempi)

Matalamman penkereen osuuksilla ratkaisu muotoutui seuraavasti:

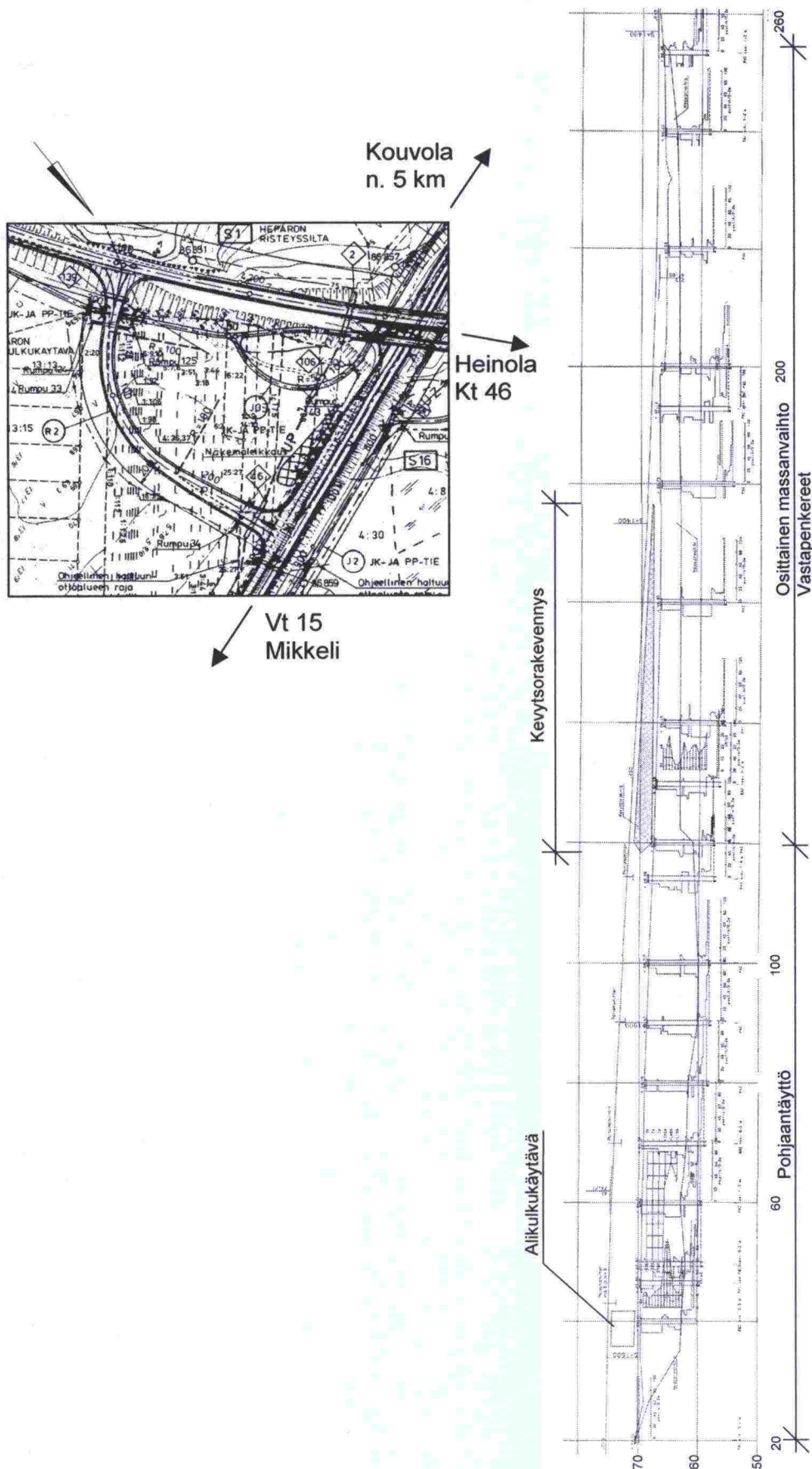
- \* Pengerpaalutus yhtenäistä laattaa käyttäen onnistuisi, mutta tavoitteeksi asetettiin löytää kustannuksiltaan edullisempi menetelmä
- \* Turpeen varaan ei pystytty rakentamaan, koska vakavuuskin oli riittämätön, painumista puhumattakaan
- \* Turpeen vahvistamiseen ei ollut menetelmää
- \* Saven syvästabilointi ei suuren pengerkuorman takia ollut taloudellisesti kilpailukykyinen, saven melko hyvän luonnontilaisen lujuuden takia menetelmällä saavutettava hyöty olisi ollut tavallista vähäisempi ja menetelmään olisi liittynyt teknisiä erityispiirteitä ja hankaluuksia (hiekan läpäisy, laadunvalvonnan vaikeus jne.)

- \* Savikerroksen painumat olisivat kohtuulliset (200...500 mm) ja niistä ehtisi melko suuri osa tapahtua ensimmäisen 2,5 vuoden aikana ennen lopullista liikenteelle avaamista ja paksuhko penger- ja massanvaihtotäyttö tasoittaisi mahdollisia rampin pituussuuntaisia epätasaisuuksia
- \* Edellä mainituista näkökohdista seurasi, että turpeen osalla tehtäisiin massanvaihto hiekalla varoen savikerroksen häiriintymistä. Vakavuutta piti vielä parantaa lisätoimenpitein.
- \* Vakavuuden parantamiseen voitaisiin käyttää vastapenkereitä, kevytsorakevennystä sekä lujitteita. Vastapenkereitä käytettäisiin mahdollisimman paljon, koska ne olivat halvin menetelmä. Kevytsoran ja lujitteiden tarve pyrittäisiin suunnittelussa minimoimaan
- \* Vastapenkereiden alta todettiin tarpeelliseksi kaivaa turve pois, jotta niiden toimivuus saatiin varmistetuksi
- \* Pohjaantäyttöosuuden pituutta kasvatettiin jonkin verran, koska vastapenkereiden alle laajennettu massanvaihto kavensi kustannuseroa pohjaantäyttöön nähden. Tällöin lujitteet jäivät tarpeettomiksi
- \* Ratkaisuksi tuli osittainen massanvaihto, vastapenkereet ja osittainen massanvaihto vastapenkereiden alla koko osuudella sekä lisäksi kevytsorakevennys siellä, missä pengerkorkeus ylitti 2 m

Muita suunnittelutyön aikana esille tulleita näkökohtia:

- \* Rakentaminen alkaisi tästä rampista ja sitä käytettäisiin kiertotienä eritasoliittymän muun osan rakentamisen ajan
- \* Louhemassoja ei ehdittäisi saada tielinjalta, mutta ne saataisiin kuitenkin suhteellisen edullisesti läheiseltä toiselta työmaalta
- \* Kevytsoran kuljetusmatka Kuusankosken tehtaalta oli hyvin lyhyt
- \* Vastapenger ramppisilmukan puolelle oli ilmainen ja toisellekin puolelle se järjestyi helposti
- \* Yleensä oli melko hyviä kokemuksia vastaavanlaisista osittaisista massanvaihtoista, joissa turve kaivetaan pois ja hiekkätäyttö tehdään varovasti saven varaan
- \* Siirtymä pohjaantäytöltä osittaiselle massanvaihdolle oli jonkin verran arveluttava, mutta jos pohjaantäytön tilalla olisi ollut paalulaatta, painumaero olisi ollut vielä vaikeammin vältettävissä
- \* Tämän rampin osalta rakentaminen tapahtui tiepiirin omana työnä

Rakentaminen onnistui ilman suuria vaikeuksia. Edelleen 2002 ratkaisu on selvästi onnistunut. Rampissa ei ole koko aikana havaittu liikenteelle haitallisia tai edes silmin erottuvia painumaepätasaisuuksia.



Kuva

Kantatie 60 (nykyinen 46) välillä Heparo-Voikkaa, rampin E1/R2 kartta ja pituusleikkaus.

## **PENKEREEN LUOKITTAMINEN URAKAN HANKINTAA VARTEN ODOTETTAVISSA OLEVAN PAINUMATASAISUUDEN MUKAAN**, liittyy lukuun 4

Penkereen painumatasaisuuden luokituksella pyritään urakan hankinnassa yhdenvertaistamaan painumatasaisuudeltaan erilaiset pohjanvahvistusmenetelmät rakennuskustannusten ja tilaajan ylläpitokustannusten (painumien tasoittamiskustannusten) suhteen. Painumatasaisuudeltaan hyvä penger tuottaa urakoitsijalle korotusta maksettavaan urakkasummaan, koska painumantasauskustannuksia ei synny tien käyttöaika tai niitä syntyy hyvin vähän. Tie, jolle käyttöaikana syntyy painumia, on ylläpitokustannuksiltaan kalliimpi, joten rakentamisessa säästyneet kustannukset varataan tilaajalle tien painumien tasoittamiseen käytettäväksi. Lähtökohtana menettelyssä on, että urakoitsija voi valita pohjanvahvistusmenetelmän/perustamistavan laatimensa kustannuslaskelmien ja painumakehitysarvioiden perusteella. Tämä menettely soveltuu parhaiten urakoihin, joihin sisältyy suunnittelua (esim SR-urakka) ja joiden takuu-aika on lyhyt (esim 5 vuotta).

Pohjanvahvistusmenetelmät/pohjarakenteet on sijoitettu luokkiin teoreettisen painumatodennäköisyyden, penkereen pohjasuhteiden sekä yleisesti menetelmien käyttökelpoisuudesta saatujen kokemusten perusteella.

### **Luokituksen käyttö urakassa**

Luokitusta käytetään urakoiden arvioinnissa. Tiesuunnitelmassa, joka sisältyy tarjouspyyntöasiakirjoihin, esitetään jokaiselle pehmeikölle pohjanvahvistustapa (pohjarakenne) ja tämän perusteella määritellään kullekin penkereelle painumatasaisuuden luokka. Urakoitsija voi kuitenkin valita pohjanvahvistusmenetelmän/pohjarakenteen vapaasti. Jos urakoitsija tekee eriluokkaisen pohjanvahvistuksen kuin tiesuunnitelmassa on esitetty, muutetaan urakoitsijalle maksettavaa urakkasumma sen mukaan miten muutos vaikuttaa tien rakentamisen jälkeisiin ylläpitokustannuksiin. Jos urakoitsija korottaa tiesuunnitelman pohjanvahvistusluokan (esimerkiksi C:stä B:hen), korotetaan urakoitsijalle maksettavaa urakkasummaa. Jos urakoitsija alentaa luokkaa, vähennetään urakkasummaa. Korotusten ja vähennysten määrät kussakin yksittäisessä tapauksessa annetaan jo tarjouspyynnössä tiedoksi.

Urakkasumman korotukset/vähennykset liittyvät elinkaarikustannusten ta-  
saamiseen. Urakoitsijalle mahdollisesti koituvat arvonvähennykset lasketaan erikseen ja niissä noudatetaan jo käytössä olevia periaatteita. Urakoitsija joutuu maksamaan arvonvähennyistä tai korjaamaan rakenteen seuraavissa tapauksissa. Perusteet määritellään tarjouspyyntöasiakirjoissa.

- kun luokan A mukaan rakennetussa penkereessä tapahtuu painumaa (käytännön raja-arvo voitaneen asettaa 20 –30 mm:ksi)
- kun luokan B mukaan rakennetussa penkereessä tapahtuva painuma on yli 100 mm tai painuma jatkuu 5 vuoden jälkeen
- kun luokan C mukaan rakennetussa penkereessä tapahtuva painuma on suurempi kuin ohjeessa Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet tai tarjouspyyntöasiakirjoissa on sanottu
- riippumatta painumasta aina kun rakenne (esim paalulaatta) on virheellisesti tehty, taikka rakenne vahingoittuu penkereen painumisen johdosta riippumatta siitä, kuinka pieni tämä painuma on.

Taulukko

Pengerluokka	Penger/Penkereen pohjavahvistus/pohjarakenne
<p><b>Pengerluokka A "painumaton"</b> Tasaisuus käyttöaikana on erinomainen ja riski ratkaisun onnistumisen suhteen on pieni. Rakennusaikana penger saa painua vähän.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• paalulaatta (tuki- tai kitkapaalut materiaalina teräsbetoni tai teräs, ei puu)</li> <li>• massanvaihto kaivaen (syvyys enintään 5 m)</li> <li>• maanvarainen karkearakeiselle pohjamaalle</li> </ul>
<p><b>Pengerluokka B "vähän painuva"</b> Tasaisuus käyttöaikana on hyvä. Vähäistä painumista (alle 100 mm) saa esiintyä käyttöajan alussa (alle 5 v). Ratkaisun onnistumisluotettavuus on suhteellisen hyvä.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• paaluhatturakenne</li> <li>• massanvaihto kaivaen (syvyys &gt; 5 metriä)</li> <li>• massanvaihto pohjaan täyttäen</li> <li>• syvästabilointi painumattomaan kerrokseen ulottuvia, kimmoisia pilareita käyttäen</li> <li>• massasyvästabilointi (syvyys enintään 5 metriä, ei turve eikä lieju)</li> <li>• syvästabilointi, myötäävät pilarit</li> <li>• muut pohjavahvistetut (esim pystyojitettu, lujitteilla vahvistettu, kevennetty, esikuormitettu, määrämittaisilla pilareilla syvästabiloitu) penkereet siiltipehmeiköllä tai savipehmeiköllä, jonka saven leikkauslujuus on vähintään 50 kPa tai jonka savikerroksen paksuus on enintään 3 m.</li> </ul>
<p><b>Pengerluokka C "painuva"</b> Tasaisuus käyttöaikana on tyydyttävä ja täyttää ne vaatimukset, jotka Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperuste-ohjeessa on asetettu. Geoteknisten painumalaskelmien luotettavuus on yleensä vain välttävä hyvälläkin suunnittelulla</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• muut kuin kohdassa A tai B mainitut pohjavahvistetut (esim pystyojitettu, lujitteilla vahvistettu, kevennetty, esikuormitettu, määrämittaisilla pilareilla syvästabiloitu) penkereet savipehmeiköllä, jonka saven leikkauslujuus on enintään 50 kPa tai jonka savikerroksen paksuus on vähintään 3 m.</li> </ul>



**PISTEYTYSMALLI**, liittyy lukuun 4**ERILAISTEN VAIHTOEHTOISTEN RATKAISUJEN PISTEYTYSMALLI, KUN VERTAILLAAN ERILAISILLA RATKAISUILLA SAAVUTETTAVAN LAATUTASON VARMUUTTA****Eri menetelmien pisteytyksen ohjealue:**

(tällöin alaraja = sellainen ratkaisu, jonka ei voi varmasti todeta olevan tuotevaatimusten vastainen)

Esim. paaluhatturakenne suopehmeiköllä ei ole 8 pisteen arvoinen, vaan hylättävä

Paalulaattarakenne	9	10
Paaluhatturakenne	8	9
Syvästabilointi, kimmoiset pilarit	8	9.5
Syvästabilointi, myötäävät pilarit	7.5	9
Syvästabilointi, määrämittaiset pilarit	6	9
Pystyjoitus	5	8
Pengerkevennys	5	9.5
Massanvaihto kaivamalla	8	10
Pohjaantäyttö	6	9

**Vaihteluväliä käytetään ottaen huomioon:**

- \* Pohjatutkimusten laatu tapauksen vaatimuksiin nähden
- \* Pehmeikkösyvyys
- \* Kuivakuorikerroksen paksuus
- \* Rakentamisaika ja mahdollisuus esikuormitukseen
- \* Mahdollisuus ylipenkereen käyttöön
- \* Mahdollisuus työnaikaisiin tarkkailumittauksiin
- \* Herkkyys pohjaveden alenemiselle

ISBN 951-803-060-7  
TIEH 2100019-03