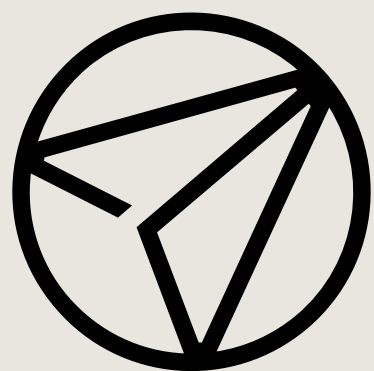




AFRY

[HTTPS://TREPO.TUNI.FI/HANDLE/10024/162312](https://trepo.tuni.fi/handle/10024/162312)

LOTTA KERÄNEN

Diplomityö: prEN 1997-3:2023 Pohjanvahvistusten suunnittelu uuden eurokoodin mukaisesti

Tutkimuksen tausta

- Toisen sukupolven eurokoodeja valmistellaan ja ne otettaneen Suomessa käyttöön vuonna 2027
 - Ennen käyttöönottoa tulee laatia kansalliset liitteet. Niiden laatimiseksi uuteen eurokoodiin tulee tutustua huolellisesti
- Eurokoodi 7 jakaantuu nykyisen kahden sijaan kolmeen osaan
 - SFS-EN 1997-1 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt
 - SFS-EN 1997-2 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 2: Maa- ja kallioperän ominaisuudet
 - SFS-EN 1997-3 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 3: Geotekniset rakenteet
- Ensimmäisen sukupolven eurokoodi ei määrittele juurikaan pohjanvahvistusten mitoittamista, joten niitä käsittelevä kappale 12 standardissa EN 1997-3 on kokonaan uusi
- Työssä tutkittiin eurokoodin vaikutuksia kolmen Suomessa yleisesti käytössä olevan pohjanvahvistuksen suunnitteluun
 - **Suihkuinjektointi** on valittu esimerkkirakenteeksi, koska eurokoodin mukaiseen pohjanvahvistusten mitoittamiseen on vaikuttanut vahvasti suihkuinjektointimitoituksen periaatteet
 - **Massanvaihto** ja pilaristabilointi kuivamenetelmällä taas ovat Suomessa erittäin yleisesti käytössä olevia menetelmiä, joten niiden mitoittamista on tärkeää käsitellä
 - **Pilaristabilointi** on Euroopassa pohjoismaita lukuun ottamatta harvinainen pohjanvahvistustapa, koska stabilointiin hyvin soveltuvia hyvin pehmeitä maita on paljon vähemmän muualla Euroopassa. Tämän takia pilaristabilointi ja sen mitoittaminen eivät ole olleet eurokoodien kirjoittajien fokuksessa, eikä näin ollen suomalainen pilaristabiloinnin mitoittustapa suoraan vastaa uudessa eurokoodissa esitettyjä mitoittustapoja

Tutkimuksen tavoitteet

- Tutkimuksen tavoitteena on selvittää uuden eurokoodin vaikutuksia pohjanvahvistusten mitoittamiseen ja toimia pohjatietona kansallisten liitteiden kirjoittamisessa.
- Lopullisena tavoitteena on tarjota pohjatietoa uusien kansallisten liitteiden laatimisessa ja mahdollisesti antaa suosituksia pilaristabiloinnin, massanvaihdon ja suihkuinjektoinnin mitoittamisen osalta.

Tutkimuskysymykset

- Miten pilaristabilointi, massanvaihto ja suihkuinjektointi luokitellaan uuden eurokoodin mukaisesti?
- Miten uuden eurokoodin mukaiset pohjanvahvistusten mitoittamisen vaatimukset eroavat eri pohjanvahvistusluokissa?
- Mitä vaatimuksia uusi eurokoodi asettaa pilaristabiloinnin, massanvaihdon ja suihkuinjektoinnin mitoittamiselle?

Pohjanvahvistusten luokittelu

Taulukko 5. *Pohjanvahvistusten luokittelu (muokattu lähteestä prEN 1997-3:2023, Table 12.1)*

Pohjan- vahvistus- luokka	A – Diffused	B – Discrete
I	AI – Vahvistetulla alueella ei mitattavaa yksiaksiaalista puristuslujuutta Vahvistetun maan leikkauslujuus tai jäykkyys on parempi kuin vahvistamattoman maan. Vahvistettu maa voidaan mallintaa parannetun maan parametreilla.	BI – ei-jäykät vahvisteet (non-rigid inclusions) Maahan asennettavilla vahvisteilla on suurempi leikkauslujuus ja jäykkyys kuin ympäröivällä maalla. Vahvisteiden yksiaksiaalinen puristuslujuus ei ole mitattavissa.
II	AII – Vahvistetulla alueella on mitattava yksiaksiaalinen puristuslujuus Vahvistettu maaperä on muokattu luonnollisesta tilastaan, sillä on mitattavissa oleva yksiaksiaalinen puristuslujuus ja se on huomattavasti ympäröivää maata jäykempää. Yleensä se koostuu sideaineen ja maan yhdistelmästä.	BII – jäykät vahvisteet (rigid inclusions) Maahan asennettavilla vahvisteilla on mitattava yksiaksiaalinen puristuslujuus ja merkittävästi suurempi jäykkyys kuin ympäröivällä maalla. Vahvisteiden materiaali voi tavanomaisia rakennusmateriaaleja, kuten puuta, betonia, laastia, terästä tai sideaineen ja maan yhdistelmää.

Se, mihin pohjanvahvistusluokkaan valittu pohjanvahvistus luokitellaan, määrittää

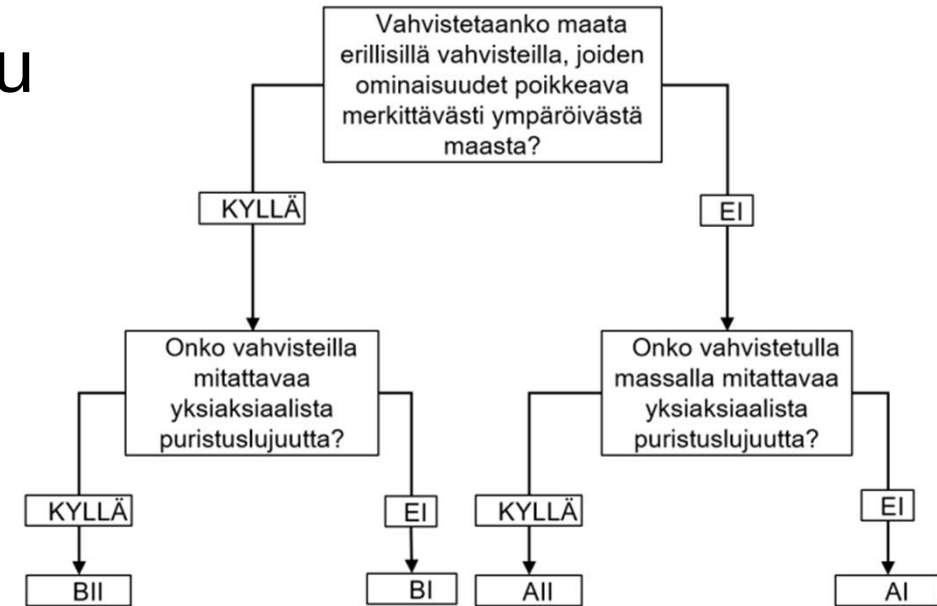
- kohteesta tehtäviä pohjatutkimuksia,
- Materiaaliparametrien määrittämistä
- kestävyysden määrittämistä
- murtorajatilassa käytettävien osavarmuuslukujen kohdentamista, sekä
- laadunvarmistuksen vaatimuksia.

Eri pohjanvahvistustapojen luokittelu on näin ollen tehtävä huolellisesti ja edellä mainitut seikat on otettava huomioon sitä tehtäessä. Tässä työssä on pyritty käsittelemään kunkin pohjanvahvistustavan mitoittamisen vaatimuksia siten, että pohjanvahvistustapa kuuluisi tiettyyn pohjanvahvistusluokkaan koko suunnitteluprosessin ajan.

Pohjanvahvistusten luokittelu

Taulukko 5. Pohjanvahvistusten luokittelu (muokattu lähteestä prEN 1997-3:2023, Table 12.1)

Pohjan- vahvistus- luokka	A – Diffused	B – Discrete
I	AI – Vahvistetulla alueella ei mitattavaa yksiaksiaalista puristuslujuutta Vahvistetun maan leikkauslujuus tai jäykkyys on parempi kuin vahvistamattoman maan. Vahvistettu maa voidaan mallintaa parannetun maan parametreillä.	BI – ei-jäykät vahvisteet (non-rigid inclusions) Maahan asennettavilla vahvisteilla on suurempi leikkauslujuus ja jäykkyys kuin ympäröivällä maalla. Vahvisteiden yksiaksiaalinen puristuslujuus ei ole mitattavissa.
II	AII – Vahvistetulla alueella on mitattavaa yksiaksiaalista puristuslujuutta Vahvistettu maaperä on muokattu luonnollisesta tilastaan, sillä on mitattavissa oleva yksiaksiaalinen puristuslujuus ja se on huomattavasti ympäröivää maata jäykempää. Yleensä se koostuu sideaineen ja maan yhdistelmästä.	BII – jäykät vahvisteet (rigid inclusions) Maahan asennettavilla vahvisteilla on mitattava yksiaksiaalinen puristuslujuus ja merkittävästi suurempi jäykkyys kuin ympäröivällä maalla. Vahvisteiden materiaali voi tavanomaisia rakennusmateriaaleja, kuten puuta, betonia, laastia, terästä tai sideaineen ja maan yhdistelmää.

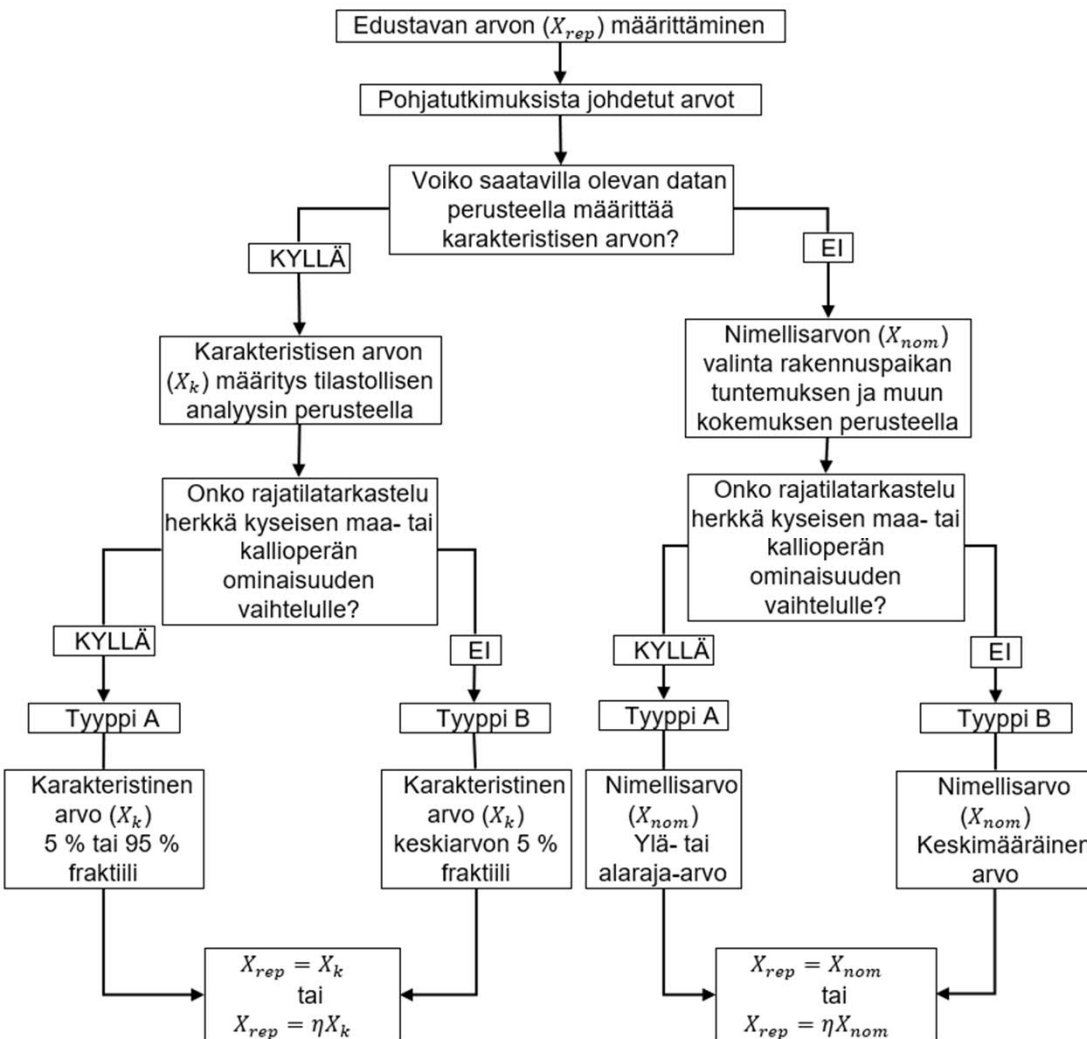


Kuva 1. Pohjanvahvistusten luokittelu

Taulukko 6. Suomessa yleisesti käytettävät pohjanvahvistusmenetelmät luokiteltuina (muokattu lähteestä prEN 1997-3:2023, Table I.1 ja Table I2)

Massastabilointi (deep mixing dry method)	AI, AII, BI, BII
Pilaristabilointi (deep mixing dry method)	AI, AII, BI, BII
Massanvaihto	AI
Esikuormitus	AI
Pystyjoitus	AI
Syvätiivistys	AI
Suihkuinjektointi	AII, BII
Tiivistyspaalutus – löyhille hiekkamaille 70-luvulle saakka	BII
Vahvistepaalutus	BII

Parametrien määrittämisen muutokset



- Mitoitusparametrien määrittäminen muuttuu uuden eurokoodin myötä
- Edustava arvo (X_{rep}) = nykyinen karakteristinen arvo
- Mitoitusarvo (X_d) = osavarmuuskerroin x edustava arvo
- Pohjanvahvistusluokissa AI ja BI vahvistetun maan edustavat arvot määritetään, kuten maaparametrien edustavat arvot, joka voi olla
 - Karakteristinen arvo (X_k), joka lasketaan tilastollisten menetelmien perusteella tai
 - Nimellisarvo (X_{nom}), joka valitaan rakennuspaikan tuntemuksen ja muun kokemuksen perusteella
- Pohjanvahvistusluokissa AII ja BII määritetään vahvistetun maan yksiaksiaalinen puristuslujuus
 - Määritetään UCS-kokeiden perusteella (lieriölujuus) tai muiden rakennuspaikalla tehtävien kokeiden perusteella
 - Kun tutkitaan ≥ 10 näytettä, lasketaan karakteristinen arvo tilastollisten menetelmien perusteella 10 % fraktiililla
 - Kun tutkitaan < 10 näytettä, lasketaan nimellisarvo, joka on
 - pienin mitattu q_u kaikissa mitatuissa UCS-kokeissa
 - kaikkien UCS-kokeiden tulosten aritmeettinen keskiarvo kerrottuna vähennysarvolla k, jossa $k=0,7$, ellei kansallinen liite ohjaista toisin
 - $q_{u,max} = 12 \text{ MPa}$ ellei kansallinen liite anna muuta arvoa

Eurokoodin vaatimukset pohjatutkimuksiin ja laadunvarmistukseen

Taulukko 14. Pohjatutkimusten minimisyvydet pohjanvahvistusluokissa (muokattu lähteestä prEN 1997-3, Table 12.2 (NDP))

Pohjanvahvistusluokka	Minimisyvyys, d_{min}
AI	Käsittelysyvyys + 5 m
AII	Käsittelysyvyys + 5 m
BI	Käsittelysyvyys + $\max\{5 \text{ m} ; 3B_i\}$
BII	Käsittelysyvyys + $\max\{5 \text{ m} ; 3B_{ri}\}$

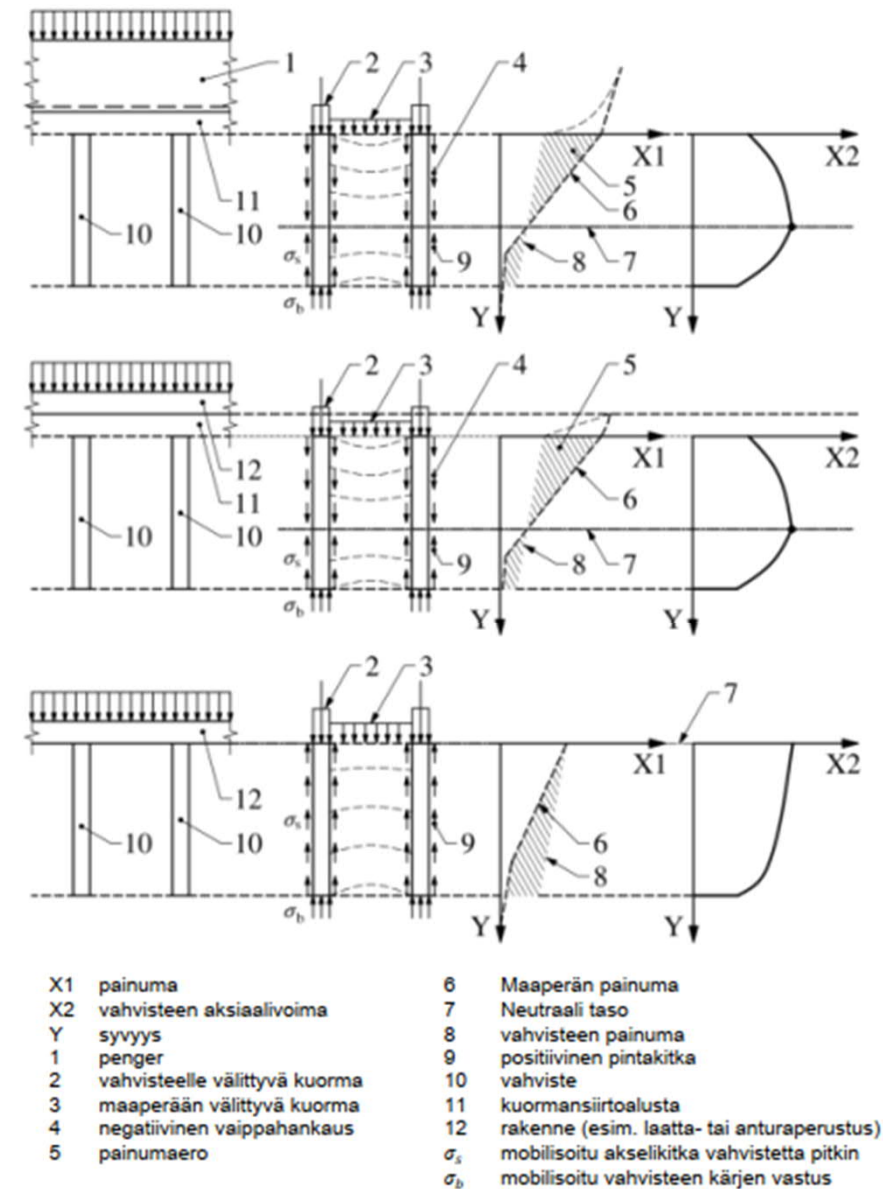
d_{min} on pohjatutkimusten minimisyvyys maanpinnalta mitattuna
 B_i on BI-luokan vahviteen ekvivalentti halkaisija
 B_{ri} on BII-luokan vahviteen ekvivalentti halkaisija.
 Ekvivalentti halkaisija määritellään $B = 2\sqrt{A/\pi}$, missä A on vahviteen poikkipinta-ala

Taulukko 17. Koestustiheys pohjanvahvistuksilla (muokattu lähteestä prEN 1997-3:2023 CIB FV, Table 12.5 (NDP))

Pohjanvahvistusluokka	Koestuksen tyyppi	Koestuksen määrä
AI	Kenttä- ja laboratoriokoestus käsitellyn alueen täyteen syvyyteen	Rakenteen tavanomaisen pohjatutkimuspistemäärän ja -tiheyden mukaisesti.
AII	Puristuslujuuden koestus käsitellystä maasta otetuista näytteistä	Muun määrittävän materiaalistandardin puuttuessa: Vähintään 4 koetta kohteesta ja 1 koe 125 m ³ käsiteltävää geoteknistä maakerrosta (geotechnical unit) kohti. Kokeet on tehtävä näytteistä, jotka edustavat koko käsittelysyvyyttä.
BI	Kenttä- ja laboratoriokoestus käsitellyn alueen täyteen syvyyteen vahvisteiden välistä ja vahvisteista	Rakenteen tavanomaisen pohjatutkimuspistemäärän ja -tiheyden mukaisesti.
BII	Puristuslujuuden koestus käsitellystä maasta otetuista näytteistä tai asennetusta materiaalista	Muun määrittävän materiaalistandardin puuttuessa: Vähintään 4 koetta kohteesta ja 1 koe 125 m ³ jäykkää vahvistetta kohti. Kokeet on tehtävä näytteistä, jotka edustavat koko käsittelysyvyyttä.

Pohjanvahvistusten kestävyys

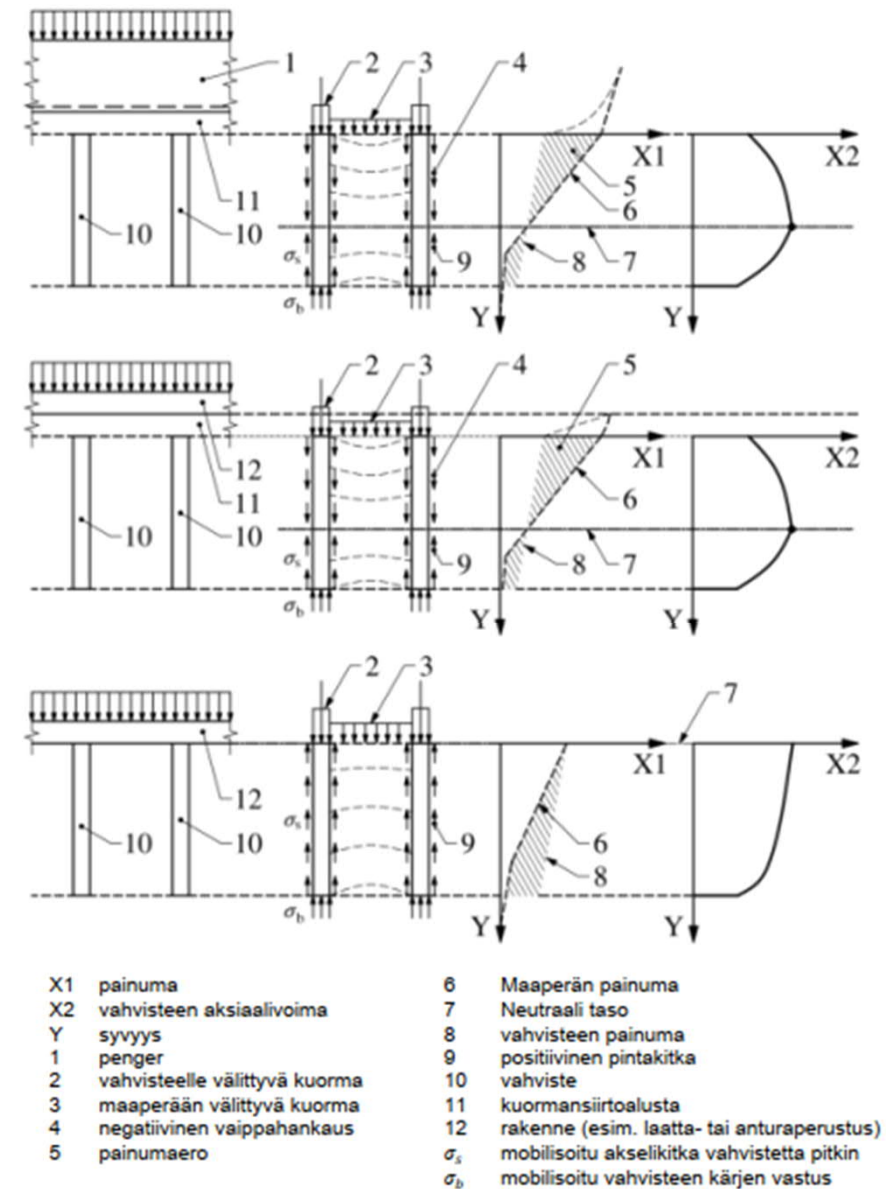
- Pohjanvahvistusluokissa AI ja AII kestävyys määritetään käyttäen parannettuja maan parametreja
 - Rakenteellisen kestävyuden varmistaminen pohjanvahvistusluokan AII rakenteilla
- Pohjanvahvistusluokissa BI ja BII pohjanvahvistusten kestävyys määritetään vahvisteiden ja maan yhteistoiminnan kestävyytensä
 - Huomioidaan vuorovaikutukset maan, erillisten vahvisteiden sekä yläpuolisen rakenteen, penkereen tai kuormansiirto-alustan välillä
 - tulee määrittää missä suhteessa kuormat jakautuvat yksittäisten vahvisteiden ja ympäröivän maaperän välillä, jotta voidaan määrittää kuorman osuus yksittäisille vahvisteille
 - tulee lisäksi huomioida pohjanvahvistusluokkien B vahvisteiden jäykkyyssuhde ympäröivään maahan



Kuva 6. Pohjanvahvistuksen vuorovaikutus jäykkien vahvisteiden kanssa (prEN 1997-3:2023, Figure 12.2)

Pohjanvahvistusten kestävyys

- Kestävyys pohjanvahvistusluokan BII rakenteilla
 - maaperän ja vahvisteiden välinen vuorovaikutus sekä vahvisteiden välinen vuorovaikutus keskenään
 - laskentamallissa tulee varmistaa yksittäisten vahvisteiden rakenteellinen kestävyys ja vuorovaikutuslaskentamallissa tulee määrittää niin kutsuttu neutraali taso, eli piste, jossa vahvisteiden ja maaperän painuma ovat yhtä suuria
 - Pohjanvahvistusluokan BII jäykän vahvisteiden pystysuoran kestävyys edustava arvo $R_{ri,i}$ määritetään paalun pystysuoran kestävyys tavoin
 - Rakenteellisen kestävyys varmistaminen
- Eurokoodissa paalut ja jäykät vahvisteet (rigid inclusions) erotellaan selkeästi siten, että jäykkien vahvisteiden ja yläpuolisen rakenteen välillä ei ole rakenteellista yhteyttä ja paalujen ja yläpuolisen rakenteen välillä voi olla rakenteellinen yhteys. Ongelmana on, että paalujen ja ylärakenteen liitos on yleensä nivel eli se välittää vain aksiaalikuormia. Rakenteellisen liitoksen määritelmä edellyttää, että liitos välittää puristus-, leikkaus-, veto- ja taivutusrasituksia, eli on jäykkä liitos.



Kuva 6. Pohjanvahvistuksen vuorovaikutus jäykkien vahvisteiden kanssa (prEN 1997-3:2023, Figure 12.2)

Uuden eurokoodin vaikutukset massanvaihdon suunnitteluun

- Massanvaihto luokitellaan pohjanvahvistusluokkaan AI
 - › Vain vähän vaatimuksia tai ohjeistusta
- Laadunvarmistus 
- Ylärakennetta koskevat painuma- ja kallistumarajat
 - Mm. standardin EN 1990:2023 liitteen A taulukot A.1.13, A.1.14 ja A.1.15

Taulukko 17. Koestustiheys pohjanvahvistuksilla (muokattu lähteestä prEN 1997-3:2023 CIB FV, Table 12.5 (NDP))

Pohjan- vahvis- tus- luokka	Koestuksen tyyppi	Koestuksen määrä
AI	Kenttä- ja laboratoriokoestus käsitellyn alueen täyteen syvyyteen	Rakenteen tavanomaisen pohjatutkimuspistemäärän ja -tiheyden mukaisesti.
AII	Puristuslujuuden koestus käsitellystä maasta otetuista näytteistä	Muun määrittävän materiaalistandardin puuttuessa: Vähintään 4 koetta kohteesta ja 1 koe 125 m ³ käsiteltävää geoteknistä maakerrosta (geotechnical unit) kohti. Kokeet on tehtävä näytteistä, jotka edustavat koko käsittelysyvyyttä.
BI	Kenttä- ja laboratoriokoestus käsitellyn alueen täyteen syvyyteen vahvistoiden välistä ja vahvistista	Rakenteen tavanomaisen pohjatutkimuspistemäärän ja -tiheyden mukaisesti.
BII	Puristuslujuuden koestus käsitellystä maasta otetuista näytteistä tai asennetusta materiaalista	Muun määrittävän materiaalistandardin puuttuessa: Vähintään 4 koetta kohteesta ja 1 koe 125 m ³ jäykkää vahvistetta kohti. Kokeet on tehtävä näytteistä, jotka edustavat koko käsittelysyvyyttä.

Uuden eurokoodin vaikutukset suihkuinjektoinnin suunnitteluun

- Suihkuinjektoinnin suunnittelu ja mitoittaminen eurokoodin mukaan vastaa hyvin nykyisin Suomessa käytettävää suihkuinjektointiohjeessa esiintyvää DIN 4093 standardin mukaista mitoittamista.
 - Erona ovat osavarmuuslukujen kohdistaminen ja se, että nykyisen eurokoodin mukainen ominaispuristuslujuus voidaan suihkuinjektoinnin mitoituksessa rinnastaa tulevan eurokoodin puristuslujuuden nimellisarvoon tai karakteristiseen arvoon.
- Suihkuinjektointi luokitellaan pohjanvahvistusluokkaan AII tai BII
- Molemmissa luokissa
 - määritetään suihkuinjektoinnin ominaisuudet yksiakselinen puristuslujuus mukaan luettuna
 - määritetään suihkuinjektoinnin kestävyys
 - varmistetaan relevantit murtorajatilat ja
 - lopuksi varmistetaan suihkuinjektoinnin rakenteellinen kestävyys
- Ero murtorajatilamitoituksessa puristuskestävyyden laskennassa käytettävien mitoituslaskennan ja osavarmuuslukusarjojen osalta
- Ero kestävyuden määrittämisessä

Uuden eurokoodin vaikutukset suihkuinjektointin suunnitteluun

- Ero kestävyysmäärittämisessä pohjanvahvistusluokkien AII ja BII välillä:
 - AII: määritetään vahvistetun maan parametreilla samoin kuin maa- tai kallioperän kestävyys tavallisestikin
 - BII: lisäksi tulee huomioida seuraavat asiat
 - Kestävyys määritetään suihkuinjektointipilarin ja maan yhteistoiminnan kestävyysnä
 - tulee huomioida vuorovaikutusvaikutukset maan, suihkuinjektointipilarin sekä tuettavan rakennuksen välillä, sekä suihkuinjektointipilarin jäykkyys suhteessa ympäröivään maahan
 - tulee määrittää missä suhteessa kuormat jakautuvat suihkuinjektointipilarin ja ympäröivän maan välillä, jotta voidaan määrittää kuorman osuus yksittäisille suihkuinjektointipilarille, sekä niin kutsuttu neutraali taso, eli piste, jossa suihkuinjektointipilarin ja maan painuma ovat yhtä suuria
 - Pohjanvahvistusluokan BII suihkuinjektointipilarin mitoituskestävyys ($R_{sys,d}$) voidaan määrittää yhtälön $R_{sys,d} = \frac{\sum_i^n R_{ri,i}}{\gamma_{Rd,ri}\gamma_{R,ri}} + \frac{R_g}{\gamma_{Rg}}$ avulla kun otetaan huomioon vahvisteiden ja maaperän siirtymien yhdenmukaisuus.
 - $R_{ri,i}$ on i:nneen jäykän vahviteen pystysuoran kestävyysarvo,
 - R_g on maaperän pystysuoran kestävyysarvo vahvisteiden asennuksen jälkeen
 - pystysuoran kestävyysarvo ($R_{ri,i}$) määritetään paalun pystysuoran kestävyysarvon tavoin.

Pilaristabiloinnin pohjanvahvistusluokka

- Voidaan luokitella uuden eurokoodin mukaisesti kaikkiin neljään pohjanvahvistusluokkaan AI, AII, BI ja BII
- Pilaristabilointi tai sen suunnittelu ei oikein istu mihinkään pohjanvahvistusluokkaan
- Työssä tarkasteltiin tarkemmin tilannetta, jossa penkereen alle tehtävä pilaristabilointi luokiteltaisiin pohjanvahvistusluokkaan AII tai BI

Taulukko 5. *Pohjanvahvistusten luokittelu (muokattu lähteestä prEN 1997-3:2023, Table 12.1)*

Pohjan- vahvistus- luokka	A – Diffused	B – Discrete
I	AI – Vahvistetulla alueella ei mitattavaa yksiaksiaalista puristuslujuutta Vahvistetun maan leikkauslujuus tai jäykkyys on parempi kuin vahvistamattoman maan. Vahvistettu maa voidaan mallintaa parannetun maan parametreillä.	BI – ei-jäykät vahvisteet (non-rigid inclusions) Maahan asennettavilla vahvisteilla on suurempi leikkauslujuus ja jäykkyys kuin ympäröivällä maalla. Vahvisteiden yksiaksiaalinen puristuslujuus ei ole mitattavissa.
II	AII – Vahvistetulla alueella on mitattava yksiaksiaalinen puristuslujuus Vahvistettu maaperä on muokattu luonnollisesta tilastaan, sillä on mitattavissa oleva yksiaksiaalinen puristuslujuus ja se on huomattavasti ympäröivää maata jäykempää. Yleensä se koostuu sideaineen ja maan yhdistelmästä.	BII – jäykät vahvisteet (rigid inclusions) Maahan asennettavilla vahvisteilla on mitattava yksiaksiaalinen puristuslujuus ja merkittävästi suurempi jäykkyys kuin ympäröivällä maalla. Vahvisteiden materiaali voi tavanomaisia rakennusmateriaaleja, kuten puuta, betonia, laastia, terästä tai sideaineen ja maan yhdistelmää.

Pilaristabilointi pohjanvahvistusluokassa AII tai BI

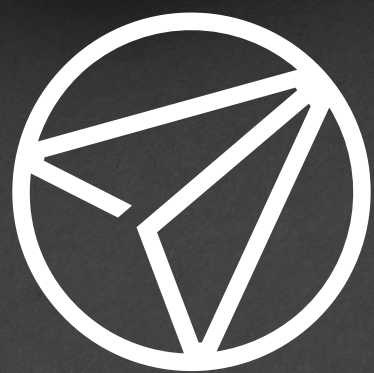
AII

- Stabiliateettimitoituksen nykykäytäntö vastaa likimain pohjanvahvistusluokan AII vaatimuksia
- Pilaristabilointia käsiteltäisiin yhtenäisenä massana, mitä pilaristabilointi ei ole
- Yksiaksiaalisen puristuslujuuden määrittäminen on eurokoodissa tarkasti määritetty, eikä menettelytapa ole tämän työn perusteella pilaristabiloinnille edullinen

BI

- Painumamitoituksen nykykäytäntö vastaa likimain pohjanvahvistusluokan BI vaatimuksia
- Liukupintatarkastelu voitaisiin tehdä nykykäytännön mukaisesti, kunhan mitoituksessa otetaan huomioon stabilointipilarin, sitä ympäröivän maan ja penkereen väliset vuorovaikutukset sekä stabilointipilarien ja niitä ympäröivän maan välinen jäykkyys
- Haasteena: eurokoodi nimenomaan määrittää, ettei pohjanvahvistusluokkaan BI kuuluvilla vahvisteilla ole mitattavaa yksiaksiaalista puristuslujuutta ja stabilointipilareilla on, vaikka sen mittaaminen ei olekaan käytännöllistä

Kiitos



AFRY