

F. POHJARAKENNUS: Pohjanvahvistusmenetelmät

1 Tavoitteet ja periaatteet

Pohjanvahvistuksella (Ground Improvement) tarkoitetaan maan geoteknisten ominaisuuksien parantamista. Sillä pyritään mm. seuraaviin päämääriin:

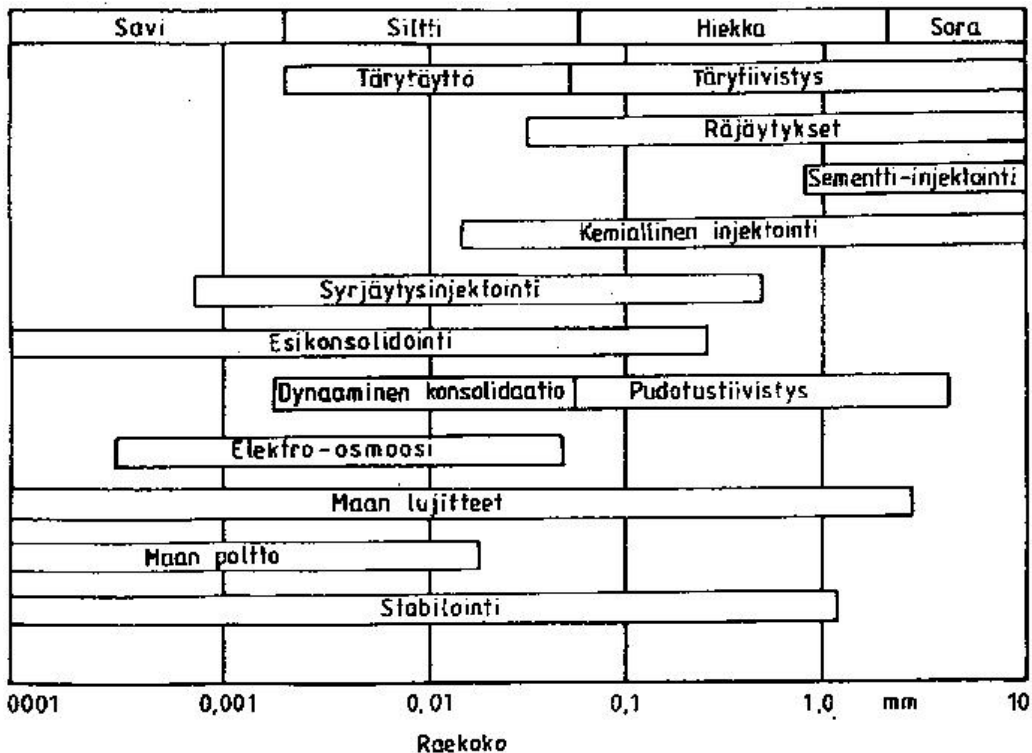
- ❑ *painumien* pienentäminen
- ❑ *maanpaineen* pienentäminen
- ❑ *kantokyvyn* lisääminen
- ❑ *stabiliteetin* parantaminen
- ❑ *vedenläpäisevyyden* pienentäminen
- ❑ *dynaamisen vaimennuksen* lisääminen
- ❑ dynaamisen kuormituksen aiheuttaman maan *nesteytymisvaaran* pienentämiseen.

Nesteytyminen = liquefaction ilmenee irtonaisessa ja karkeassa maaperässä esim. maanjäristyksen aikana, kun huokospaine kasvaa niin suureksi, että se ylittää selvästi vallitsevan jännityksen. Maa muuttuu raskaaksi nesteeksi, kun vesi ei pääse tarpeeksi nopeasti poistumaan, lopulta se menettää kokonaan lujuutensa ja muuttuu nestemäiseksi. Katso esimerkki Youtubesta: <http://www.youtube.com/watch?v=1KqlAMWMjOE>

Usein käytetään rinnakkain useita pohjanvahvistusmenetelmiä, jotta voidaan varmistua riittävän hyvästä lopputuloksesta. Pohjanvahvistusmenetelmiä on olemassa runsas kirjo. Suomessa käytetään vain osaa menetelmistä. Menetelmät voidaan ryhmitellä esimerkiksi taulukon 1 mukaisesti. Kuvassa 1 on esitetty eri menetelmien ohjeelliset soveltuvuusalueet suhteessa raekokoon. Tällä kurssilla käydään läpi näistä tärkeimmät.

Taulukko 1. Pohjanvahvistusmenetelmien luokittelu.

Pohjanvahvistustapa	Koheesiomaa	Kitkamaa
Tiivistys	Yli- ja esikuormitus pystyjoituksella tai ilman	Dynaaminen syvätiivistys, täryhuuhtelu, tiivistyspaalutus
Vahvistaminen sideainneen avulla	Syvästabilointi, kemiallinen tai termien	Huokosten täyttäminen injektioimalla
Maan tai rakenteen lujittaminen ilman sideainetta	Sora- ja murskepillarit, juuripaalut, lujitteet, sähköosmoosit, ionidiffuusio	Lujitemaa, lujitteet, maan naulaus, juuripaalut

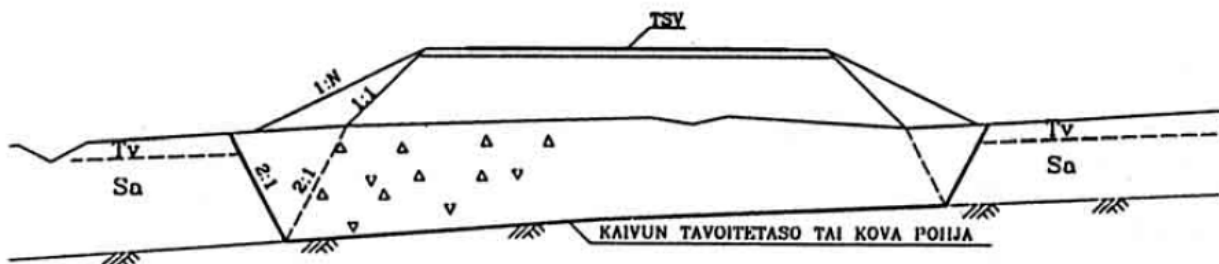


Kuva 1. Pohjanvahvistusmenetelmien ohjeelliset soveltuvuusalueet.

2 Massanvaihto

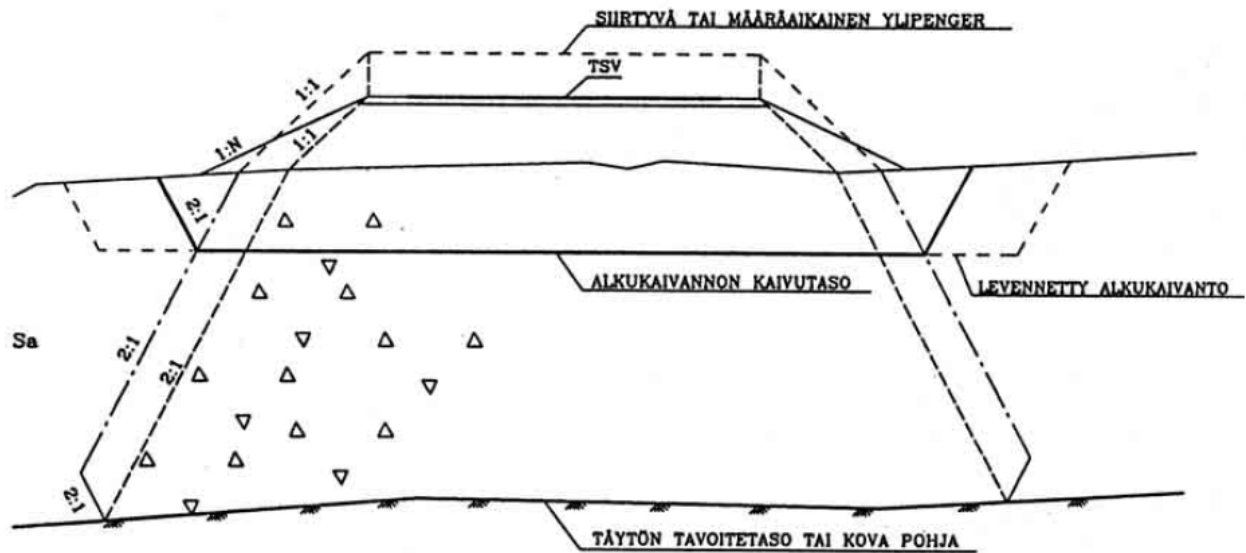
Massanvaihto voidaan tehdä joko kaivamalla tai pengertämällä. Massanvaihto kaivamalla (MVK) lienee yleisin pohjanvahvistusmenetelmä Suomessa. Aina sitä ei luokitella pohjanvahvistustavaksi, koska siinä heikkolaatuinen pohjamaa poistetaan ja vaihdetaan parempaan. Massanvaihto vaatii kuitenkin paljon massoja ja läjitysalueita. Massanvaihdon kustannukset riippuvat kohteesta, massojen läjitys- tai kuljetusmatkoista ja paikoista. Massanvaihtotyön suorituksesta on ilmestynyt Liikenneviraston ohje (2011).

Massanvaihto kaivamalla (kuva 2) soveltuu hyvin tehtynä ja toteutettuna lähes minkä tahaansa rakenteen yhteyteen. Erityisen hyvin se soveltuu siirtymärakenteeksi esimerkiksi tieleikkauksesta paalutettavalle pehmeikölle osuudelle, jossa pehmeikkö on vielä matala (max. 4...5 metriä). Pehmeikön syventyessä massamäärät kasvavat kuitenkin nopeasti. Kaivu voidaan toteuttaa myös vedenalaisena kaivuna, jolloin tuentatarve pienenee. Tällöin kuitenkin laadun luotettavuus heikenee. Täytöt voidaan tehdä kerroksittain tai pengertäen, täyttö on tarpeen tiivistää sopivalla menetelmällä. Esikuormituksella voidaan rajoittaa jälkipainumia.



Kuva 2. Massanvaihto kaivamalla.

Massanvaihto pengertämällä (kuva 3) on selvästi harvinaisempi tapa, koska sen suoritukseen liittyy merkittäviä riskejä (epätasainen painuma jne.). Se soveltuu vain kohteisiin, joissa kaivusvyvyys on niin suuri, ettei kaivaminen onnistu tai on kohtuuttoman kallista. Menetelmän jälkipainumien riski on suuri. Menetelmän onnistumista voidaan parantaa esim. räjäytyksillä. (Liikennevirasto 2011).



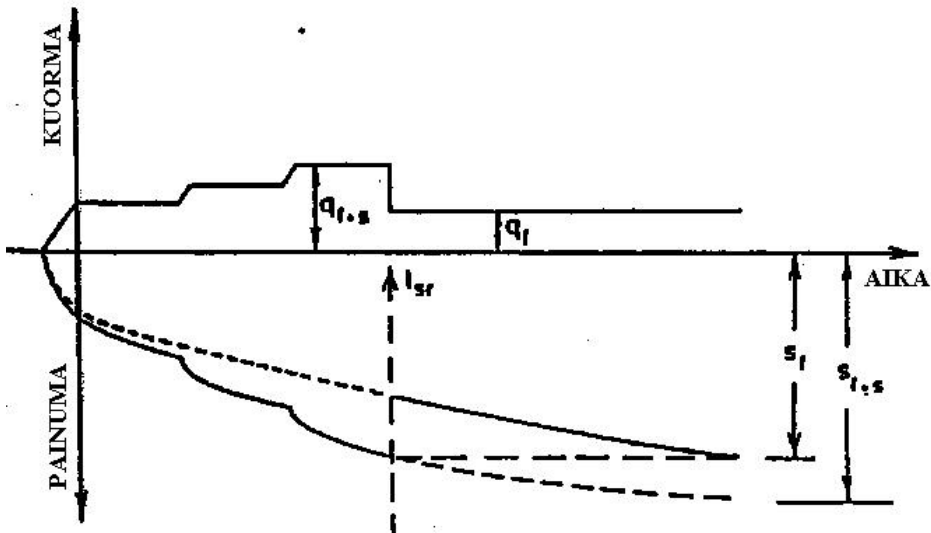
Kuva 3. Massanvaihto pengertämällä.

3 Esikuormitus / ylikuormitus (preloading)

Esikuormitusta käytetään harvoin yksinään, eli liittyy useimmin muihin menetelmiin täydentäen niitä. Voidaan käyttää yksinään silloin, jos halutaan tiivistää esim. ohuehkoja kitkamaakerroksia tai matalia, kerroksellisia savi- silttipohjia.

Tavallisimmat sovelluskohteet ovat laaja-alaiset penkereet, padot, kentät, aluerakentaminen jne. Eriyksen hyvä menetelmä on esirakennuskohteissa yhdessä muiden menetelmien kanssa. Ylikuormituksella tarkoitetaan sellaista tapausta, jossa käytettävä kuormitus on suurempi kuin suunniteltu lopullinen kuormitus. Esikuormitus on käyttökelpoinen menetelmä ja sillä on paljon sovelluskohteita varsinkin, jos suunnittelijalla on käytävissä riittävästi pohjatutkimustietoja. Toimii usein myös epätasaisten painumien tasaajana. Käytön esteenä yleensä on, että esikuormitus vaatii aikaa ja riittävästi maamassoja.

Esikuormituksen periaatteena on siis, että esikuormituksen q_{f+s} aiheuttama konsolidaatiopainuma s_f tapahtuu ennen varsinaisen rakentamisen kuormitusta q_f (kts. Kuva 4). Jäljelle jäävä painuma on s_{f+s} .



Kuva 4. Esikuormitetun penkereen kuorma ja painuma.

4 Pinnalta tehtävät (syvä)tiivistysmenetelmät

Pinnalta tehtävät syvätiivistysmenetelmät soveltuvat kitkamateriaaleille (ei koheesiota), erityisesti paksuille täytöille. Syvyysvaikutus menetelmästä riippuen vaihtelee välillä 0...6 m. Menetelmiä ovat erilaiset vedettävät täryjyrät ja iskukalusto, esimerkiksi Rapid Impact Compaction, High Energy Impact Compaction, Polygonal Drum. Eräitä näistä menetelmistä ollaan juuri tuomassa Suomeen. Laajimmat käyttökokemukset ovat esim. Dubaista.

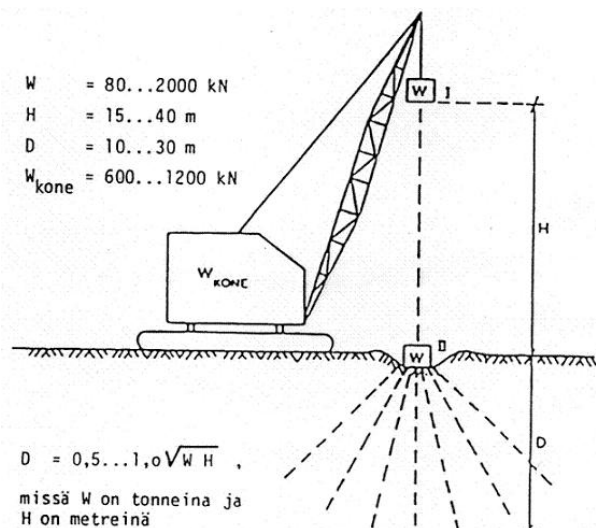
Pintatiivistysmenetelmiä (syvyysvaikutus < 1 m) ei käsitellä tällä kurssilla.

5 Pudotustiivistys (heavy tamping)

Pudotustiivistyksessä raskasta järkälettä pudotetaan vapaasti nostokoneen avulla noin 2...5 kt/piste \Rightarrow iskuaalto etenee syvälle aiheuttaen tiivistymistä (kitkamaa) tai huokospaineen nousua (koheesiomaa). Kitkamaissa tapahtuvaa tiivistymistä kutsutaan iskutiivistymiseksi (dynamic tamping). Koheesiomaissa tapahtuvaa tiivistymistä puolestaan kutsutaan dynaamiseksi konsolidaatioksi (dynamic consolidation).

Menetelmän mitoitus tehdään käyttäen yksinkertaista kaavaa, jossa on mukana järkäleen paino ja pudotuskorkeus. (kts. kuva 5).

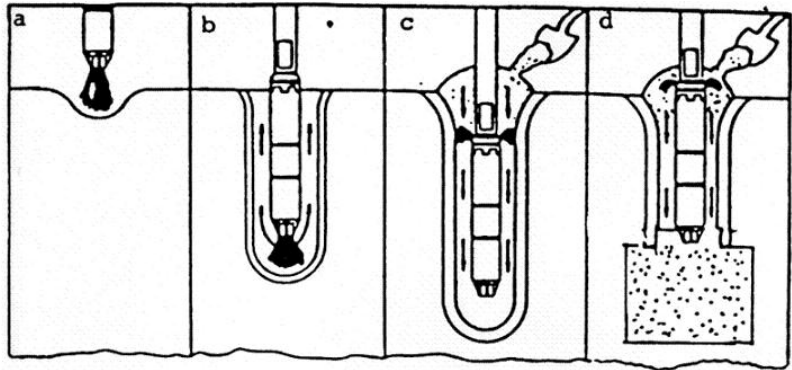
Menetelmän syvyysvaikutus 5...30 m riippuen tiivistysenergiasta Menetelmä on suhteellisen yleinen Suomessa, esimerkiksi Vuosaaren satama, Jätkäsaari.



Kuva 5. Pudotustiivistyslaitteisto ja mitoitus.

6 Täryhuuhtelu (Vibro flotation)

Täryhuuhtelu (vibro flotation) tehdään suurella sauvamaisella täryttimellä, jossa on vesisuihku. Tärytin aiheuttaa nesteytymisen \Rightarrow rakeiden uudelleen järjestyminen tiiviimpään tilaan. Täryttimen ympärille muodostuvaan suppiloon lisätään kitkamaata. Menetelmä soveltuu pääasiassa hiekoille.



Kuva 6. Täryhuuhtelumenetelmä.

Erityinen sovellus: **tärytätty** (myös silteille). Jos suppilo täytetään soralla tai murskeella saadaan *sorapilareita tai murskepilareita* (stone columns). Aiheesta lisää kohdassa 15.

7 Muita tiivistysmenetelmiä

Tiivistyspaalutus perustuu paalun syrjäyttämän maan tiivistävään vaikutukseen. Paalut eivät kannu kuormaa, ne vain tiivistävät maapohjan. Paalutus tehdään vaiheittain, ensin harva verkko, sitten lyödään paalu väliin. Paalumateriaalit ovat: puu, TB, ja Franki-paalut. Menetelmän käyttö on vähentynyt Suomessa.

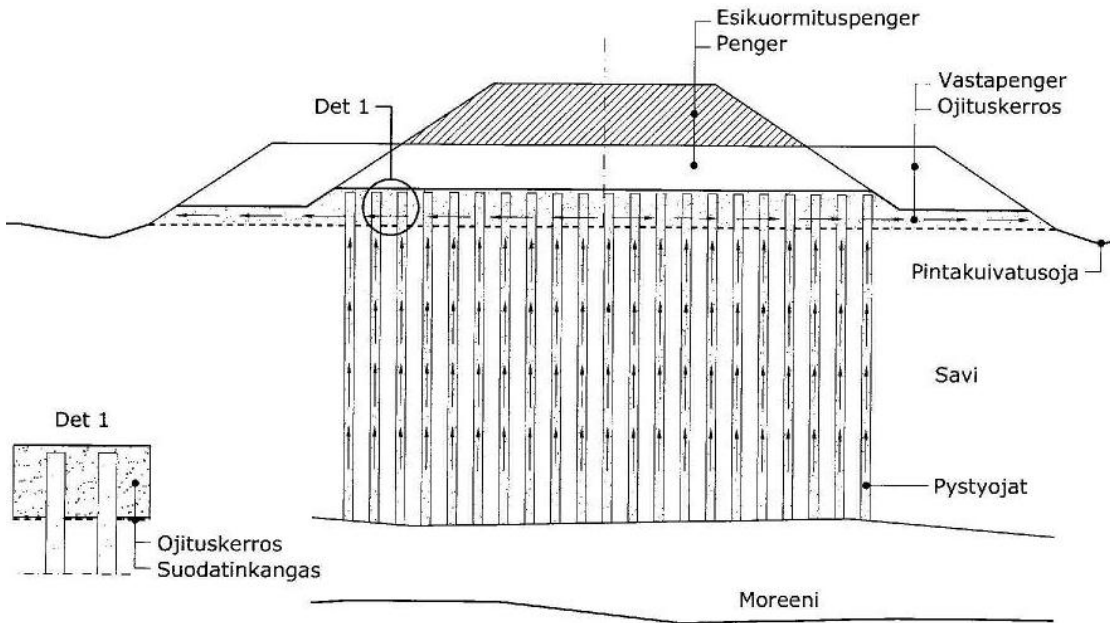
Vibro-wing tai vibro-rod ovat erikoistapauksia tärytiivistysmenetelmistä. Menetelmässä siivellinen varsi työnnetään maahan ja sitä kierretään yhtä aikaa (vrt. syvästabilointi). Menetelmä soveltuu kitkamaille. Menetelmää ei juurikaan (tai ollenkaan?) käytetty Suomessa.

Räjäyttämisen: menetelmässä räjäytetään maahan upotettuja räjähteitä jolloin kitkamaa tiivistyy (vrt. massanvaihto kaivamalla). Voidaan käyttää myös vedessä, ympäristövaikutukset ovat kuitenkin kysymysmerkki. Menetelmää käytetty Suomessa vain massanvaihtojen yhteydessä.

8 Pystyjoitus (vertical draining)

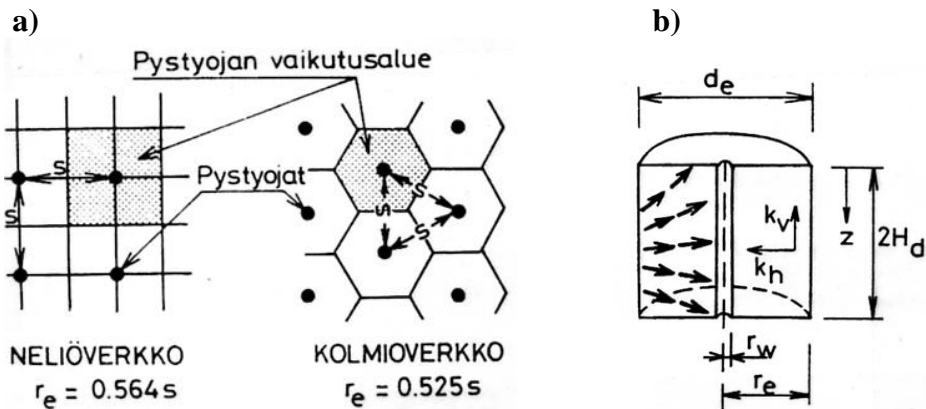
Pystyjoituksella nopeutetaan konsolidaatota lyhentämällä veden virtausmatkaa. Aluksi käytettiin hiekkapystyjoita (vrt. VT1 Espoon keskus) 1970 –luvulle asti. Nykyään käytetään helposti asennettavat liuskapystyjoita (kuva 9). Menetelmään kuuluu aina mukaan ylikuormitus. Pystyjoitus soveltuu koheesiomaalajeille, erityisen hyvin siltisille maille. Voidaan käyttää myös savikoille, mutta silloin painuma-aika kasvaa merkittävästi (tai pystyjojaväliä tihennetään tai ylikuormitusta nostetaan). Soveltuu hyvin esirakentamiskohteisiin, isoille kentille, patoihin, jne. Staattisella asennusmenetelmällä päästään jopa 30 metrin syvyyteen ja dynaamisella 55 m syvyyksiin. Voidaan tehdä myös veden alle. Realistinen painuma-aika on yleensä 6 kk- 2 v. Kuvassa 7 on esitetty menetelmän toimintaperiaate.

Käyttö tällä hetkellä Suomessa melko vähäistä. Kansainvälisesti yleisesti käytetty ekologinen menetelmä, joka on melko edullinen. Jonkunmoinen riski jälkipainumien osalta.

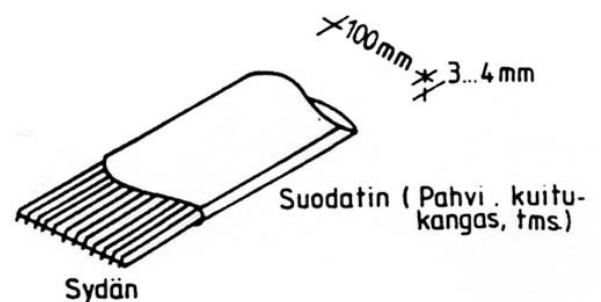


Kuva 7. Pystyjituksen toimintaperiaate.

Pystyjituksen mitoitus perustuu radiaalisen virtauksen analyttiseen ratkaisuun (mm. Barron ja ja Kjellman) yksisuuntaisessa muodonmuutostilassa (pystysuuntaan). Kuvassa 8 on esitetty pystyji- en sijoitteluperiaatteet sekä vaikutusalue. Analyttisestä ratkaisusta on esitetty paljon toimittaja- kohtaisia mitoitusnomogrammeja, nykyään myös mitoitusohjelmia. Mitoituksessa otetaan yleensä huomioon myös pystyjojan asennuksesta aiheutuva radiaalinen häiriintyminen (smear). Toiminnan kannalta on oleellista, että maanpinnalla on tehokas kuivatuskerros, josta ylösnouseva vesi johda- taan pois. Pystyjojen asennus tapahtuu käyttämällä suojaputkea. Asennus tapahtuu kuivatuskerrok- sen läpi. Asennettavat liuskapystyjojat ankkuroidaan pehmeän kerroksen pohjaan erityisellä ankkurointilevyllä.



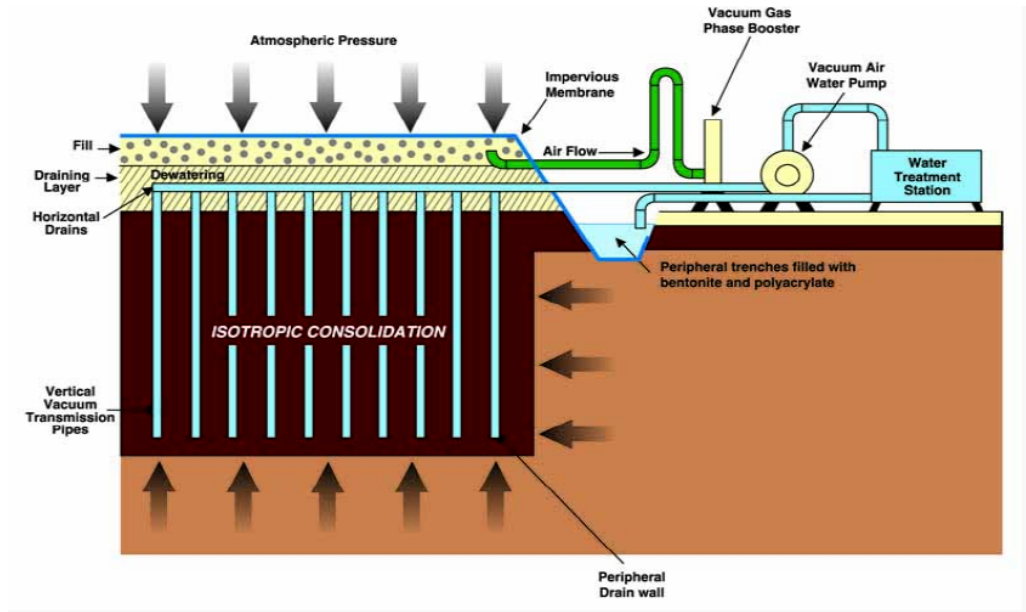
Kuva 8. a) Pystyjojen sijoittelu ja pystyjojan vaikutus- alueen ekvivalentti säde. b) Pystyleikkaus sylinterimäi- sestä vaikutusalueesta.



Kuva 9. Kappale liuskapystyjojaa.

9 Vakuumikonsolidaatio (vacuum consolidation)

Pystyjoituksesta kehitetty tehokkaampi menetelmä, jossa pystyjojat asennetaan kuten perinteisessä menetelmässä, muttei uloteta ihan kovaan pohjaan asti. Maanpinnalle tehdään kuivatuskerros, kuten pystyjoituksessa, mutta siitä tehdään ilmatiivis esim. päälleasennettavilla muovikalvoilla. Kuivatuskerroksesta aletaan imeä vettä / ilmaa vakuumilla, jolloin vakuumi siirtyy pystyjoja pitkin maahan (kuva 10).

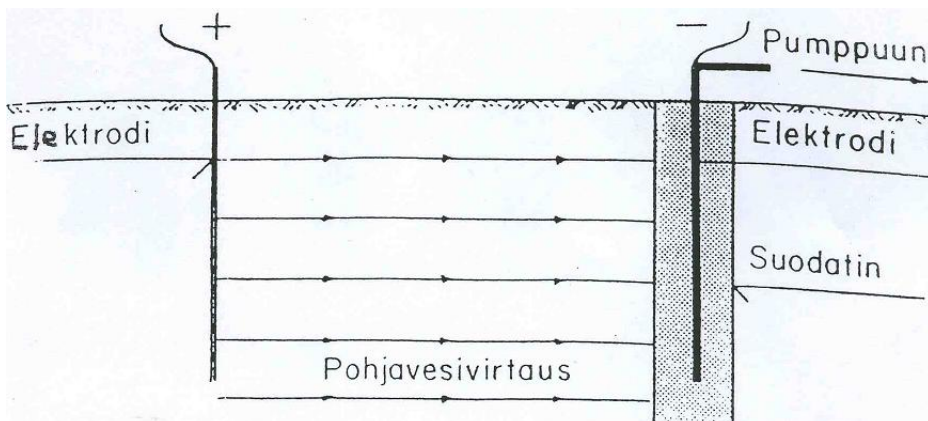


Kuva 10. Vakuumpystyjoituksen periaate.

Menetelmän etuna on, ette tarvita läheskään yhtä suurta ylikuormitusta (massatarve), tialtarve pienenee, stabiliteetti paranee ja muutoinkin konsolidaatio nopeutuu. Tämä on tällä hetkellä yleinen menetelmä maailmalla, jota kehitetään jatkuvasti. Suomessa on ollut vain koerakentamista 1990-luvulla.

10 Sähköosmoosi

Menetelmän periaate: kun maahan johdetaan kahden elektrodin (anodi- ja katodi) välille sähkövirta, *positiivisesti varautuneet vesimolekyylit* kulkeutuvat kohti *katodia*, joka sijaitsee suodatinputki-kaivoissa, joista vesi pumpataan pois (kuva 11).



Kuva 11. Sähköosmoosin periaate.

Katodeina käytetään esim. n. 100 mm:n läpimittaisia alapäästään rei'itettyjä teräsputkia, jotka sijoitellaan 5...10 m:n välein 7...8 m:n syvyyteen. Anodeina käytetään esim. 20...30 mm paksuja terästankoja. Tasavirran jännite yleensä 70 V ja virran voimakkuus 10...30 A. Menetelmä soveltuu **saville** ja **siltteille**. Menetelmä on kallis ja harvinainen.

11. Syvästabilointi (deep stabilization, deep mixing)

Syvästabilointi voidaan tehdä joko:

- pilaristabilointina (column stabilization) tai
- Massastabilointina (mass stabilization)

Pilaristabilointia on kehitetty erityisesti Pohjoismaissa, erityisesti Ruotsissa. Pilaristabiloinnissa pehmeään maapohjaan sekoitetaan sideainetta pilarimaisiin rakenteisiin. Massastabiloinnissa koko pehmeään maakerrokseen sekoitetaan sideainetta. Maapohja reagoi kemiallisesti sideaineen kanssa muodostaen lujittunutta maata. Sideaineen toimivuus riippuu maaperästä. Liikennevirasto on julkaissut uuden Syvästabilointiohjeen (LiVi 2010).

Sekä pilari- että massastabilointi voidaan mitoittaa lähes painumattomaksi. Niitä ei voi kuitenkaan verrata esim. paalutukseen, eli niitä ei luokitella kantaviksi rakenteiksi vaan ne ovat vahvistettua maata.

Massastabilointi on kehitetty Suomessa 1990-luvulla. Suomessa tällä hetkellä käytettävät sideaineet ovat:

- Kalkki- sementti (erityisesti Tiehallinto, Espoo)
- Sementti ja sen yhdistelmät
- Kalkkia on käytetty ennen, ei enää juuri ollenkaan yksinään.

Syvästabilointia käytetään:

- Lisäämään maan kantavuutta esim. teiden, katujen ja putkijohtojen alla
- Pienentämään painumia
- Parantamaan stabiliteettia sekä penkereillä, kaivannoissa että luiskissa
- Pienentämään maanpainetta, jopa osana tukiseinää
- Estämään pohjannousua
- Parantamaan maarakennusominaisuuksia
- Stabiloimaan pilaantuneita maita
- Maatunneleiden katon stabiliteetin parantaminen.

Pilaristabilointi (column stabilization)

Pilarien halkaisijat vaihtelevat välillä 0,5...0,8 m (yleisimmin 0,6-0,7 m). Ne ulottuvat yleensä enintään 20 m syvyyteen, mutta ovat silloin harvoin taloudellisia. Menetelmässä stabilointikärki, jossa on sekoitusosa (kuva 13), työnnetään haluttuun syvyyteen. Kärkeä aletaan nostaa vakionopeudella ja kiertää. Samalla syötetään sideainetta. Suomessa käytetään lähes yksinomaan kuivamenetelmää, jossa sideaine syötetään ilman vettä. Pilarit sijoitetaan yleensä ruudukkoon, jossa k/k-väli määräytyy mitoituksen perusteella.

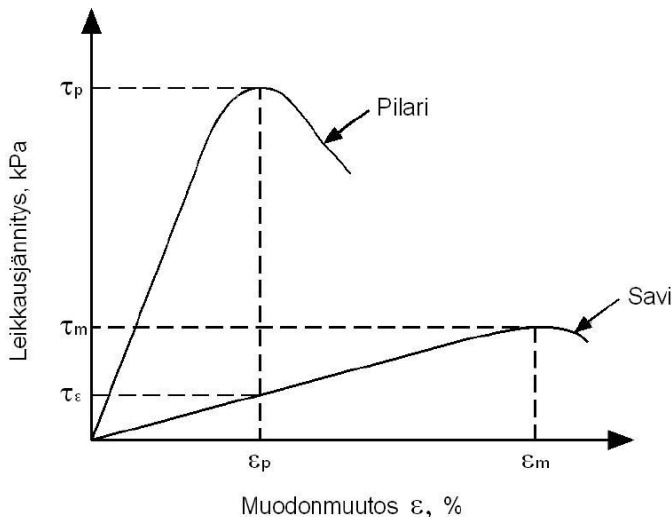
Pilaristabiloinnissa käytettävät sideaineet ovat LiVin uuden ohjeen (2010) mukaan:

- Kalkki-sementti, savet, myös liejupitoiset
- Kipsin, sammutetun kalkin ja sementin seokset, myös ljsa

Mitoitusperiaatteina voidaan käyttää seuraavia menetelmiä:

- Kimmoinen pilari (LiVin uusi ohje), jossa myötölujuutta ei ylitetä
- Myötävä pilari, toimii yhdessä maapohjan kanssa (Espoon kaupungin ohje, sallittu LiVin mukaan erikseen sovittaessa)
- NS. luja pilari, käyttö ei sallittu uusien ohjeiden mukaan.

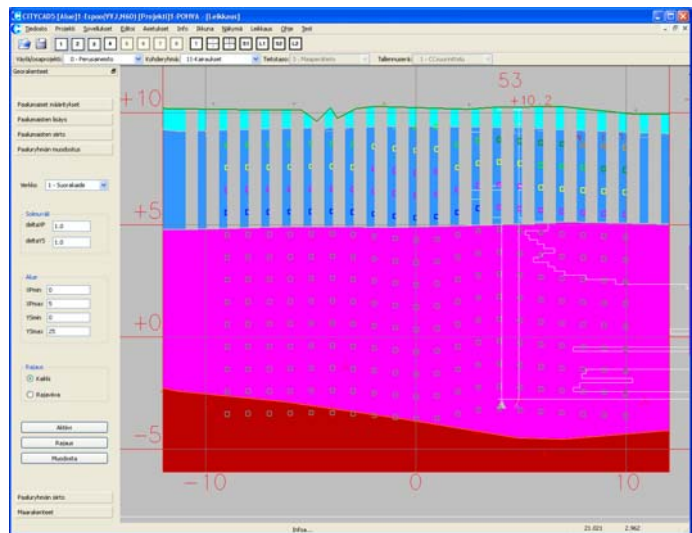
Mitoituksen lähtökohtana on se, että pilari ja pohjamaa (savi) toimivat eri tavoin, jolloin pilari murtuu merkittävästi pienemmällä muodonmuutostasolla (kuva 12). **Mitoituksessa on lisäksi tarkastettava, että stabiliteetti on riittävä.**



Kuva 12. Stabiloidun pilarin ja saven muodonmuutostäyttäytyminen.



Kuva 13.a Pilarin sekoituskärki.



Kuva 13 b. Suunniteltu pilarikenttä.

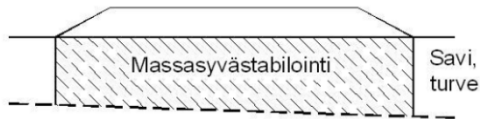
Massastabilointi

Massastabiloinnissa sideaine sekoitetaan mahdollisimman tasaisesti koko stabiloitavaan massamäärään. Stabilointi tehdään yleensä suoraan käsiteltävään maaperään (in situ) tai se voidaan tehdä myös aumasekoituksena. Tämä on harvemmin käytetty menetelmä, soveltuu ylijäämämassoille. Massastabilointi soveltuu myös turpeille, liejulle, saville tai silttille tai pilaantuneille maille. Sideaineena käytetään useimmiten sementtipohjaiset sekoitukset, erityisesti eloperäisille maille. Maksimisyvyys nykykalustolla on noin 5m. Mutta tätä syvempäkin on tehty. Sekoitus tehdään

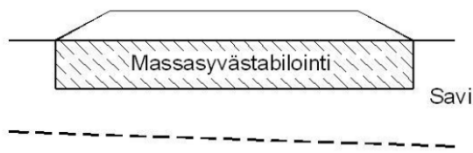
lamelleissa (n. 4...5 m sivumitta), jotka sekoitetaan erikseen. Sideaine levitetään joko maanpinnalle tai harvemmin syötetään maapohjaan. Sekoitinkärki käsittelee lamellin alhaalta ylöspäin liikkuen vaaka- ja pysty suuntaan suunnitellun määrän. Menetelmän onnistumisen kannalta on oleellista kuormittaa sekoitettu alue mahdollisimman pian (esikuormitus), jotta se tiivistyy.

Massastabilointi voidaan yhdistää esim. pilaristabilointiin. Se – kuten pilaristabilointikin – voidaan tehdä myös määrämittaisena (kuva 14).

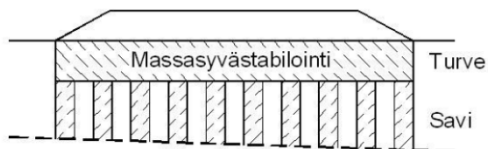
a) Massasyvästabilointi pehmeän kerroksen pohjaan asti



b) Massasyvästabilointi määräsyvyyteen



c) Massasyvästabiloinnin ja pilaroinnin yhdistelmä



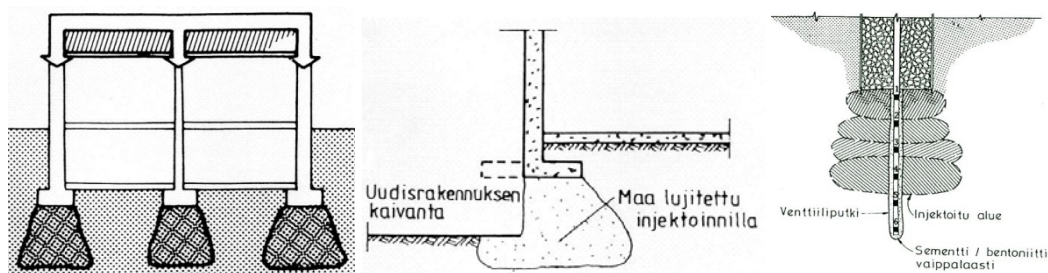
Kuva 14. Erilaisia massastabilointiratkaisuja ja massastabiloinnin sekoituskärki.

12. Injektoinnit

Injektoinnin käyttö lujittamiseen

Maan huokostilaan puristetaan paineella maan raerunkoa täyttävää ja sitovaa ainesta. Injektointeja käytetään kasvattamaan maan lujuutta seuraavissa olosuhteissa:

- olemassa olevien *perustusten alla*
- *paalujen kärjen kantavuuden lisääminen*
- kaivinpaalun *vaippakitkan* parantaminen
- tilapäisenä *tukiseinänä*
- *ankkurointien* varmistamiseen
- painuneen *lattian oikaisu* ym.



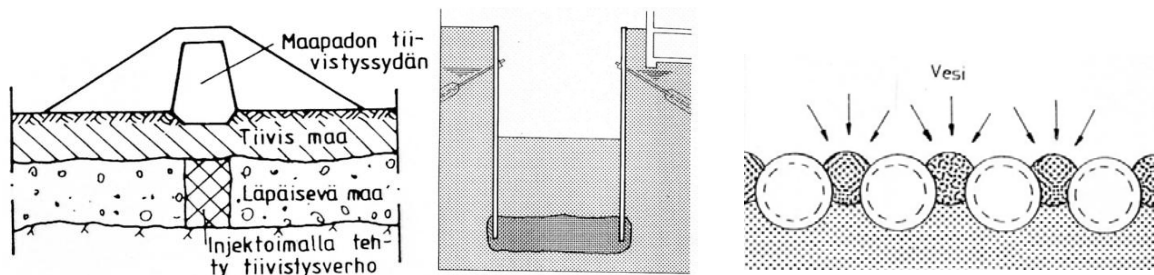
Kuva 15. Erilaisia injektointikohteita.

Injektoinnin käyttö tiivistämiseen

Injektointeja käytetään myös vedenläpäisevyyden pienentämiseen mm.:

- *tiiviste*verhot maapatojen alla
- maapadoissa olevien *vuotokohtien* tiivistäminen
- ponttiseinillä tuettujen *kaivantojen* ja *uppokaivojen* alaosien tiivistäminen, esim. *hydraulista murtumaa* vastaan
- *patoseinien* tiivistäminen ym.

Käytetään myös kallioiden tiivistämiseen ja vahvistamiseen. Menetelmä on kallis, eikä lopputulos ole aina varma. Sideaine saattaa esimerkiksi joutua johonkin ihan muualle kuin on suunniteltu (kuva 16).



Kuva 16. Injektoinnin käyttö maapohjan tiivistämiseksi.

Käytetyt injektointiaineet ja tavat ovat:

- Sementti-injektointi (kHk, Sr)
- Bentoniitti-injektointi (- ” -)
- Kemiallinen injektointi
 - vesilasi, hartsi,... (hienommille materiaaleille, kuten kSi →)
- Muita: esim.
 - kalkkilieteinjektointi
 - bitumi-injektointi

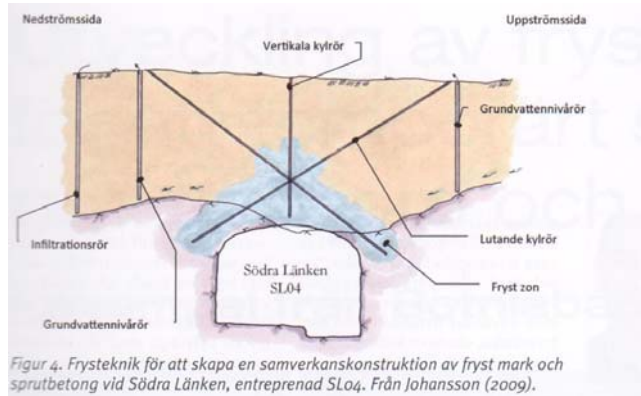
Suihkuinjektointi (jet grouting)

Menetelmässä porataan ensin maahan reikä vesisuihkulla ja ilmanpaineella. Tähän reikään pumpataan pohjasta lähtien kovalla paineella sementtilaastia pyörittämällä suutinputkea ylösnostettaessa. Tällöin syntyy sementillä injektoitu pilari, jonka halkaisija vaihtelee välillä 1,5...2,5 m. Pilarista on joskus käytetty myös nimeä pyörrepilari. Menetelmä on ollut kiistanalainen ja sitä on kritisoitu siitä, että pilarin yläpäässä on havaittu maanpinnan nousua. Nykyään nämä ongelmat ovat pääosin ratkaistu, joten ongelma on hallinnassa. Menetelmää on käytetty saneerauskohteissa, esim. Ateneum.

13. Jäädyttäminen

Jäädyttäminen on vaativa ja kallis maanvahvistusmenetelmä. Soveltuu kuitenkin erityiskohteisiin. Aluksi maaperä jäädytetään käyttämällä jäädytysputkistoa (kuva 17a). Kun tavoiteltu lämpötila / jäätyminen on maaperässä saavutettu, voidaan tehdä suunnitellut toimenpiteet, esim. kaivaa tai räjäyttää tunneli. Kun rakenne on valmis, voidaan maan antaa sulaa uudelleen. Soveltuu erityisesti silloin kun tarvitaan vesitiivistä rakentamista. Sulamisvaiheessa on varauduttava maapohjan sula-

mispehmenemiseen ja sen jälkeen mahdollisiin jälkipainumiin. Nämä ongelmat koskevat yleensä enemmän kohteen ympäristöä. Menetelmä vaatii esilaskentoja ja jatkuvaa seurantaa, mutta on onnistuessaan varsin hyvä menetelmä. Kohteita ovat esim. Kluuvin ruhje Helsingin metrossa (1980-luku), Södra Länken (kuva 17 b) ja Botniabana Ruotsissa (2003-2004).

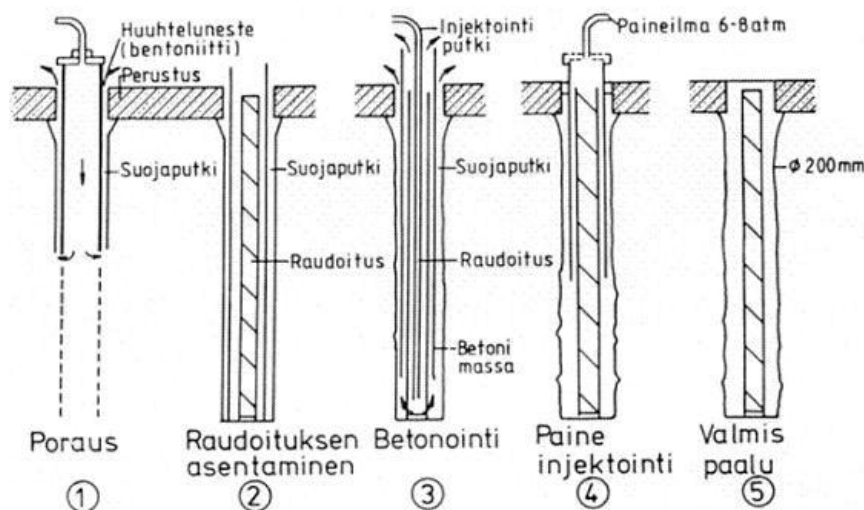


Kuva 17.a. Jääditysjärjestelmä maan pinnalla. 17 b.Södra Länken: jäädityssuunnitelma.

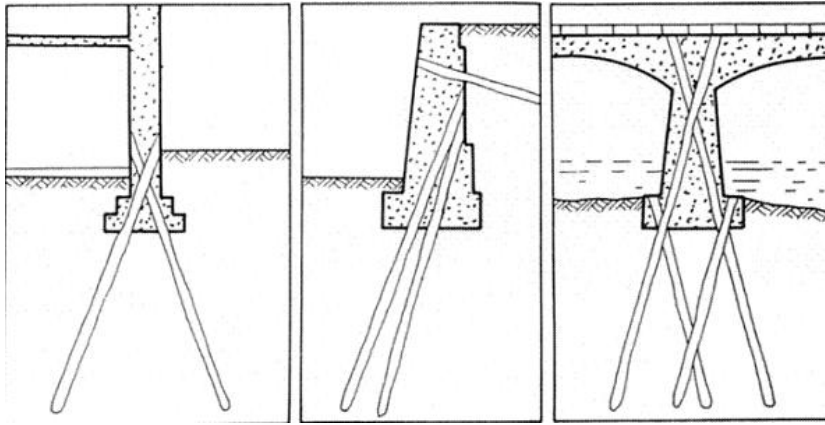
Jäädyttämistä voidaan käyttää myös siten, että paalutettavaksi aiottu pehmeikkö / suo aurataan ja pidetään lumettomana alkutalvesta, jolloin maan ylin osa jäätyy. Jäätynyt ja lujittunut pintakerros toimii työpetin paalutukselle. Hyvä puoli on se, että selvittää ohuella tasauskerroksella laatan alla, jolloin painumat eivät ole niin suuri ongelma. Edellyttää luonnollisesti kunnan pakkasia.

14. Juuripaalut

Juuripaalut ovat pieniläpimittaisia, paikalla valettuja teräsbetonipaaluja, jotka lujittavat perustuksen alla olevaa maata ja jakavat kuorman laajemmalle alueelle. Niitä käytetään yleensä vanhojen perustusten vahvistamiseen (kuvat 18 ja 19).



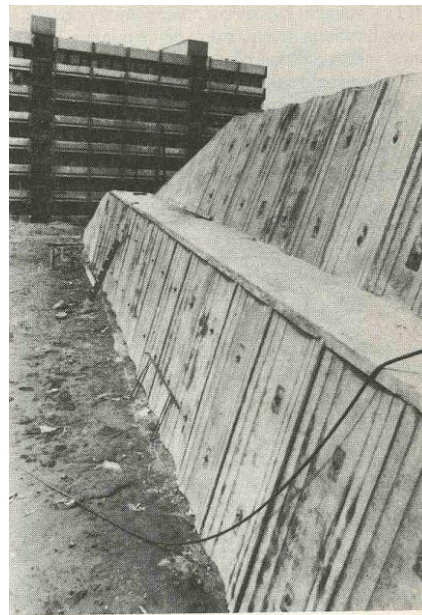
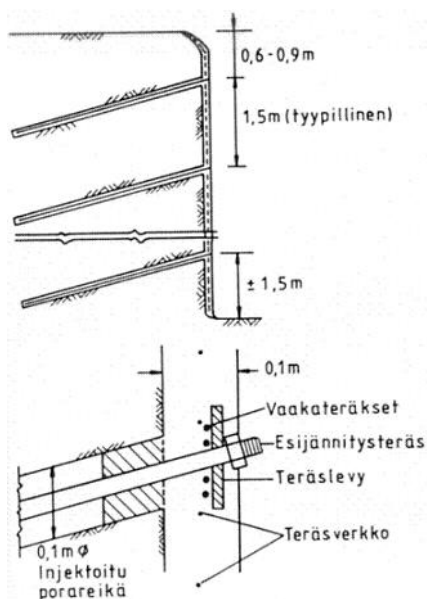
Kuva 18. Juuripaalun valmistaminen.



Kuva 19. Juuripaalun käyttökohteita.

15. Maan naulaus

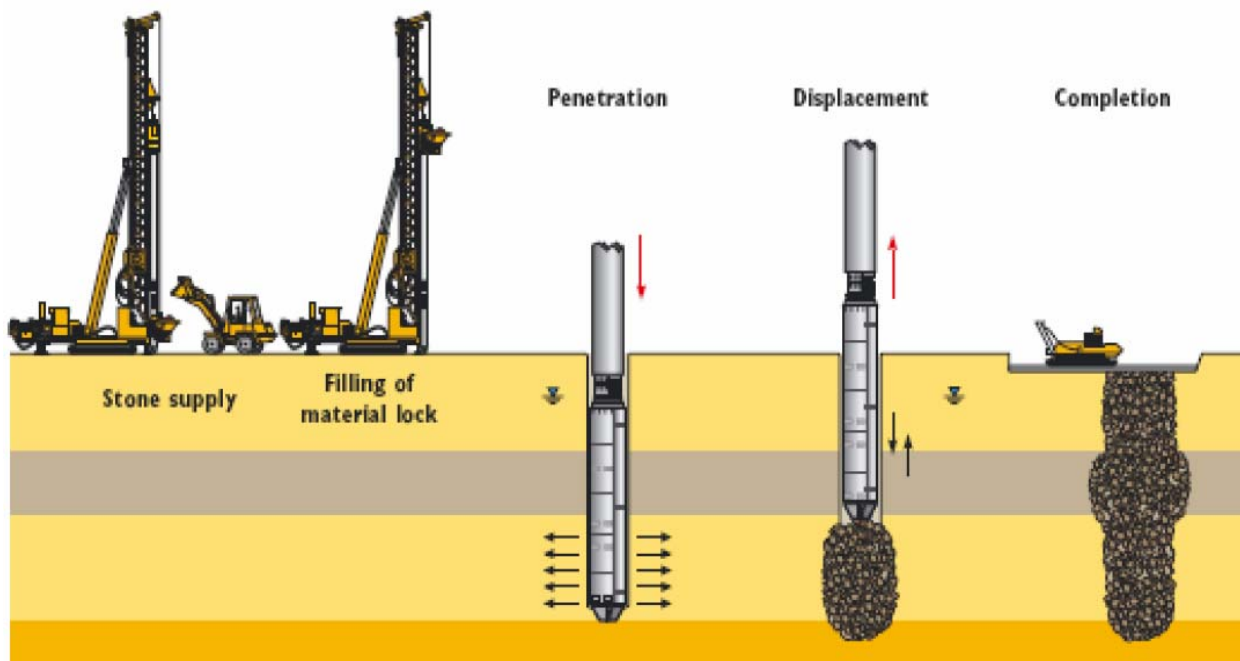
Maan naulauksessa terästankoja injektoidaan maahan tehtyyn reikään esim. stabiloimaan rinteitä sekä ”ankkuroimaan” esim. luiskaa vahvistavaa ruiskubetonia tai lujiteverkkoa. Soveltuu joustavana rakenteena esim. maanjäristysalueille. Ei erityisen usein käytössä Suomessa, koska ongelman on esim. routa. Samantapaisia sovelluksia käytetään kallionvahvistamiseen (kuva 20).



Kuva 20. Maan naulausperiaate ja maan naulauskohde.

16. Sora- tai murskepilarit

Menetelmä on kehitetty 1970-luvulla Saksassa. Sora- tai murskepilarit voidaan tehdä joko kuiva- tai märkämenetelmällä. Menetelmässä suutin työnnetään maahan ilmanpaineen tai veden avulla. Kun on päästy määräsyyvyteen, suutinta aletaan nostaa samalla kun tyhjiin tilaan syötetään soraa tai murskettä. Pilarin leveyttä voidaan säädellä kerroskohtaisesti. Pilareita tehdään kuten syvästabiloinnissa erilaisiin ruudukoihin. Pilarit koot hieman suurempia kuin syvästabiloinnissa (halkaisija esim. 900 mm). Kuvassa 21 on esitetty sorapilarin valmistus.



Kuva 21. Sorapilarin valmistus.

Menetelmä soveltuu erityisen hyvin kohteisiin, jossa tarvitaan maapohjan lujittamisen lisäksi suojaamaan maanjäristyskuormilta ja juoksettumiselta. Menetelmä on suhteellisen laajasti käytössä maailmalla, Suomessa tehty joitakin kokeita. Kiinnostavuus menetelmään on kasvanut viime aikoina, koska ei tarvita sideaineita eli menetelmä on suhteellisen ekologinen.

17. Keventäminen

Pohjavahvistusmenetelmiä käytetään usein yhdessä hyvän lopputuloksen takaamiseksi. Yleisesti menetelmiin yhdistetään keventämistä. Keventämistä voidaan käyttää yksittäisenä menetelmänä. Sekä vaaka- että pystysuuntaisen kuorman ja maanpaineen pienentämiseksi voidaan käyttää erilaisia kevennysratkaisuja. Kevennystä voidaan käyttää painuma-aikojen lyhentämiseksi, mahdollisten jälkipainumien vähentämiseksi tai eliminoimiseksi sekä epäonnistuneen kohteen toiminnan varmistamiseksi, tukiseinien ja putkijohtojen maanpaineiden vähentämiseksi ja painumerojen tasaukseksi. Kevennysratkaisut toimivat hyvin myös siirtymärakenteina. Liikennevirasto on keuhällä 2011 julkaisut uuden Kevennysohjeen. Kuvassa 22 on esitetty katupenkereen keventämistä.

Kevennysmateriaaleja ovat esimerkiksi:

- **Kevytsora (yleisin)**
- **Solumuovit (EPS)**, uusia tutkimustuloksia
- Masuunihiekka
- Kevytsorabetoni
- Tuhkat
- Käytetyt renkaat, rengasrouhe
- Vaahtobetoni
- Vaahtolasi
- *Palaturve*
- *Puujalostuksen sivutuotteet (kokeiluja Ruotsissa)*

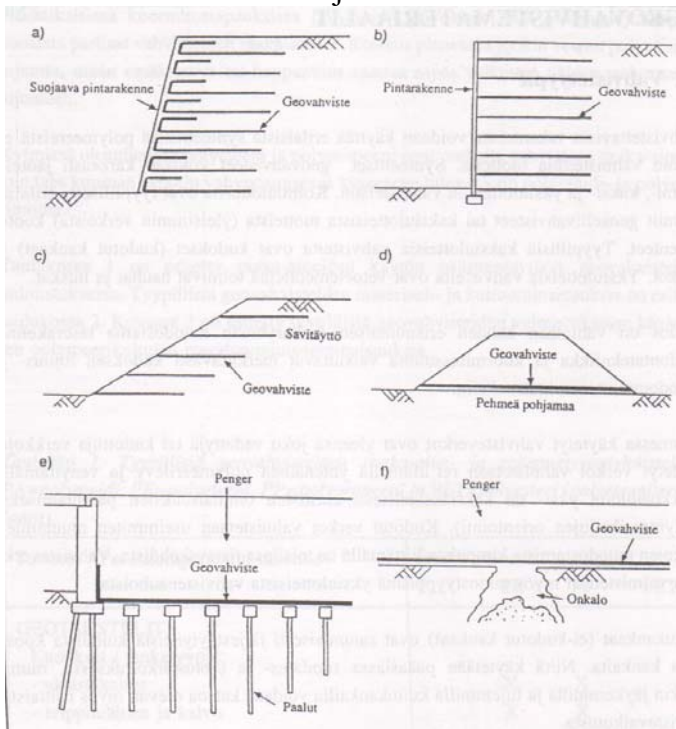


Kuva 22. Katupenkereen kevennys EPS-solumuoviblokeilla ja sillan taustan täyttöä.

18. Lujitteiden käyttö

Lujitteita käytetään laajasti pohjarakentamisessa. Niiden käyttö on viimeaikoina yleistynyt jatkuvan tuotekehityksen myötä ja paremman ohjeistuksen avulla. Lujitteet ovat ekologinen ja kustannustehokas lujittamistapa. Lujitteita käytetään omina rakenteinaan, mutta myös muiden menetelmien osana, esim. paalutuksen tai syvästabiloinnin. Lujitteina käytetään yleisimmin geosynteettisiä tuotteita tai teräsverkkopohjaisia tuotteita. Myös muita materiaaleja saatetaan käyttää lujitus-tarkoituksiin, mutta rajoitetummin. Lujitteet (joskus myös geovahvisteet) ovat joko verkkomaisia (kuva 24) tai kudottuja lujitekankaita tai yhdistelmä rakenteita.

Lujitteita käytetään yleensä maarakentamisessa. Niillä voidaan parantaa rakenteiden stabiilitettä, tasata painumia, parantaa kantavuutta, tasata kuormitusta tai tehdä ns. lujitemaarakenteita, jossa lujite on kiinteä osa rakennetta esim. lujitettu tukimuuri. Kuvassa 23 on esitetty lujitteiden käyttöä osana maarakenteita. Lujitteiden mitoituksesta eurokoodien perusteella ollaan juuri julkaisemassa uutta Liikenneviraston ohjetta.



Kuva 23. Lujitettuja maarakenteita: a) jyrkkä luiska, b) tukimuuri-rakenne, c) korjattu saviluiska, d) penger pehmeiköllä, e) paalutettu penger f) lujitettu penger onkaloalueella



Kuva 24. Lujiteverkon lujitusmekanismi.

19. Menetelmien yhdistäminen

Pohjanvahvistusmenetelmiin voidaan laskea myös erilaiset lujitteet.

Tavallisia Suomessa käytettyjä tapoja yhdistää erilaisia pohjanvahvistusmenetelmiä ovat mm.:

- Esikuormitusta yhdistetään mm.:
 - Massanvaihtoon, erityisesti massanvaihtoon pengertämällä
 - Pystyjoitukseen
 - Syvästabilointiin
- Keventämistä yhdistetään
 - Paalutukseen (yleensä siirtymärakenteena)
 - Pystyjoitukseen jälkipainumien eliminoimiseksi
 - Syvästabilointiin esim. huonosti stabiloituneiden alueiden kohdalla
- Menetelmien yhdistelyä myös esim. siirtymärakenteissa:
 - Massastabilointi + pilaristabilointi
 - Syvästabilointi + paalutus
 - Massanvaihto + paalutus
- Lujitteet + pohjanvahvistusmenetelmät:
 - pengerpaalutus paaluhatuilla
 - syvästabilointi

20. Kirjallisuus

Liikennevirasto 2011, Kevennysrakenteiden suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 5/2011, Tiepohjarakenteiden suunnitteluohjeet 9.3.2011. http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2011-05_kevennysrakenteiden_suunnittelu_web.pdf

Liikennevirasto 2010, Syvästabiloinnin suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 11/2010, Tiepohjarakenteiden suunnitteluohjeet; <http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo11-2010web.pdf>

Liikennevirasto 2011, Massanvaihdon suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 11/2011, Tiepohjarakenteiden suunnitteluohjeet; http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2011-11_massanvaihdon_suunnittelu_web.pdf