

Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

Nykyinen eurokoodi EN1993-1-1:2005

- Luku 5 - Rakenneanalyysi
 - 5.2 - Kokonaistarkastelu
 - 5.3 - Epätarkkuudet

Uusi eurokoodi EN1993-1-1:2022

- Luku 7 - Structural analysis
 - 7.2 - Global analysis
 - 7.3 - Imperfections

Eki Lehtimäki
Mörkö Engineering Oy

Mörkö Engineering Oy

- Perustettu: Lokakuu 2018
- Henkilöstö: 1

Eki Lehtimäki

- 15 rakennesuunnittelua
- 10 vuotta valmistumisesta
- 5 vuotta yrittäjänä
 - Lisäksi tuntiopettajana Metropolissa (sivutoimi)

mitä Mörkö Engineering tekee:

**Rakenne-
suunnittelu**

**Verkko-
oppiminen
ja
Koulutus**

**Teräs Pertti & Parametrinen /
algoritmiavusteinen rakennesuunnittelu**

Lisäksi:

Tuntiopettaja, Metropolia AMK 2019-2023

teräsrakenteet 1 ja Teräsrakenteet 2

Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

Nykyinen eurokoodi EN1993-1-1:2005

- Luku 5 - Rakenneanalyysi
 - 5.2 - Kokonaistarkastelu
 - 5.3 - Epätarkkuudet

Uusi eurokoodi EN1993-1-1:2022

- Luku 7 - Structural analysis
 - 7.2 - Global analysis
 - 7.3 - Imperfections

*Ekin huomio: **Rakenneanalyysillä** tarkoitetaan tässä yhteydessä **tapaa ottaa ensimmäisen ja toisen kertaluvun vaikutukset huomioon rakenteiden suunnittelussa.***

Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

- Miksi aihe on tärkeä?
- Tärkeät termit:
 - Sivusiirtyvyys, lokaalit ja globaalit toisen kertaluvun vaikutukset, $\alpha_{cr,sw}$
- Menetelmät M0..M5 ja EM lyhyesti
 - (Vuori ja hiihtohissi)
- Sivusiirtyvän rakenteen perusmenetelmät
 - Esimerkki menetelmällä M3
 - Esimerkki menetelmällä EM
 - Mietteitä menetelmistä M3, EM, ja M4-5
- Loppuyhteenvedo myös lopuksi

Miksi uudistukset "Rakenteen kokonaisanalyysissä" ovat niin tärkeitä:

- Ekin käsityksen mukaan suomalaisten rakennesuunnittelijoiden ymmärrys toisen kertaluvun vaikutuksista, sivusiirtyvyydestä, ja stabiilisuudesta ylipäätään **on varsin heikkoa:**
 - Asia on vaikea, melko abstrakti, ja sen selittämiseen on eri maissa ja mantereilla käytetty historiallisesti vähän erilaisia vakiintumattomia termejä
 - Jopa "puhtaassa" matematiikassa on 2 hyvin erilaista selitystapaa: iteratiivinen ja ominaisarvoratkaisuun perustuva
 - **Vanha normi EN1993-1-1:2005 on luvun 5 osalta epäselvä ja käyttää epämääräisiä termejä**
 - Epämääräiset termit on "johdonmukaisuuden vuoksi" otettu sellaisenaan oppikirjoihin, mikä ei kyllä ole helpottanut asian oppimista yhtään

Miksi uudistukset "Rakenteen kokonaisanalyysissä" ovat niin tärkeitä:

- Ekin käsityksen mukaan suomalaisten rakennesuunnittelijoiden ymmärrys toisen kertaluvun vaikutuksista, sivusiirtävyydestä, ja stabiilisuudesta ylipäätään on varsin heikkoa:
 - Asia on vaikea, melko abstrakti, ja selittämiseen on eri maissa ja maantieteellisesti käytetty historiallisesti vähän erilaisia vakiintumattomia termejä
 - Jopa "puhtaassa" matematiikassa on erilaista selitystapaa: iteratiivinen ja ominaisarvoratkaisuun perustuva
 - Vanha normi EN1993-1-1:2005 on luosalta epäselvä ja käyttää epämääräisiä termejä
 - Epämääräiset termit on "johdonmukaisesti otettu sellaisenaan oppikirjoihin, mikä ei kyllä ole helpottanut asian oppimista yhtään

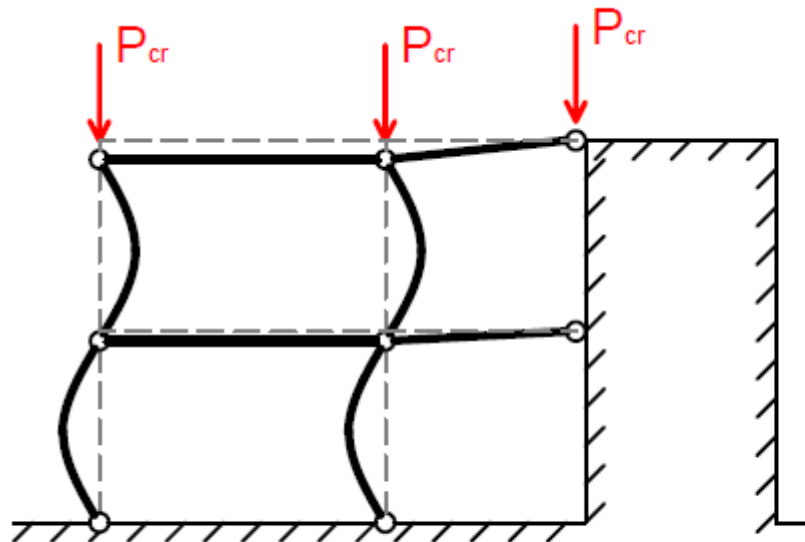
Uudistukset ovat hyviä ja tärkeitä, koska:

- (edes vähän) johdonmukaisempi terminologia helpottaa vaikean ilmiön **ymmärtämistä**, **oppimista** ja **opettamista**
- (jokseenkin) yksiselitteisesti määritellyt termit mahdollistavat **konkreettisen vuoropuhelun** "ymmärryksen eri tasoilla"
 - olevien henkilöitten välillä:
 - Esim. arkkitehti ja rakennesuunnittelija,
 - Esim. staatikko ja talousjohtaja

Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

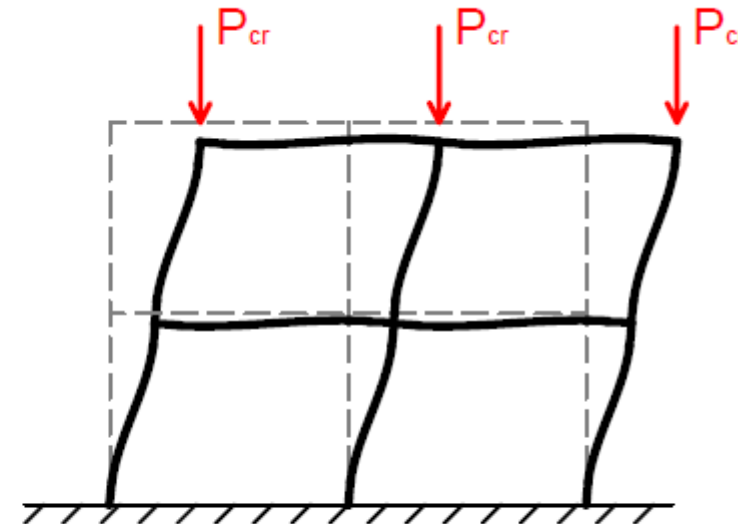
- Loppuyhteenvedo heti alkuun
 - Miksi aihe on tärkeä?
- **Tärkeät termit:**
 - Sivusiirtyvyys, lokaalit ja globaalit toisen kertaluvun vaikutukset, $\alpha_{cr,sw}$
- Menetelmät M0..M5 ja EM lyhyesti
 - (Vuori ja hiihtohissi)
- Sivusiirtyvän rakenteen perusmenetelmät
 - Esimerkki menetelmällä M3
 - Esimerkki menetelmällä EM
 - Mietteitä menetelmistä M3, EM, ja M4-5
- Loppuyhteenvedo myös lopuksi

Sivusiirtyvä ja sivusiirtymätön kehä:



Sivusiirtymättömässä kehässä jäykistysjärjestelmä estää kehan nurkkapisteiden siirtymisen sivulle, vaikka pilarit nurjahahtaisivatkin

- Tavalliset nurjahduskaavat (Teräs 1 –kurssi) ovat voimassa
- Nurjahduspituuden määrittäminen on helppoa



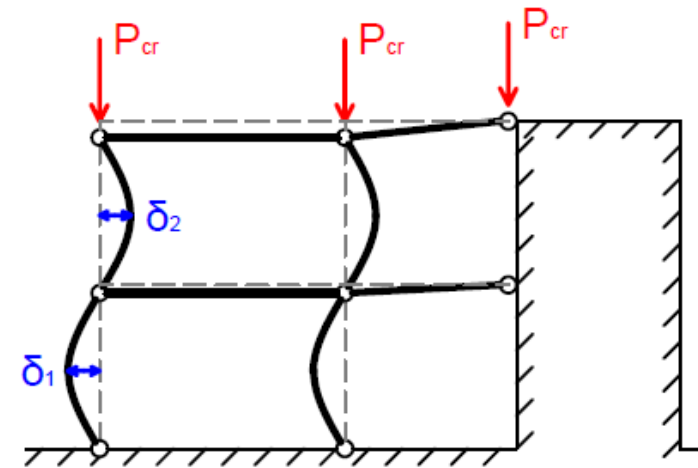
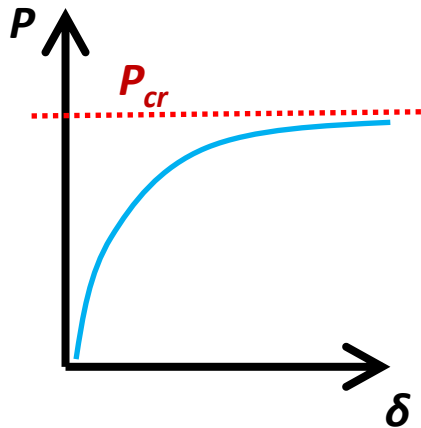
Sivusiirtyvässä kehässä pilarit voivat nurjahahtaa sivulle niin, että kehanurkat siirtyvät sivulle. Jäykistysjärjestelmä ikään kuin osallistuu nurjahdustapahtumaan.

- Tavallisia nurjahduskaavoja (Teräs 1 –kurssi) EI VOI KÄYTTÄÄ, ainakaan lähtökohtaisesti
- Nurjahduspituudet määritetään PALJON MONIMUTKAISEMPIEN TARKASTELOJEN kautta, jos niitä valitussa menettelyssä ylipäätään käytetään.

Toisen kertaluvun vaikutukset:

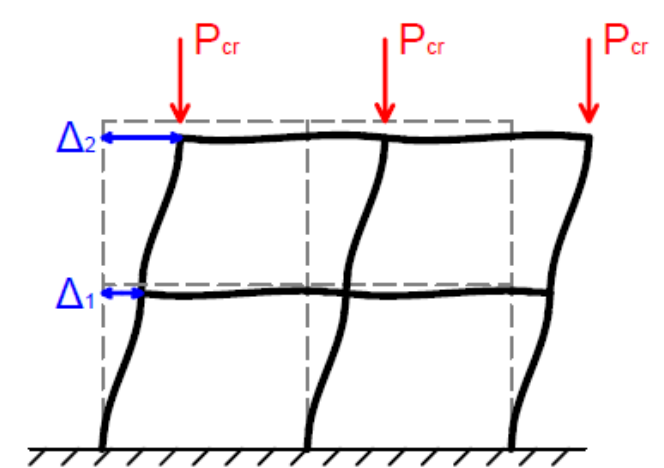
Stabiileetin menetystä voi sanoa myös toisen kertaluvun vaikutukseksi tai $P-\delta$ -vaikutukseksi:

- Ennen kriittistä kuormaa: Mitä suurempi P , sitä suuremmaksi δ kasvaa
- Kriittisen kuorman kohdalla: δ kasvaa äärettömyyteen pienelläkin P :n lisäyksellä



Lokaalit 2. kertaluvun vaikutukset ($P-\delta$ -vaikutukset) **otetaan huomioon Eurokoodin nurjahduskäyrillä**

→ Tulee automaattisesti huomioon otetuksi, ei vaadi toimenpiteitä suunnittelijalta

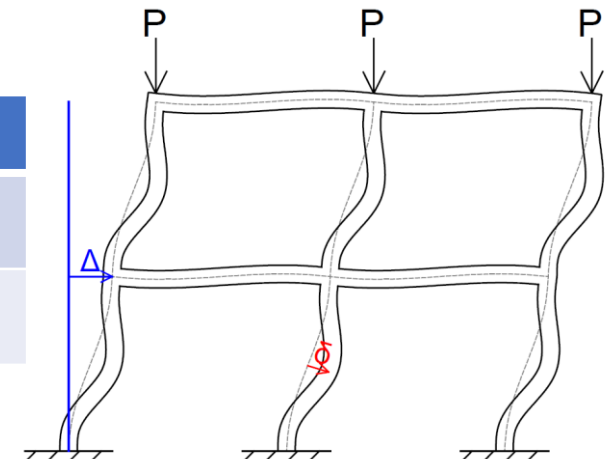


Globaalia 2. kertaluvun vaikutusta ($P-\Delta$ -vaikutusta) **ei voi ottaa huomioon yksinkertaisessa nurjahduskäyrätarkastelussa**

→ Helpot nurjahduskaavat eivät sellaisenaan päde sivusiirtymälle kehälle, jossa $P-\Delta$ -vaikutus on suuri!

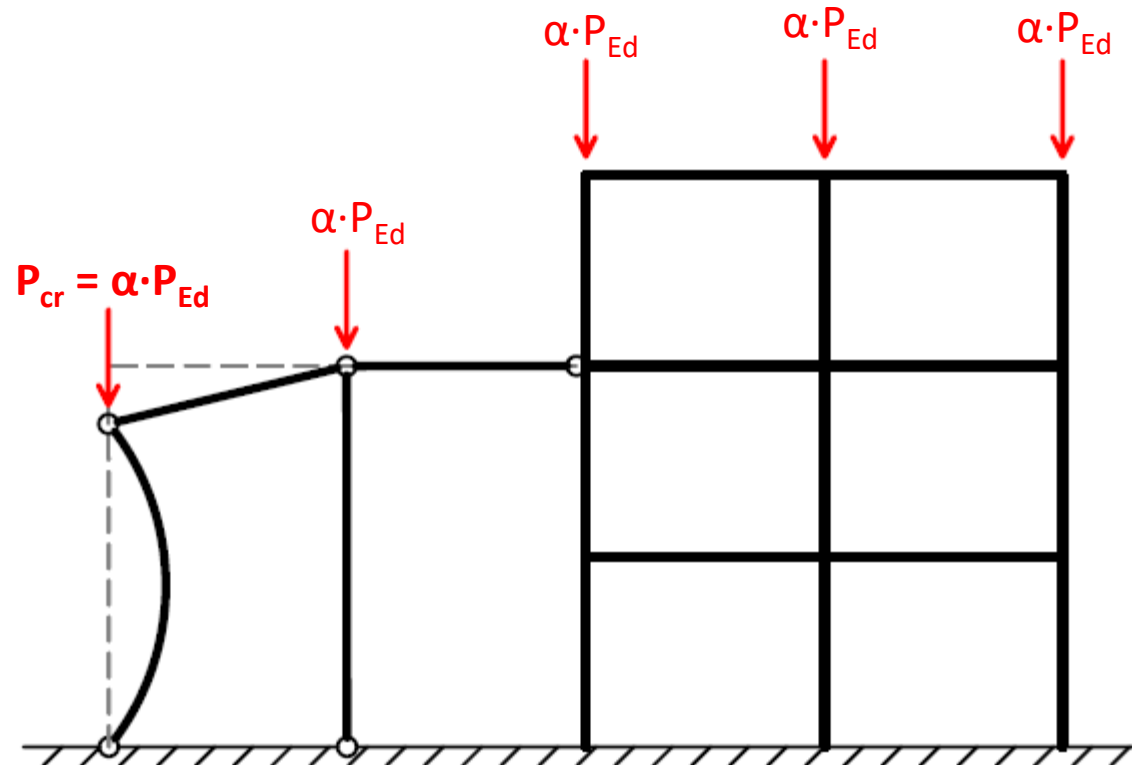
Eräät ulkomaan normit	EN 1993-1-1:2005	EN 1993-1-1:2022
$P-\Delta$ -vaikutus	"Globaali toisen kertaluvun vaikutus"	"2nd order sway-effect "
$P-\delta$ -vaikutus	"Lokaali toisen kertaluvun vaikutus"	"2nd order bow-effect "

MÖRKÖ LEARNING: Teräsrakenteet 2 - Käyttörajatilat sekä Teräsrungon jäykistys



Stabiliteetin menetyksen kerroin α_{cr} :

Sivusiirtymättömien nurjahdusmuotojen kertoimia merkitään $\alpha_{cr.ns}$ (non-sway: sivusiirtymätön)



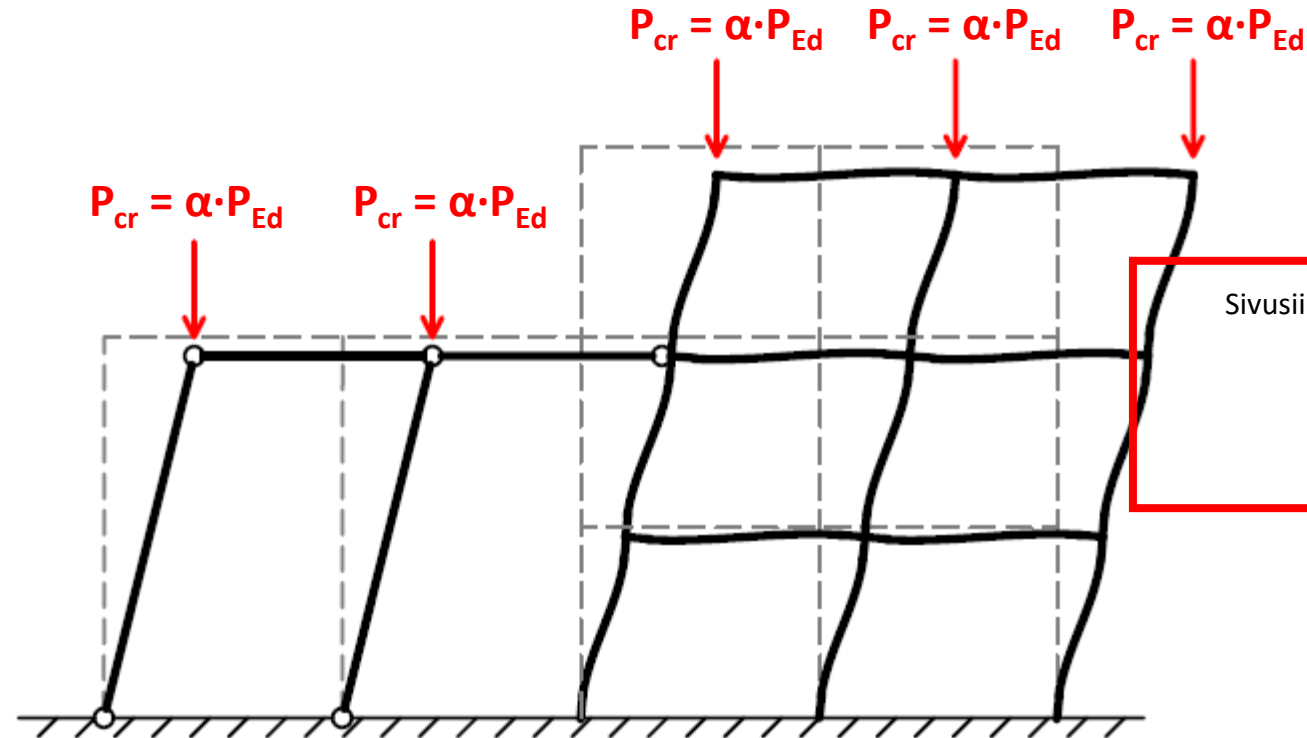
Sivusiirtyvien nurjahdusmuotojen kertoimia merkitään $\alpha_{cr.sw}$ (sway: sivusiirtyvä)

Nurjahdusmuoto	α_{cr}	
Toinen ominaismuoto	$\alpha_{cr.ns} = 3,61$	Paikallinen sivusiirtymätön muoto, ei tarvita jos pilari mitoitetaan nurjahduskäyrää käyttäen
Alin ominaismuoto	$\alpha_{cr.ns} = 3,59$	Paikallinen sivusiirtymätön muoto, ei tarvita jos pilari mitoitetaan nurjahduskäyrää käyttäen

Stabiliteetin menetyksen kerroin α_{cr} :

Sivusiirtymättömien nurjahdusmuotojen kertoimia merkitään

$\alpha_{cr.ns}$
(non-sway: sivusiirtymätön)



Sivusiirtyvien nurjahdusmuotojen kertoimia merkitään

$\alpha_{cr.sw}$
(sway: sivusiirtyvä)

Nurjahdusmuoto

α_{cr}

Kolmas ominaismuoto

$\alpha_{cr.sw} = 8,51$

Alin sivusiirtyvä muoto. Tätä käytetään sivusiirtyvän rakenteen mitoituslaskelmissa!

Toinen ominaismuoto

$\alpha_{cr.ns} = 3,61$

Paikallinen sivusiirtymätön muoto, ei tarvita jos pilari mitoitetaan nurjahduskäyrää käyttäen

Alin ominaismuoto

$\alpha_{cr.ns} = 3,59$

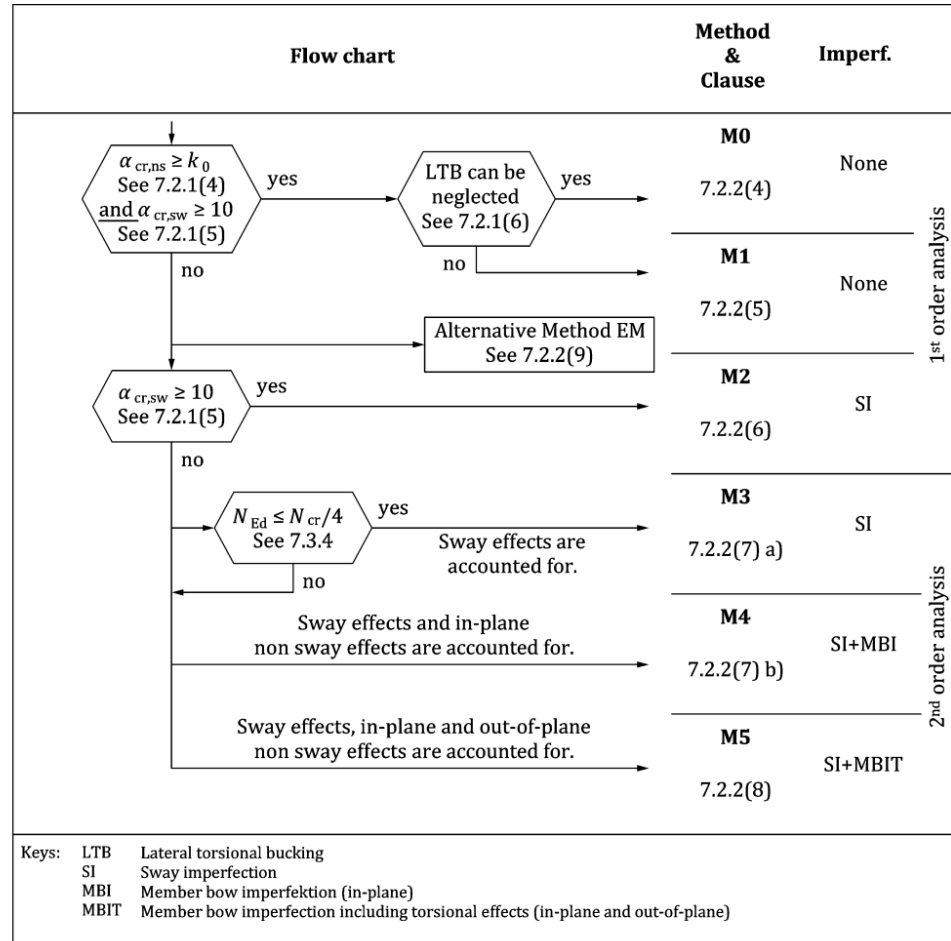
Paikallinen sivusiirtymätön muoto, ei tarvita jos pilari mitoitetaan nurjahduskäyrää käyttäen

Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

- Loppuyhteenvedo heti alkuun
 - Miksi aihe on tärkeä?
- Tärkeät termit:
 - Sivusiirtyvyys, lokaalit ja globaalit toisen kertaluvun vaikutukset, $\alpha_{cr,sw}$
- **Menetelmät M0..M5 ja EM lyhyesti**
 - (Vuori ja hiihtohissi)
- Sivusiirtyvän rakenteen perusmenetelmät
 - Esimerkki menetelmällä M3
 - Esimerkki menetelmällä EM
 - Mietteitä menetelmistä M3, EM, ja M4-5
- Loppuyhteenvedo myös loppuksi

EN 1993-1-1:2022 chapter 7.2.2 Methods of analysis for ultimate limit state design checks:

NOTE Methods M0, M1, M2, M3, M4 and M5 are numerically ordered based on the complexity of the analysis. Method M0 is the least complex and method M5 is the most complex.



Ekin huomio:

Rakenneanalyysillä

tarkoitetaan tässä yhteydessä **tapaa** **ottaa ensimmäisen ja toisen kertaluvun vaikutukset huomioon rakenteiden suunnittelussa.**

Key

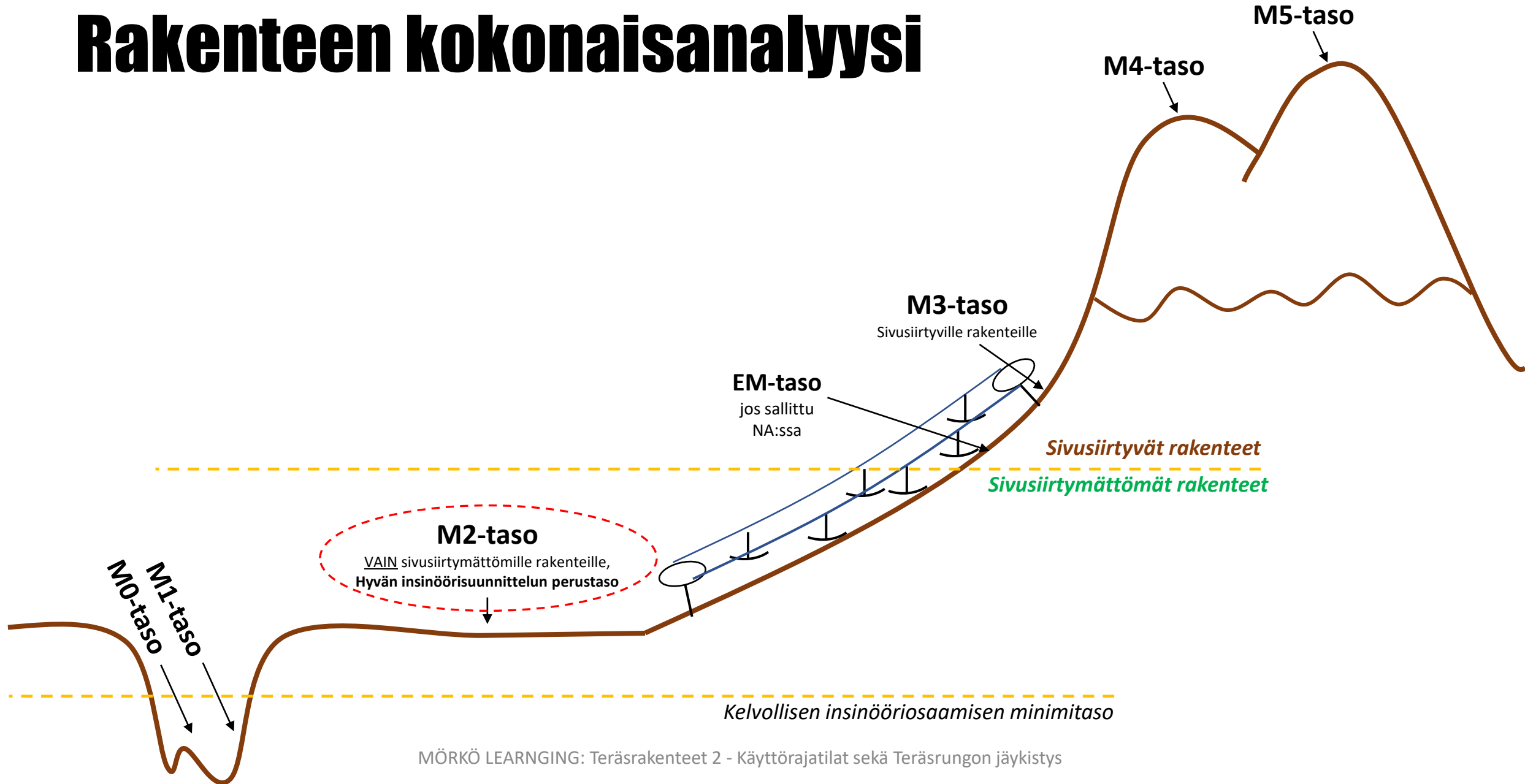
- LTB Lateral torsional buckling
- EM Equivalent member method
- SI Sway imperfection
- MBI Member bow imperfection (in-plane)
- MBIT Member bow imperfection considering lateral torsional buckling (in-plane and out-of-plane)

Figure 7.3 — Methods of structural analysis applicable to ultimate limit state design checks

Menetelmät M0..M5 ja EM lyhyesti

- Menetelmät lyhyesti:
 - **Sivusiirtymättömille (non-sway) rakenteille:**
 - M0 – tyhmä, ei ammattirakentamiseen
 - M1 – tyhmä, ei ammattirakentamiseen
 - **M2 – Nurjahduskäyrän ja yhteisvaikutuskaavan käyttö**, eli tavallinen ammattimainen teräsrakennesuunnittelu
 - **Sivusiirtyville (sway) rakenteille:**
 - **(EM = equivalent member) – Nurjahduspituuden kasvattaminen** ymp. rakenteiden jäykkyys huomioon ottaen
 - Äärimmilleen yksinkertaistettu, helppotajuinen, mitoittaa sauvat periaatteessa oikein mutta **aliarvioi liitosten globaalit 2. kertaluvun momentit** (second order sway effects)!!! Voidaan kieltää kansallisella liitteellä, Suomessa tuskin kielletään...
 - **M3 – Vaakakuormien kasvattaminen $\alpha_{cr,sw}$:n perusteella**
 - Loistava väline sivusiirtyvyyden problematiikan ymmärtämiseen!
 - Hieman työläs koneella ja erittäin työläs käsin laskettaessa
 - Vaatii $\alpha_{cr,sw}$:n ratkaisemista (ominaisarvoratkaisija)
 - Mahdollistaa välitulosten raportoinnin ja tarkastamisen (!)
 - M4 – Geometrisesti epälineaarinen FE-laskenta tasossa, nurjahduskäyrät tasosta ulos.
 - M5 – Geometrisesti epälineaarinen FE-laskenta sekä tasossa että tasosta ulos

Rakenteen kokonaisanalyysi



Rakenteen kokonaisanalyysi

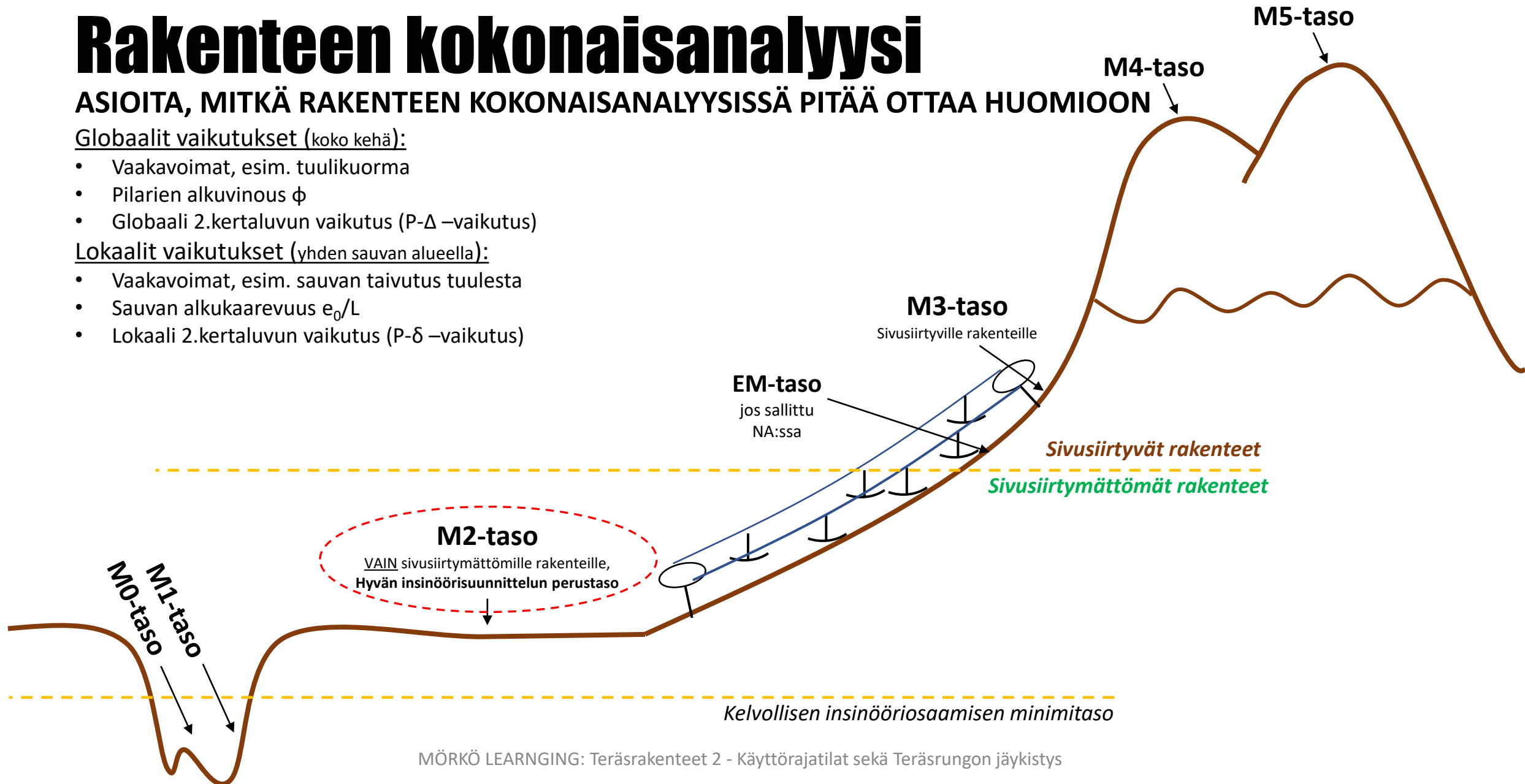
ASIOITA, MITKÄ RAKENTEEN KOKONAISANALYYSISSÄ PITÄÄ OTTAA HUOMIOON

Globaalit vaikutukset (koko kehä):

- Vaakavoimat, esim. tuulikuorma
- Pilarien alkuvinous ϕ
- Globaali 2.kertaluvun vaikutus (P- Δ –vaikutus)

Lokaalit vaikutukset (yhden sauvan alueella):

- Vaakavoimat, esim. sauvan taivutus tuulesta
- Sauvan alkukaarevuus e_0/L
- Lokaali 2.kertaluvun vaikutus (P- δ –vaikutus)



Rakenteen kokonaisanalyysi

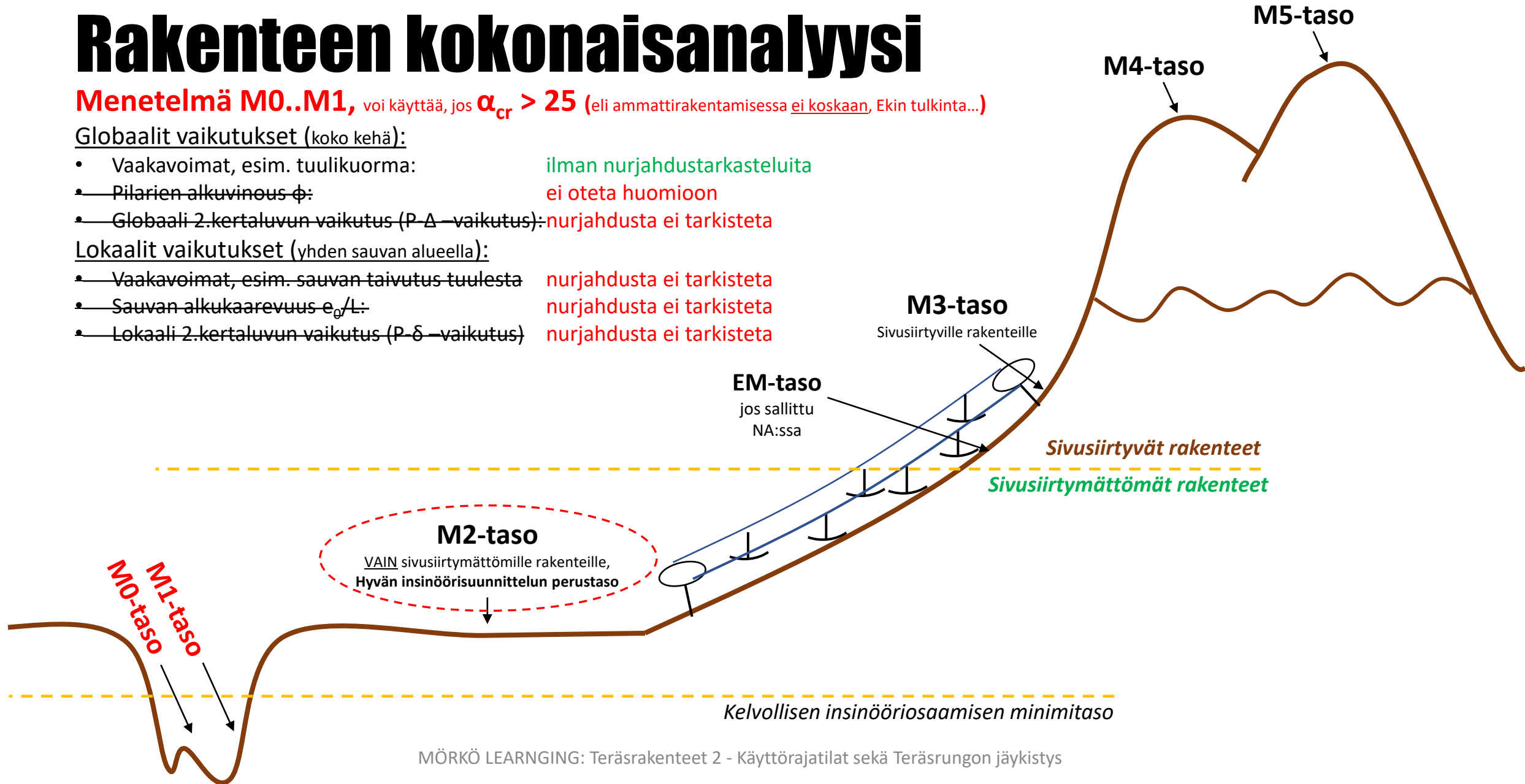
Menetelmä M0..M1, voi käyttää, jos $\alpha_{cr} > 25$ (eli ammattirakentamisessa ei koskaan, Ekin tulkinta...)

Globaalit vaikutukset (koko kehä):

- Vaakavoimat, esim. tuulikuorma: ilman nurjahdustarkasteluita ei oteta huomioon
- Pilarien alkuväntö ϕ : nurjahdusta ei tarkisteta
- Globaali 2.kertaluvun vaikutus (P- Δ -vaikutus): nurjahdusta ei tarkisteta

Lokaalit vaikutukset (yhden sauvan alueella):

- Vaakavoimat, esim. sauvan taivutus tuulesta nurjahdusta ei tarkisteta
- Sauvan alkukaarevuus e_0/L : nurjahdusta ei tarkisteta
- Lokaali 2.kertaluvun vaikutus (P- δ -vaikutus) nurjahdusta ei tarkisteta



Rakenteen kokonaisanalyysi

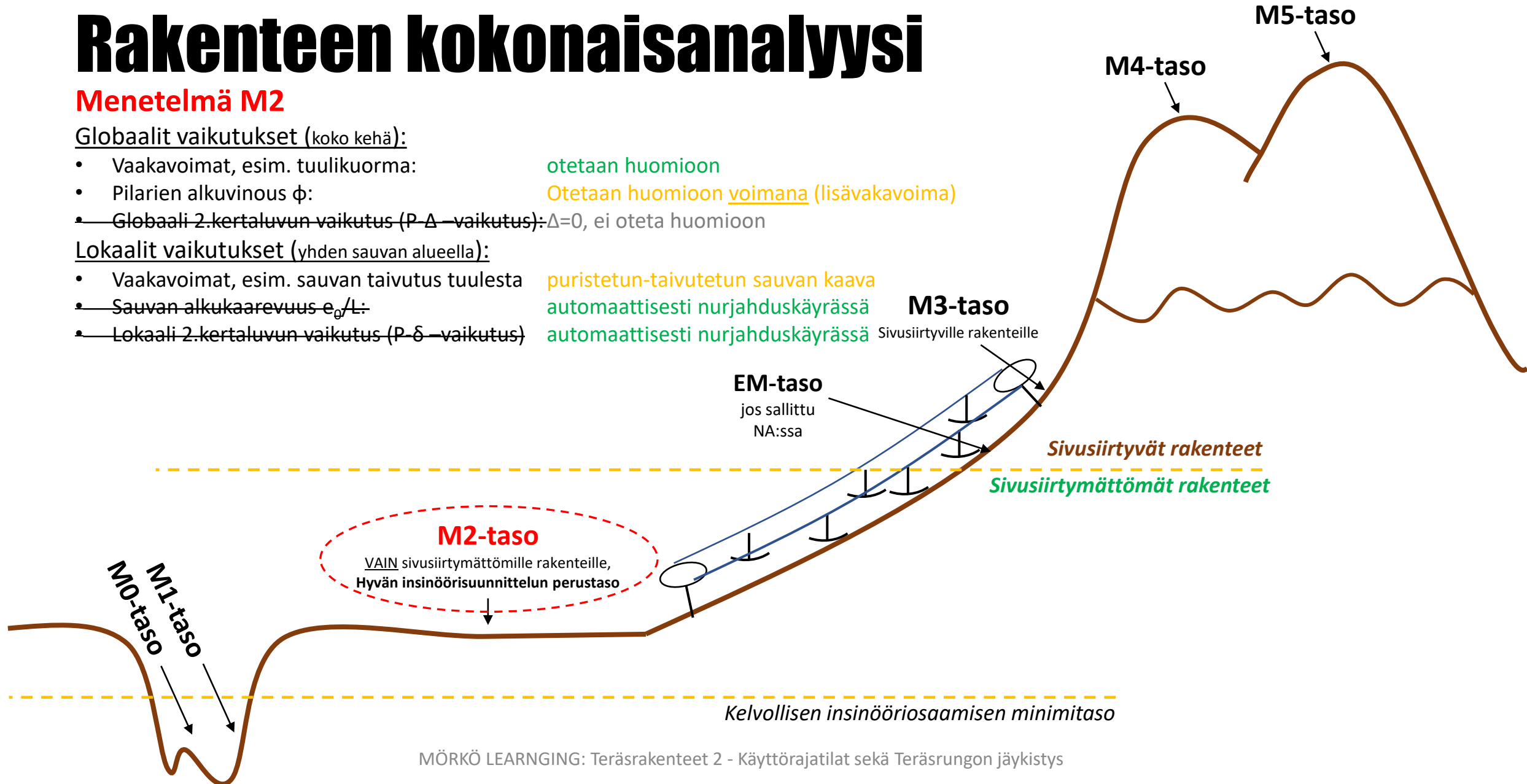
Menetelmä M2

Globaalit vaikutukset (koko kehä):

- Vaakavoimat, esim. tuulikuorma: otetaan huomioon
- Pilarien alkuvinous ϕ : Otetaan huomioon voimana (lisävakavoima)
- ~~Globaali 2.kertaluvun vaikutus (P- Δ -vaikutus): $\Delta=0$, ei oteta huomioon~~

Lokaalit vaikutukset (yhden sauvan alueella):

- Vaakavoimat, esim. sauvan taivutus tuulesta: puristetun-taivutetun sauvan kaava
- ~~Sauvan alkukaarevuus e_0/L :~~ automaattisesti nurjahduskäyrässä
- ~~Lokaali 2.kertaluvun vaikutus (P- δ -vaikutus):~~ automaattisesti nurjahduskäyrässä



Rakenteen kokonaisanalyysi

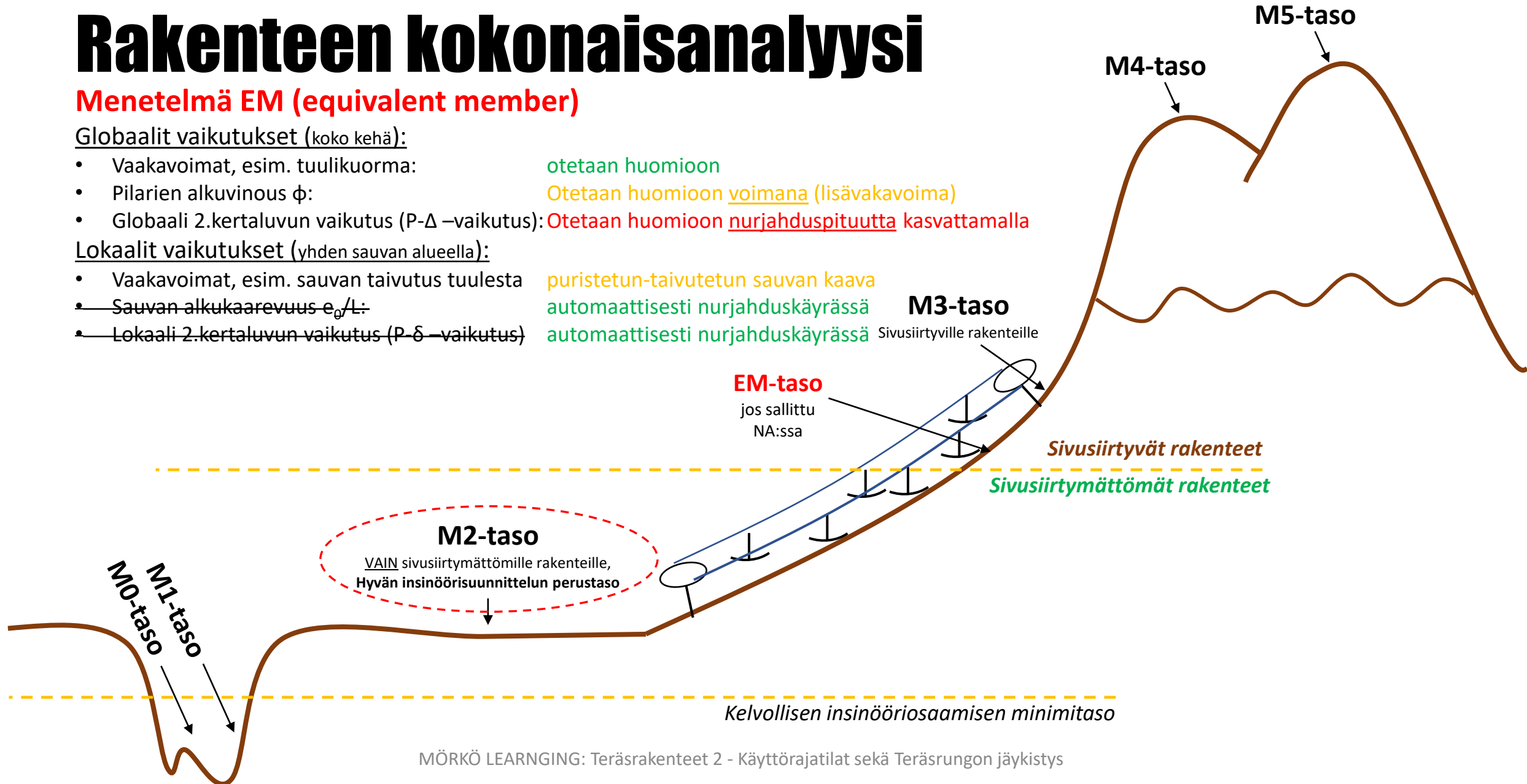
Menetelmä EM (equivalent member)

Globaalit vaikutukset (koko kehä):

- Vaakavoimat, esim. tuulikuorma: otetaan huomioon
- Pilarien alkuvinous ϕ : Otetaan huomioon voimana (lisävakavoima)
- Globaali 2.kertaluvun vaikutus ($P-\Delta$ -vaikutus): Otetaan huomioon nurjahduspituutta kasvattamalla

Lokaalit vaikutukset (yhden sauvan alueella):

- Vaakavoimat, esim. sauvan taivutus tuulesta puristetun-taivutetun sauvan kaava
- Sauvan alkukaarevuus e_0/L : automaattisesti nurjahduskäyrässä
- Lokaali 2.kertaluvun vaikutus ($P-\delta$ -vaikutus): automaattisesti nurjahduskäyrässä



Rakenteen kokonaisanalyysi

Menetelmä M3

Globaalit vaikutukset (koko kehä):

- Vaakavoimat, esim. tuulikuorma:
- Pilarien alkuvuonous ϕ :
- Globaali 2.kertaluvun vaikutus (P- Δ -vaikutus):

otetaan huomioon

Otetaan huomioon voimana (lisävakavoima)

Otetaan huomioon 1.kertaluvun vaakakuormaa kasvattamalla

Lokaalit vaikutukset (yhden sauvan alueella):

- Vaakavoimat, esim. sauvan taivutus tuulesta
- Sauvan alkukaarevuus e_0/L :
- Lokaali 2.kertaluvun vaikutus (P- δ -vaikutus)

puristetun-taivutetun sauvan kaava

automaattisesti nurjahduskäyrässä

automaattisesti nurjahduskäyrässä

Sivusiirtyville rakenteille

M3-taso

EM-taso

jos sallittu
NA:ssa

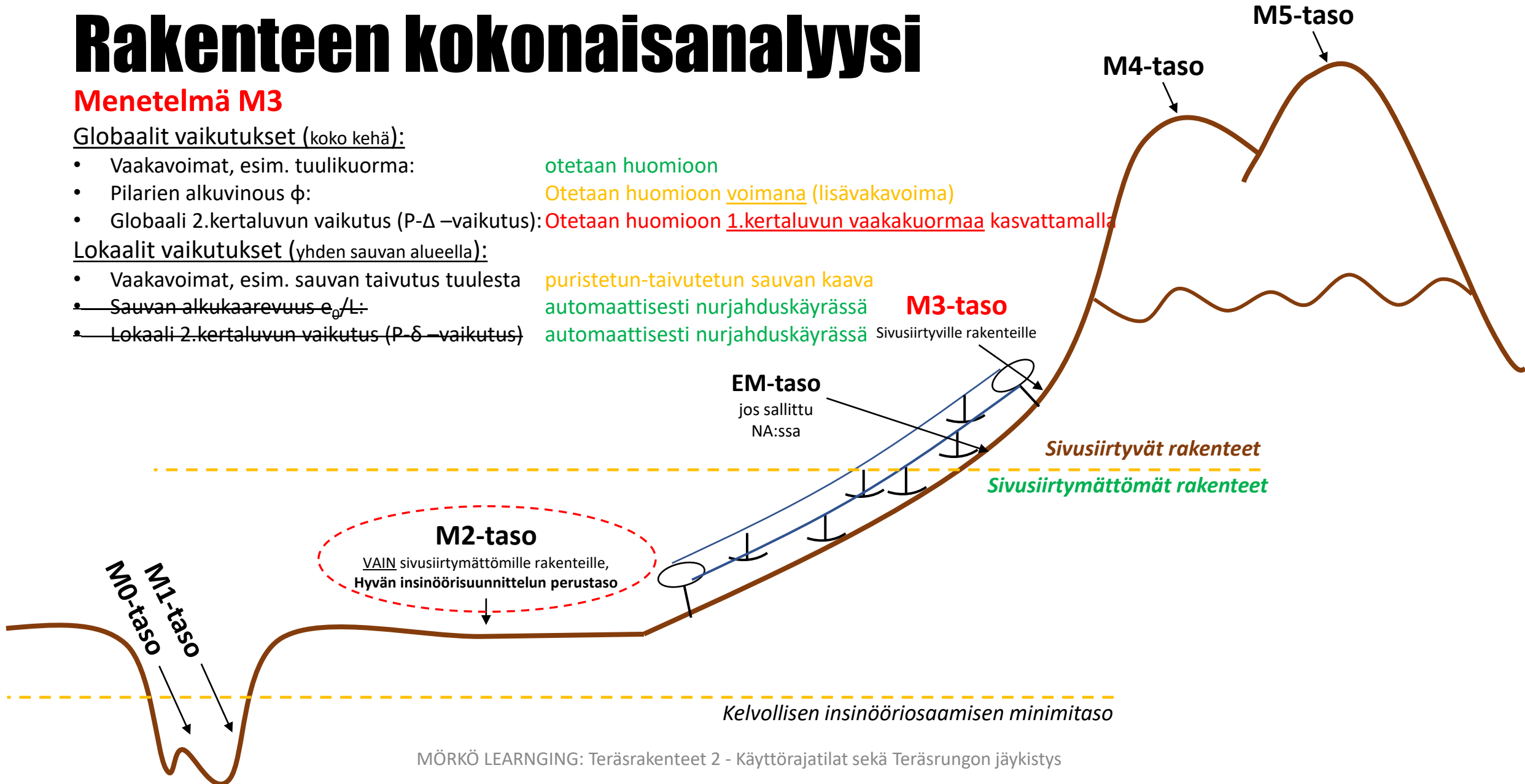
Sivusiirtyvät rakenteet

Sivusiirtymättömät rakenteet

M2-taso

VAIN sivusiirtymättömille rakenteille,
Hyvän insinöörisuunnittelun perustaso

Kelvollisen insinööriosaamisen minimitaso



Rakenteen kokonaisanalyysi

Menetelmä M4...M5

Globaalit vaikutukset (koko kehä):

- Vaakavoimat, esim. tuulikuorma:
- Pilarien alkuvinous ϕ :
- Globaali 2.kertaluvun vaikutus (P- Δ –vaikutus):

otetaan huomioon

Otetaan huomioon geometrisena alkuhäiriönä epälineaarisisessa / iteratiivisessa laskennassa

Otetaan huomioon geometrisena alkuhäiriönä epälineaarisisessa / iteratiivisessa laskennassa

Lokaalit vaikutukset (yhden sauvan alueella):

- Vaakavoimat, esim. sauvan taivutus tuulesta
- Sauvan alkukaarevuus e_0/L :
- Lokaali 2.kertaluvun vaikutus (P- δ –vaikutus)

Tarkistetaan jännitykset epälineaarisisessa mallissa, nurjahduskaavoja ei tarvita, (paitsi M4 tasolla tarvitaan välän...)

Otetaan huomioon geometrisena alkuhäiriönä epälineaarisisessa / iteratiivisessa laskennassa

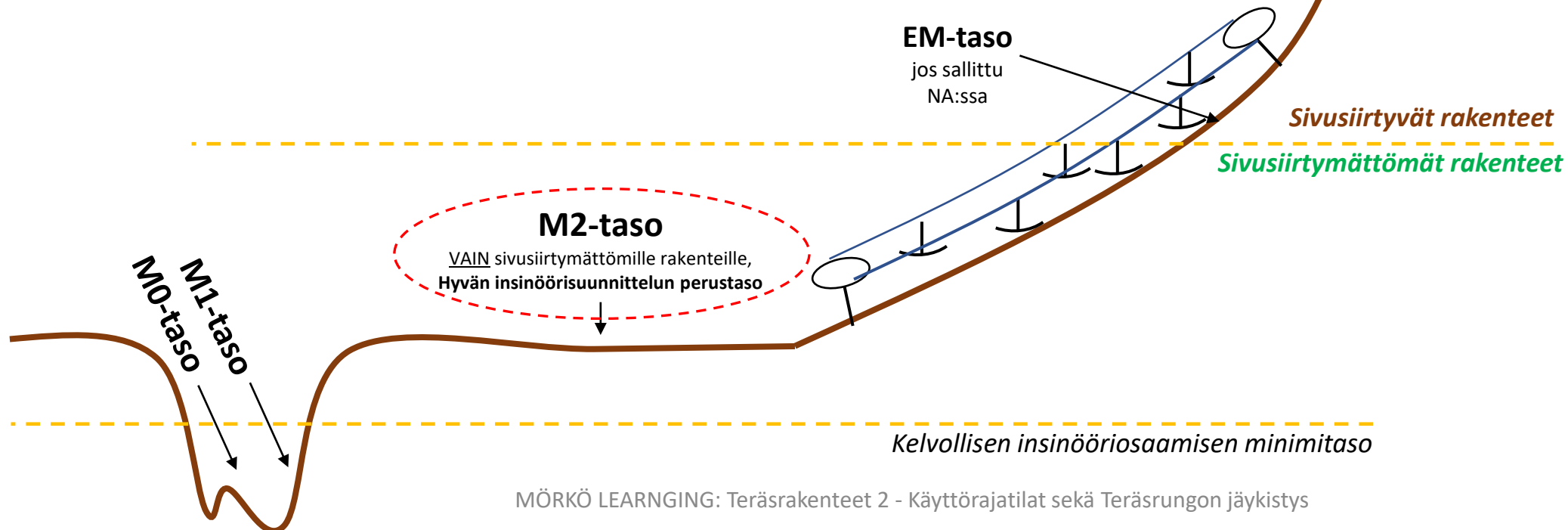
Otetaan huomioon geometrisena alkuhäiriönä epälineaarisisessa / iteratiivisessa laskennassa

M4-taso

Epälin.FEM tasossa (2D)
Nurjahduskäyrät tasosta ulos (??)

M5-taso

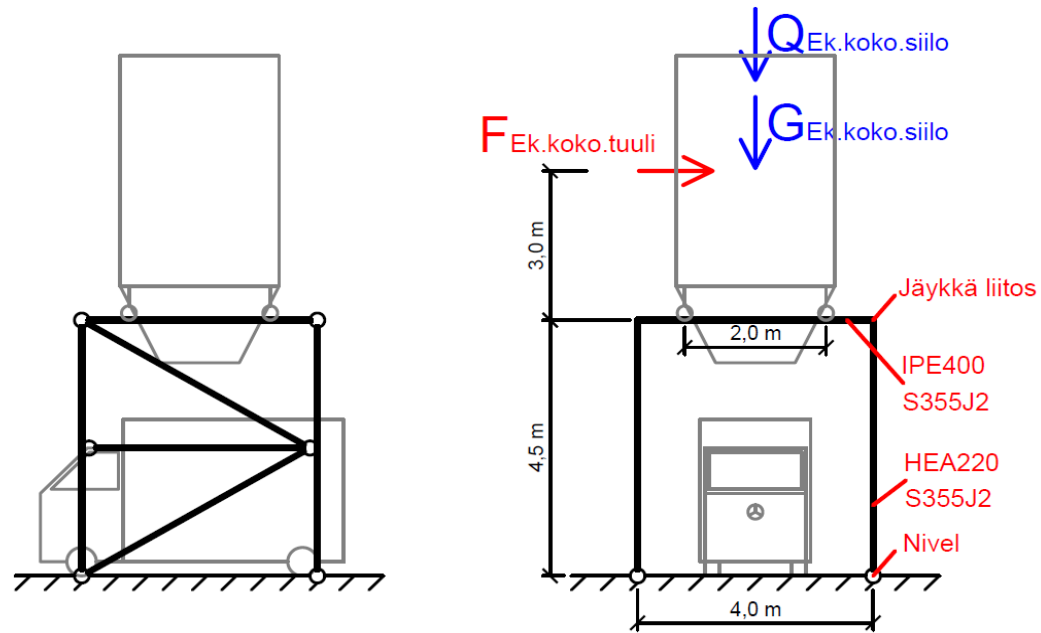
Epälin.FEM tasossa (2D)
Epälin.FEM FEM tasosta ulos (2D -> 3D)



Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

- Loppuyhteenveto heti alkuun
 - Miksi aihe on tärkeä?
- Tärkeät termit:
 - Sivusiirtyvyys, lokaalit ja globaalit toisen kertaluvun vaikutukset, $\alpha_{cr,sw}$
- Menetelmät M0..M5 ja EM lyhyesti
 - (Vuori ja hiihtohissi)
- **Sivusiirtyvän rakenteen perusmenetelmät**
 - **Esimerkki menetelmällä M3**
 - Esimerkki menetelmällä EM
 - Mietteitä menetelmistä M3, EM, ja M4-5
- Loppuyhteenveto myös loppuksi

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”



Koko rakenteen kuormat:

$F_{Ek,koko.tuuli}$	=	40	kN
$Q_{Ek,koko.siilo}$	=	400	kN
$G_{Ek,koko.siilo}$	=	200	kN

Hyötykuormien ψ_0 -kertoimet

$\psi_{0,tuuli}$	=	0,60
$\psi_{0,siilo}$	=	1,00

Kuvan siilon alle pitää mahtua ajamaan rekka, joten siilon tukirakenne on onnistuttu jäykistämään sivusiirtymättömäksi vain toisessa suunnassa vinositeiden avulla.

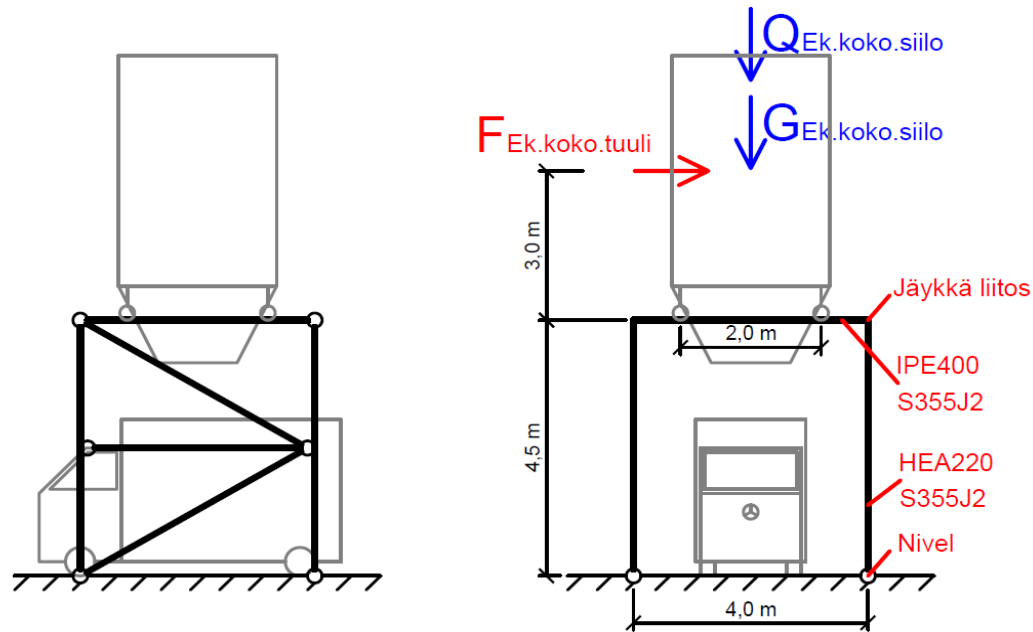
Toiseen suuntaan tukirakenne toimii jäykällä nurkkaliitoksilla jäykistettynä portaalikehänä.

Tutki, onko rakenne portaalikehän tasossa sivusiirtyvä. Jos on, ratkaise 2. kertaluvun (P- Δ) vaikutukset 1. kertaluvun vaikutuksia korottamalla ja mitoita pilari käyttäen ”menetelmää M3”.

Ratkaisun eteneminen menetelmässä M3:

- Kuormat ja statiikka (1. kertaluku):**
 - Lasketaan kuormat, myös vaakakuormat
 - Määritetään pilarien alkuvinous ϕ ja lasketaan vinoudesta johtuva lisävaakavoima
 - Ratkaistaan statiikka -> saadaan 1.kertaluvun voimasuureet
- 2. kertaluvun vaikutukset**
 - Ratkaistaan jokaiselle kuormitusyhdistelmälle $\alpha_{cr,sw}$ erikseen
 - Joko FEM-ominaisarvoratkaisijalla
 - Tai eurokoodin likiarvokaavalla
 - Lasketaan likiarvo 2.kertaluvun voimasuureille
 - Kaikkia 1.kertaluvun kuormia korotetaan kertoimella $k_{sw} = 1/(1-1/\alpha_{cr,sw})$
- Jäykistävien rakenteitten (= pilareitten) mitoitus**
 - Käytetään puristetun-taivutetun pilarin kaavoja seuraavasti:
 - Voimasuureet ovat korotettuja 2.kertaluvun suureita
 - Nurjahduspituus sivusiirtyvään suuntaan on systeempipituus eli $L_{cr} = 1L$ -> sitä ei kasvateta, koska P- Δ -vaikutus on otettu jo huomioon kuormaa kasvattamalla

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”



Koko rakenteen kuormat:

$$F_{Ek,koko.tuuli} = 40 \text{ kN}$$

$$Q_{Ek,koko.siilo} = 400 \text{ kN}$$

$$G_{Ek,koko.siilo} = 200 \text{ kN}$$

Hyötykuormien ψ_0 -kertoimet

$$\psi_{0,tuuli} = 0,60$$

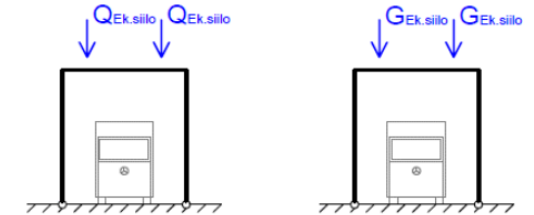
$$\psi_{0,siilo} = 1,00$$

Ratkaistaan yhteen kehärakenteeseen kohdistuvat kuormat:

Siilon kuormat jakaantuvat tasan neljälle tukijalalle, joista 2 kuormittaa yhtä kehää:

$$Q_{Ek,siilo} = Q_{Ek,koko.siilo} / 4 = 100 \text{ kN}$$

$$G_{Ek,siilo} = G_{Ek,koko.siilo} / 4 = 50 \text{ kN}$$



Siilon tuulikuormasta puolet tulee kummallekin portaalikehälle, ja siitä edelleen puolet menee yhden jalan kautta. Tuulikuorma vaikuttaa paljon jalkojen tasoa ylempänä - tästä aiheutuu epäkeskisyyssmomentti ja edelleen yhtä tukijalaa puristava ja toista vetävä voimapari, jonka suuruus voidaan ratkaista siilon vapaakappalekuvasta.

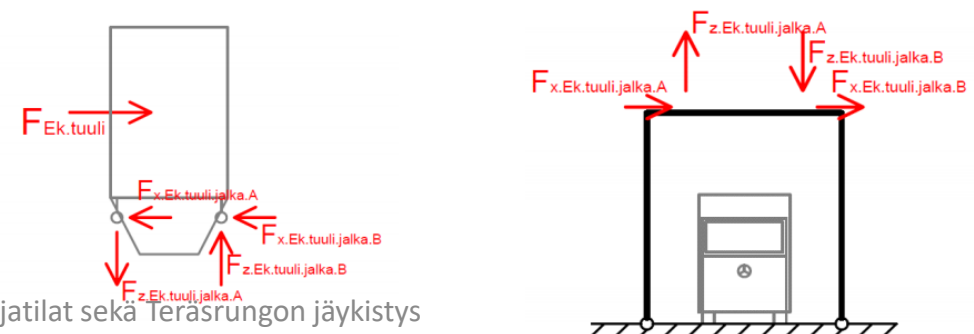
$$F_{x,Ek,tuuli,jalkaA} = F_{Ek,koko.tuuli} / 4 = 10 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ek,tuuli,jalkaA} = -3\text{m}/2\text{m} * F_{Ek,koko.tuuli} / 2 = -30 \text{ kN} \quad (*)$$

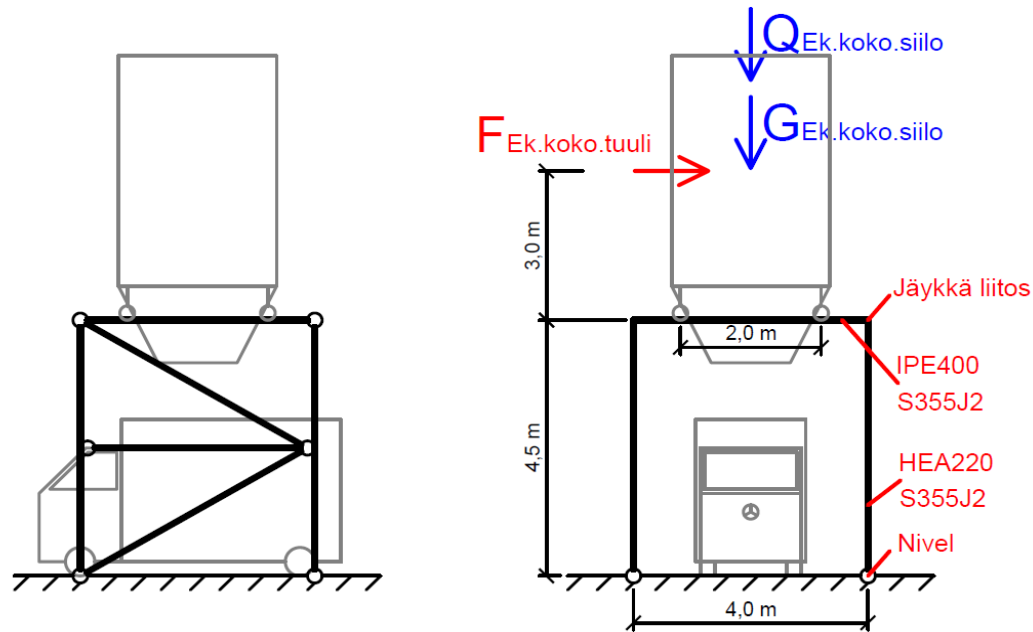
$$F_{x,Ek,tuuli,jalkaB} = F_{Ek,koko.tuuli} / 4 = 10 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ek,tuuli,jalkaB} = +3\text{m}/2\text{m} * F_{Ek,koko.tuuli} / 2 = 30 \text{ kN} \quad (*)$$

*) Merkintätapa tässä: Painovoima positiivista, noste negatiivista



ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”



Koko rakenteen kuormat:

$F_{Ek,koko.tuuli}$	=	40	kN
$Q_{Ek,koko.siilo}$	=	400	kN
$G_{Ek,koko.siilo}$	=	200	kN

Hyötykuormien ψ_0 -kertoimet

$\psi_{0,tuuli}$	=	0,60
$\psi_{0,siilo}$	=	1,00

Pilarien alkuvinoudesta johtuvat lisävaakavoimat:

Pilarien korkeudesta johtuva alkuvinouden pienennystekijä: $\alpha_h = 2/\sqrt{h} = 2/\sqrt{4,5\text{m}} = 0,943$

Pilarien lukumäärästä m johtuva pien.tekijä: $\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + 1/m)} = \sqrt{0,5 * (1 + 1/2)} = 0,866$

m = 2 kpl

Globaali ekvivalentti alkuvinous:

$$\phi = \frac{\alpha_m \alpha_h}{200} = 0,004082$$

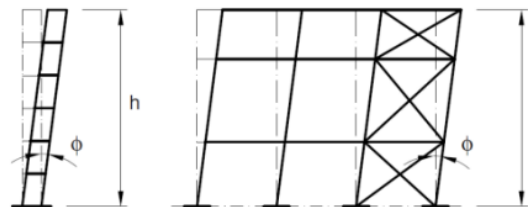
Yhteen pilariin kohdistuva lisävaakavoima: Karakteristinen osuus hyötykuormasta:

$$F_{\phi,Q,Ek} = \phi Q_{Ek,siilo} = 0,41 \text{ kN}$$

Yhteen pilariin kohdistuva lisävaakavoima: Karakteristinen osuus rakenteen painosta:

$$F_{\phi,G,Ek} = \phi G_{Ek,siilo} = 0,20 \text{ kN}$$

(Huom! Koko kehään kohdistuu kahden pilarin lisävaakavoima, ja kehän suunnittelu on tehtävä lisävaakavoiman suunnitteluarvolla $F_{\phi,Q,Ed}$ eikä karakteristisella arvolla)

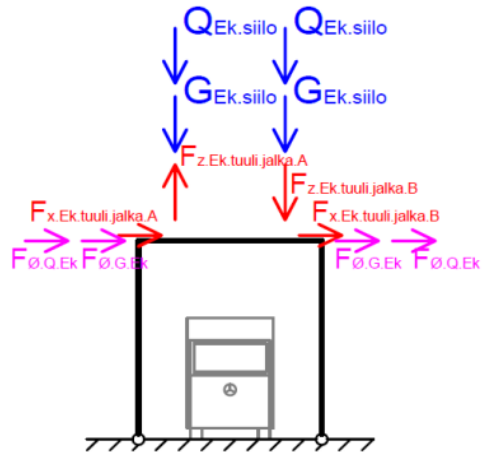


ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”

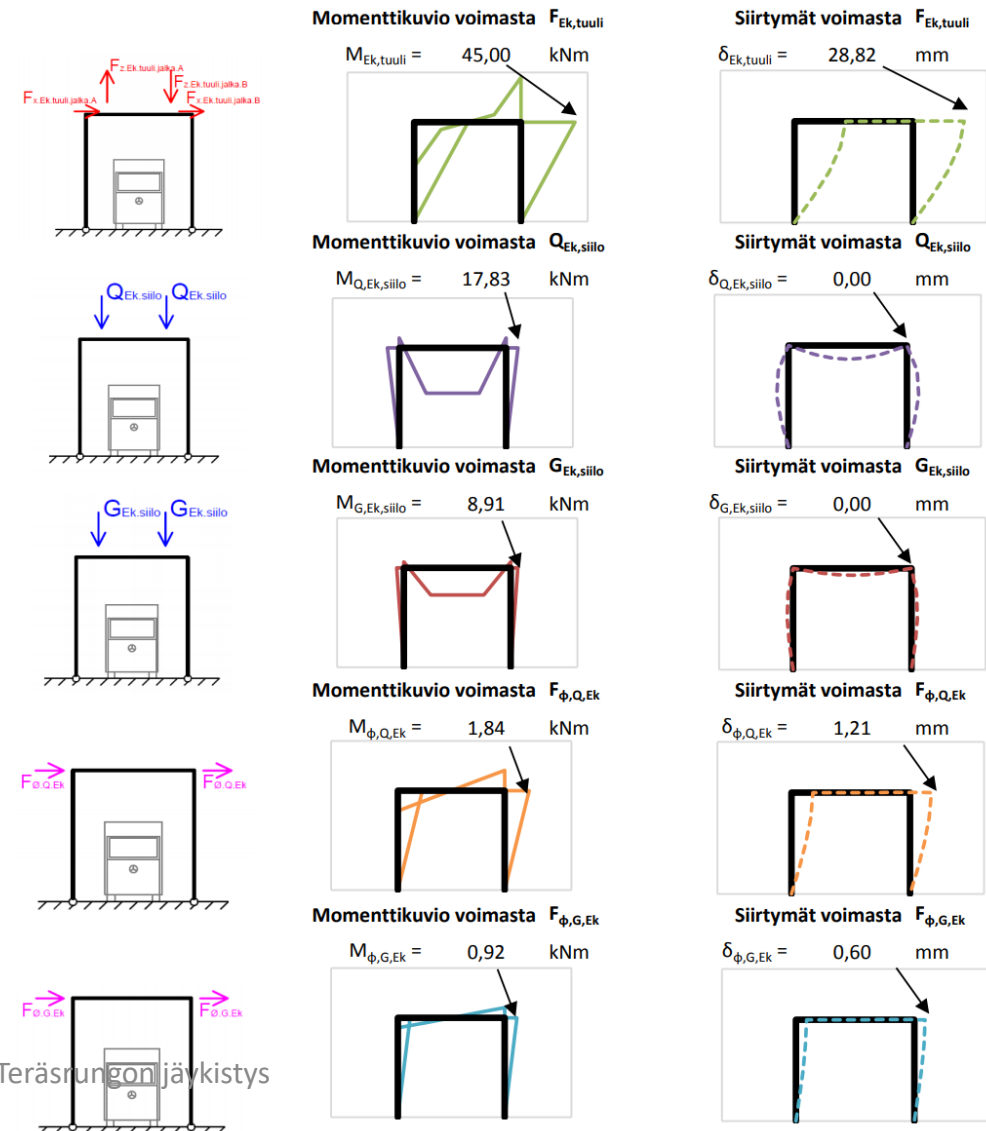
Ensimmäisen kertaluvun momenttikuviot ja siirtymät (karakteristisilla arvoilla)

Ensimmäisen kertaluvun siirtymien ja sisäisten voimasuureitten ratkaisu

Rakenne on staattisesti määräämätön, ja sivusiirtyvyyden sekä α_{cr} :n määrittämisessä tarvitaan tarkkoja siirtymätietoja. --> Statiikka lienee helpointa ratkaista elementtimenetelmällä (FEM).



Varsinainen FEM-ratkaisu
(jäykkymatriisin muodostaminen ja kääntematriisin ratkaiseminen)
sivuuetaan tässä, hypätään suoraan tuloksiin.



ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”

Tarkasteltavan kuormitusyhdistelmän valinta

Hyötykuormien ψ_0 -kertoimet

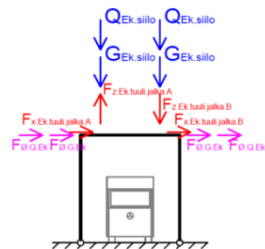
$$\psi_{0,tuuli} = 0,60$$

$$\psi_{0,siilo} = 1,00$$

Koska siilon hyötykuorman yhdistelykerroin on ykkönen, tulee pilarien nurjahdustarkastelussa väistämättä mitoittavaksi yhdistelmä, jossa tuuli on määräävä ja siilokuorma ei-määräävä. Muita yhdistelmiä ei tässä esimerkissä tarvitse tarkastella (ja niiden tarkastelussa olisikin aika kova työ...)

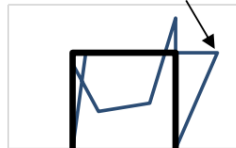
Tarkasteltava murtorajatilan kuormitusyhdistelmä:

ULS 1 - Tuulikuorma määräävä: $X_{Ed} = 1,15 X_{G,Ek} + 1,5 X_{Ek,tuuli} + 1,5 \psi_{0,siilo} X_{Ek,siilo}$



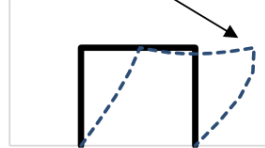
1.krtl. momenttikuvio yhdistelmässä ULS1

$$M_{Ed,ULS1} = 108,31 \text{ kNm}$$



1.krtl. siirtymät yhdistelmässä ULS1

$$\delta_{ULS1} = 45,73 \text{ mm}$$



1.kertaluvun momentti vahvaan suuntaan pilarin päässä:

$$M_{y,Ed,1krt} = 1,15 M_{G,Ek} + 1,15 M_{\phi,G,Ek} + 1,5 M_{Ek,tuuli} + 1,5 \psi_{0,siilo} M_{Ek,siilo} + 1,5 \psi_{0,siilo} M_{\phi Ek,siilo} =$$

$$1,15 \cdot 8,91 \text{ kNm} + 1,15 \cdot 0,92 \text{ kNm} + 1,5 \cdot 45 \text{ kNm} + 1,5 \cdot 1 \cdot 17,83 \text{ kNm} + 1,5 \cdot 1 \cdot 1,84 \text{ kNm} =$$

$$108,3 \text{ kNm}$$

Pilarin normaalivoima:

Tarkasteltava kuormitusyhdistelmä: ULS 1 - Tuulikuorma määräävä

Normaalivoimat FEM-ratkaisusta (karakteristisia arvoja)

$$N_{Ek,tuuli} = 37,5 \text{ kN}$$

$$N_{Q,Ek,siilo} = 100 \text{ kN}$$

$$N_{G,Ek,siilo} = 50 \text{ kN}$$

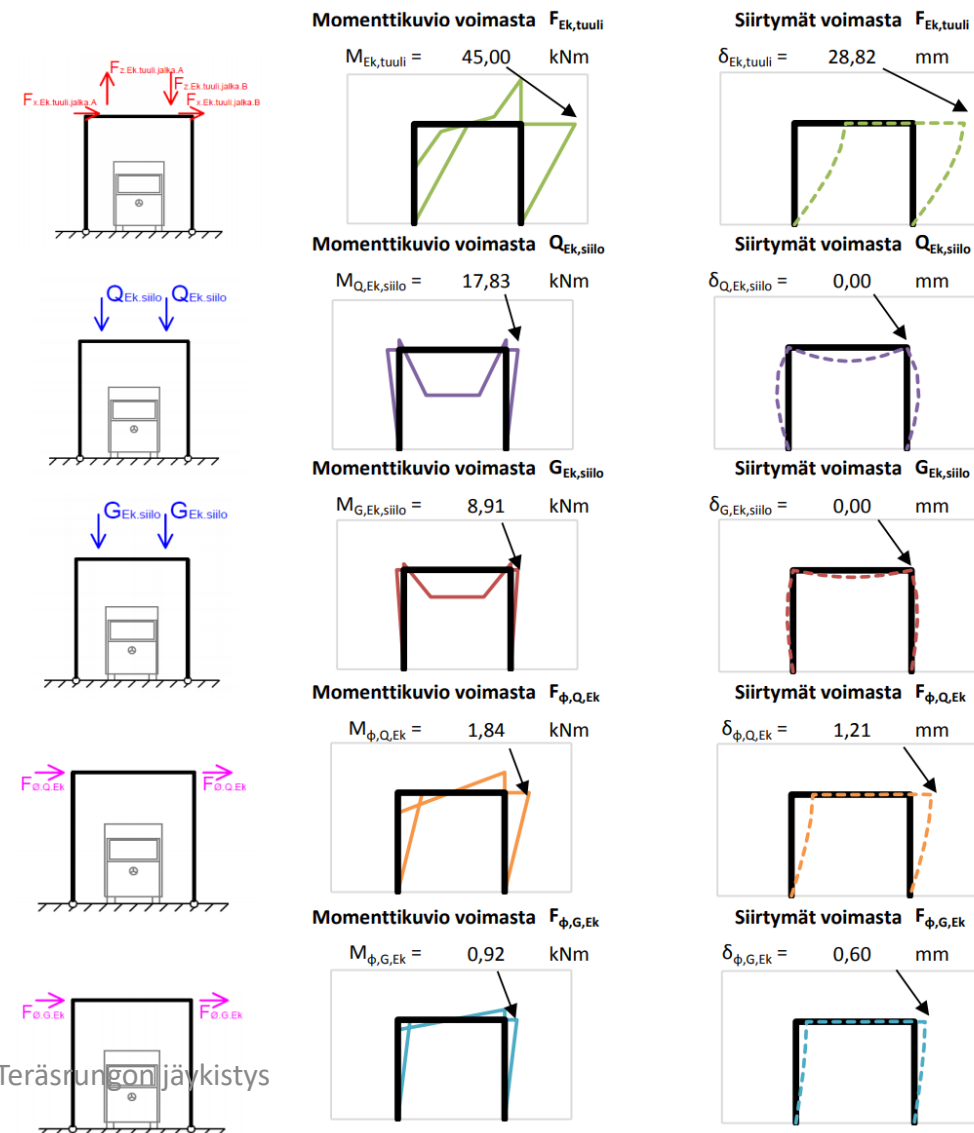
$$N_{\phi,Q,Ek} = 0,919 \text{ kN}$$

$$N_{\phi,G,Ek} = 0,459 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,ULS1} = 1,15 N_{G,Ek} + 1,15 N_{\phi,G,Ek} + 1,5 N_{Ek,tuuli} + 1,5 \psi_{0,siilo} N_{Ek,siilo} + 1,5 \psi_{0,siilo} N_{\phi Ek,siilo} =$$

$$265,7 \text{ kN}$$

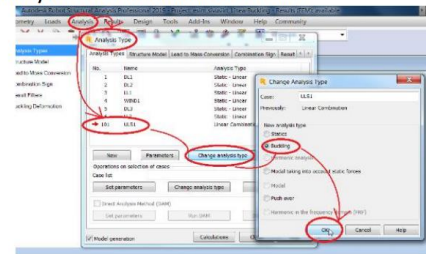
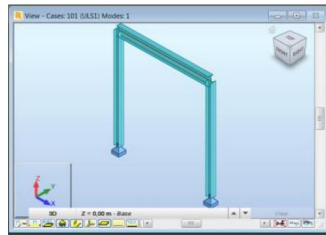
Ensimmäisen kertaluvun momenttikuviot ja siirtymät (karakteristisilla arvoilla)



ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”

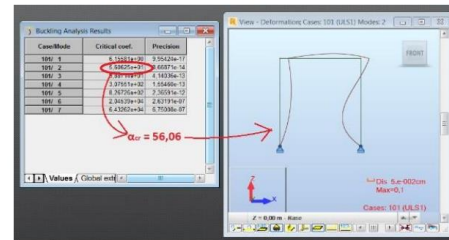
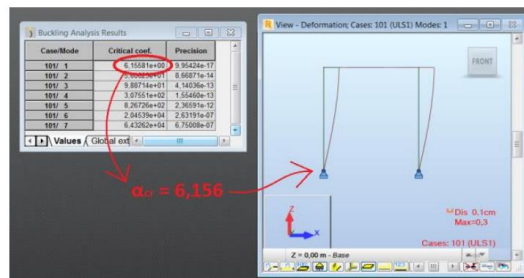
Kokonaistabiliteetin menetykseen liittyvän kertoimen α_{cr} tarkka määrittäminen elementtimenetelmän ominaisarvotehtävänä

1. Rakenne kuormineen ja yhdistelyineen on mallinnettu Autodesk Robot Structural -ohjelmassa
2. Kuormitusyhdistelmälle ULS 1 on ratkaistu Robotissa "Linear Buckling" -nimellä oleva stabiliteetin menetyksen ominaisarvotehtävä.



3. Ominaisarvotehtävän tuloksena saadaan 7 ominaismuotoa ja niihin liittyvät kriittiset kertoimet α_{cr} . Pienimmän α_{cr} :n ($\alpha_{cr} = 6,156$) antavaa muotoa sanotaan alimmaksi ominaismuodoksi. Tässä tapauksessa se näyttää järkevältä sivusiirtyvän kehän nurjahdusmuodolta, joten sitä käytetään suunnittelussa nurjahdusmuotona.

4. Löytyy myös 6 muuta teoreettista ominaismuotoa, joihin liittyvä α_{cr} on paljon isompi, ja joiden nurjahdusmuoto vaikuttaa kovin epärealistiselta. Tässä tapauksessa alin ominaismuoto vastasi sivusiirtyvän kehän nurjahdusta.



JOHTOPÄÄTÖS: FEM ohjelman ominaisarvoratkaisijalla saatu tarkka α_{cr} :

$$\alpha_{cr.FEM} = 6,156$$

Kimmoteorialla laskettaessa:

$\alpha_{cr} \geq 10$ --> Kehä on sivusiirtymätön

$\alpha_{cr} < 10$ --> Kehä on sivusiirtyvä

Johtopäätös: Tämä kehä on sivusiirtyvä! Muista P-Δ -vaikutus!

MÖRKÖ LEARNING: Teräsrakenteet 2 - Käyttörajatilat sek

Valitaan määrävä kuormitusyhdistelmä (tai lasketaan $\alpha_{cr,sw}$ kaikille yhdistelmille erikseen)

Ratkaistaan $\alpha_{cr,sw}$ FEM-ohjelman ominaisarvoratkaisijalla

Ratkaisun eteneminen menetelmässä M3:

- Kuormat ja statiikka (1. kertaluku):**
 - Lasketaan kuormat, myös vaakakuormat
 - Määritetään pilarien alkuvinous ϕ ja lasketaan vinoudesta johtuva lisävaakavoima
 - Ratkaistaan statiikka -> saadaan 1.kertaluvun voimasuureet
- 2. kertaluvun vaikutukset**
 - Ratkaistaan jokaiselle kuormitusyhdistelmälle $\alpha_{cr,sw}$ erikseen
 - Joko FEM-ominaisarvoratkaisijalla
 - Tai eurokoodin likiarvokaavalla
 - Lasketaan likiarvo 2.kertaluvun voimasuureille
 - Kaikkia 1.kertaluvun kuormia korotetaan kertoimella $k_{sway} = 1/(1-1/\alpha_{cr,sw})$
- Jäykistävien rakenteitten (= pilareitten) mitoitus**
 - Käytetään puristetun-taivutetun pilarin kaavoja seuraavasti:
 - Voimasuureet ovat korotettuja 2.kertaluvun suureita
 - Nurjahduspituus sivusiirtyvään suuntaan on systeempipituus eli $L_{cr} = 1L$ -> sitä ei kasvateta, koska P-Δ -vaikutus on otettu jo huomioon kuormaa kasvattamalla

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”

STRATEGIA JÄYKISTÄVÄN PILARIN SUUNNITTELUUN:

Jäykistävä sivusiirtyvä pilari mitoitetaan tulevan eurokoodin luonnoksen prEN1991-1-1:2019 **menetelmällä M3** (vastaa voimassa olevan eurokoodin mukaista "ajatusmallia B", vaakavoimien kasvattamista α_{cr} vaikutuksella):

Sivusiirtymätön heikkoon suuntaan:

- heikkoon suuntaan vaikuttavia vaakavoimia ei kasvateta
- heikon suunnan nurjahduspituus nurjahdustuennan mukaan --> normaalit nurjahduskaavat

Sivusiirtyvä vahvaan suuntaan:

- globaalit 2. kertaluvun vaikutukset (P- Δ) otetaan huomioon kasvattamalla vaakakuormia.
- lokaalit 2. kertaluvun vaikutukset (P- δ) otetaan huomioon nurjahduskaavoilla, joissa $L_{cr} = L$.

1.kertaluvun momentti vahvaan suuntaan pilarin päässä:

$$M_{y,Ed,1krt} = 1,15 M_{G,Ek} + 1,15 M_{\phi,G,Ek} + 1,5 M_{Ek,tuuli} + 1,5 \psi_{0,siilo} M_{Ek,siilo} + 1,5 \psi_{0,siilo} M_{\phi Ek,siilo} =$$

$$1,15 * 8,91 \text{ kNm} + 1,15 * 0,92 \text{ kNm} + 1,5 * 45 \text{ kNm} + 1,5 * 1 * 17,83 \text{ kNm} + 1,5 * 1 * 1,84 \text{ kNm} =$$

$$108,3 \text{ kNm}$$

2.kertaluvun momentti vahvaan suuntaan pilarin päässä:

Korotuskerroin momentinkasvatusmenetelmässä:

$$k_{sway} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{6,16}} = 1,194$$

Vaakakuormista johtuvien 1.kertaluvun vaikutusten korottaminen;

$$M_{Ek,tuuli,2krt} = k_{sway} M_{Ek,tuuli} = 1,194 * 45,00 \text{ kNm} = 53,73 \text{ kNm}$$

$$M_{Q,Ek,siilo,2krt} = M_{Q,Ek,siilo} = \text{(ei koroteta, pystykuormasta johtuva)} 17,83 \text{ kNm}$$

$$M_{G,Ek,siilo,2krt} = M_{G,Ek,siilo} = \text{(ei koroteta, pystykuormasta johtuva)} 8,91 \text{ kNm}$$

$$M_{\phi,Q,Ek,2krt} = k_{sway} M_{\phi,Q,Ek} = 1,194 * 1,84 \text{ kNm} = 2,19 \text{ kNm}$$

$$M_{\phi,G,Ek,2krt} = k_{sway} M_{\phi,G,Ek} = 1,194 * 0,92 \text{ kNm} = 1,10 \text{ kNm}$$

2.kertaluvun momentti vahvaan suuntaan pilarin päässä:

$$M_{y,Ed,2krt} = 1,15 M_{G,Ek,2krt} + 1,15 M_{\phi,G,Ek,2krt} + 1,5 M_{Ek,tuuli,2krt} + 1,5 \psi_{0,siilo} M_{Ek,siilo,2krt} + 1,5 \psi_{0,siilo} M_{\phi Ek,siilo,2krt} =$$

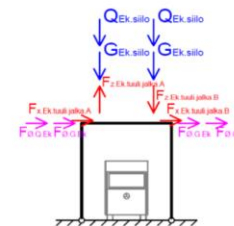
$$1,15 * 8,91 \text{ kNm} + 1,15 * 1,1 \text{ kNm} + 1,5 * 53,73 \text{ kNm} + 1,5 * 1 * 17,83 \text{ kNm} + 1,5 * 1 * 2,19 \text{ kNm} =$$

$$122,1 \text{ kNm}$$

Sauvanpäämomentin kasvu toisen kertaluvun (P- Δ) vaikutusten takia:

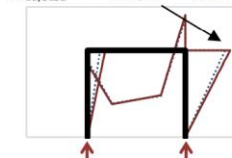
$$\frac{M_{y,Ed,2krt}}{M_{y,Ed,1krt}} = \frac{122,1 \text{ kNm}}{108,3 \text{ kNm}} = 1,13$$

Toisen kertaluvun vaikutus kasvattaa momenttia 13%



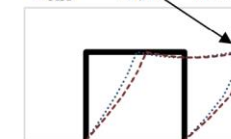
2.krtl. momenttikuvio yhdistelmässä ULS1

$$M_{Ed,ULS1} = 122,14 \text{ kNm}$$



2.krtl. siirtymät yhdistelmässä ULS1

$$\delta_{ULS1} = 54,60 \text{ mm}$$



$$N_{Ed,ULS1} = 265,7 \text{ kN}$$

Ratkaisun eteneminen menetelmässä M3:

- **Kuormat ja statiikka (1. kertaluku):**
 - Lasketaan kuormat, myös vaakakuormat
 - Määritetään pilarien alkuvinous ϕ ja lasketaan vinoudesta johtuva lisävaakavoima
 - Ratkaistaan statiikka -> saadaan 1.kertaluvun voimasuureet
- **2. kertaluvun vaikutukset**
 - Ratkaistaan jokaiselle kuormitusyhdistelmälle $\alpha_{cr,sw}$ erikseen
 - Joko FEM-ominaisarvoratkaisijalla
 - Tai eurokoodin likiarvokaavalla
 - Lasketaan likiarvo 2.kertaluvun voimasuureille
 - Kaikkia 1.kertaluvun kuormia korotetaan kertoimella $k_{sway} = 1/(1-1/\alpha_{cr,sw})$
- **Jäykistävien rakenteitten (= pilareitten) mitoitus**
 - Käytetään puristetun-taivutetun pilarin kaavoja seuraavasti:
 - Voimasuureet ovat korotettuja 2.kertaluvun suureita
 - Nurjahduspituus sivusiirtyvään suuntaan on systeempipituus eli $L_{cr} = 1L$ -> sitä ei kasvateta, koska P- Δ -vaikutus on otettu jo huomioon kuormaa kasvattamalla

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”

VARSINAINEN PILARIN MITOITUS

Sivusiirtyvien kehien ”menetelmässä M3” pilarin mitoitus puristettuna-taivutettuna sauvana tehdään muuten normaalisti, mutta:

- **Vahvan suunnan momenttina käytetään edellä laskettua korotettua arvoa $M_{z,Ed,2krt}$**
- **Nurjahduspituus vahvaan suuntaan $L_{cr} = L$** , jolla otetaan huomioon pelkästään lokaali 2.kertaluvun vaikutus (P-δ -vaikutus). Globaali 2.kertaluvun vaikutus (P-Δ) on nimittäin otettu huomioon momenttia kasvatettaessa.
- Heikon suunnan momentti lasketaan tässä esimerkissä 1.krtluvun teorialla (ei koroteta) sillä kehä on sivusiirtymätön heikossa suunnassa.
- Heikon suunnan nurjahdus lasketaan tässä esimerkissä tavallisilla nurjahduskaavoilla ja tavallisen keskeistä tuetun pilarin nur.pituudella $L_{cr,z}=0,5L$, sillä kehä on sivusiirtymätön heikkoon suuntaan. (Nurjahduskäyrä sisältää P-δ -vaikutuksen ja P-Δ -vaikutus sivusiirtymättömällä = 0)

Profiili: HEA220

A =	6 434	mm ²
I _y =	5,410E+07	mm ⁴
I _z =	1,955E+07	mm ⁴
I _t =	2,861E+05	mm ⁴
I _w =	1,935E+11	mm ⁶

poikkileikkausluokka=	2	
W _y =	5,685E+05	mm ³
W _z =	2,706E+05	mm ³

Materiaali:

f _y =	0,355	GPa
E =	210	GPa
G =	80,77	GPa

Mitoitusehdot:

0 - ei NA-siirtymää

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

Vahvan suunnan nurjahdus:

$$L_{cr,y} = 4,5 \text{ m} \quad i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 91,7 \text{ mm} \quad \lambda_i = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y \lambda_i} = \frac{4500 \text{ mm}}{91,7 \text{ mm} * 76,4} = 0,642 \quad \text{Nurjahduskäyrä} = b \quad \alpha_y = 0,34$$

$$\Phi_y = \frac{1}{2} (1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) = 0,781 \quad \chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,815$$

$$N_{b,Rd} = \chi_y A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 1 862 \text{ kN}$$

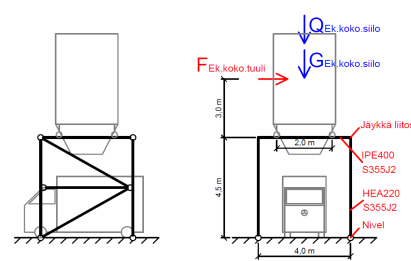
Heikon suunnan nurjahdus:

$$L_{cr,z} = 2,25 \text{ m} \quad i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 55,1 \text{ mm} \quad \lambda_i = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_z \lambda_i} = \frac{2250 \text{ mm}}{55,1 \text{ mm} * 76,4} = 0,534 \quad \text{Nurjahduskäyrä} = c \quad \alpha_z = 0,49$$

$$\Phi_z = \frac{1}{2} (1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) = 0,725 \quad \chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 0,824$$

$$N_{b,Rd} = \chi_z A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 1 881 \text{ kN}$$



Ratkaisun eteneminen menetelmässä M3:

- Kuormat ja statiikka (1. kertaluku):**
 - Lasketaan kuormat, myös vaakakuormat
 - Määritetään pilarien alkuvinous ϕ ja lasketaan vinoudesta johtuva lisävaakavoima
 - Ratkaistaan statiikka -> saadaan 1.kertaluvun voimasuureet
- 2. kertaluvun vaikutukset**
 - Ratkaistaan jokaiselle kuormitusyhdistelmälle $\alpha_{cr,sw}$ erikseen
 - Joko FEM-ominaisarvoratkaisijalla
 - Tai eurokoodin likiarvokaavalla
 - Lasketaan likiarvo 2.kertaluvun voimasuureille
 - Kaikkia 1.kertaluvun kuormia korotetaan kertomalla $k_{sw} = 1/(1-\alpha_{cr,sw})$
- Jäykistävien rakenteitten (= pilareitten) mitoitus**
 - Käytetään puristetun-taivutetun pilarin kaavoja seuraavasti:
 - Voimasuureet ovat korotettuja 2.kertaluvun suureita
 - Nurjahduspituus sivusiirtymään suuntaan on systeempipituus eli $L_{cr} = 1L$ -> sitä ei kasvateta, koska P-Δ -vaikutus on otettu jo huomioon kuormaa kasvatamalla

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”

VARSINAINEN PILARIN MITOITUS

Sivusiirtyvien kehien ”menetelmässä M3” pilarin mitoitus puristettuna-taivutettuna sauvana tehdään muuten normaalisti, mutta:

- **Vahvan suunnan momenttina käytetään edellä laskettua korotettua arvoa $M_{z,Ed,2krt}$**
- **Nurjahduspituus vahvaan suuntaan $L_{cr} = L$** , jolla otetaan huomioon pelkästään lokaali 2.kertaluvun vaikutus (P-δ -vaikutus). Globaali 2.kertaluvun vaikutus (P-Δ) on nimittäin otettu huomioon momenttia kasvatettaessa.
- Heikon suunnan momentti lasketaan tässä esimerkissä 1.krtluvun teorialla (ei koroteta) sillä kehä on sivusiirtymätön heikossa suunnassa.
- Heikon suunnan nurjahdus lasketaan tässä esimerkissä tavallisilla nurjahduskaavoilla ja tavallisen keskeltä tuetun pilarin nur.pituudella $L_{cr}=0,5L$, sillä kehä on sivusiirtymätön heikkoon suuntaan. (Nurjahduskäyrä sisältää P-δ -vaikutuksen ja P-Δ -vaikutus sivusiirtymättömällä = 0)

Profiili: HEA220

A =	6 434	mm ²
I _y =	5,410E+07	mm ⁴
I _z =	1,955E+07	mm ⁴
I _t =	2,861E+05	mm ⁴
I _w =	1,935E+11	mm ⁶

poikkileikkausluokka=	2	
W _y =	5,685E+05	mm ³
W _z =	2,706E+05	mm ³

Materiaali:

f _y =	0,355	GPa
E =	210	GPa
G =	80,77	GPa

Mitoitusehdot:

0 - ei NA-siirtymää

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

C_m -kertoimet

C _{my} =	0,90	Sivusiirryväille aina 0,9 - ks. huomautus EN1993-1-1 taulukossa B3.
C _{mLT} =	0,60	ψ = 0; α ei tarvita; Taulukon B3 yläosan kaavoilla.

Kerroin k_{yy} poikkileikkausluokissa 1-2

EN1993-1-1 taul. B1 mukaan (katso myös taul. B2)

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,9 * (1 + (0,642-0,2) \frac{266 \text{ kN}}{0,815 \frac{2284 \text{ kN}}{1,00}}) = 0,957$$

$$\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,9 * (1 + 0,8 * \frac{266 \text{ kN}}{0,815 \frac{2284 \text{ kN}}{1,00}}) = 1,003$$

k_{yy} = 0,957 *pienimmän mukaan*

Kerroin k_{zy} poikkileikkausluokissa 1-2

Taul B2, koska profiili voi kiepahtaa (altis vääntömuodonmuutoksille)

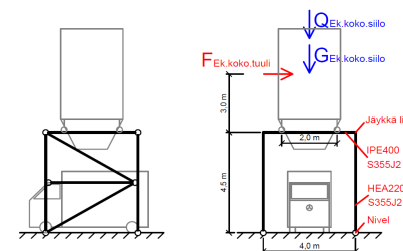
$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,978$$

$$\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,96$$

kun $\bar{\lambda}_z \leq 0,4$

$$k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,978$$

k_{zy} = 0,978



Ratkaisun eteneminen menetelmässä M3:

- Kuormat ja statiikka (1. kertaluku):**
 - Lasketaan kuormat, myös vaakakuormat
 - Määritetään pilarien alkuvuonous φ ja lasketaan vinoudesta johtuva lisävaakavoima
 - Ratkaistaan statiikka -> saadaan 1. kertaluvun voimasuureet
- 2. kertaluvun vaikutukset**
 - Ratkaistaan jokaiselle kuormitusyhdistelmälle α_{cr,sw} erikseen
 - Joko FEM-ominaisarvoratkaisijalla
 - Tai eurokoodin likiarvokaavalla
 - Lasketaan likiarvo 2.kertaluvun voimasuureille
 - Kaikkia 1.kertaluvun kuormia korotetaan kertomella k_{swy} = 1/(1-1/α_{cr,sw})
- Jäykistävien rakenteitten (= pilareitten) mitoitus**
 - Käytetään puristetun-taivutetun pilarin kaavoja seuraavasti:
 - Voimasuureet ovat korotettuja 2.kertaluvun suureita
 - Nurjahduspituus sivusiirtymään suuntaan on systeempipituus eli L_{cr} = 1L -> sitä ei kasvateta, koska P-Δ -vaikutus on otettu jo huomioon kuormaa kasvatamalla

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä M3”

VARSINAINEN PILARIN MITOITUS

Sivusiirtyvien kehien "menetelmässä M3" pilarin mitoitus puristettuna-taivutettuna sauvana tehdään muuten normaalisti, mutta:

- **Vahvan suunnan momenttina käytetään edellä laskettua korotettua arvoa $M_{z,Ed.2krt}$**
- **Nurjahduspituus vahvaan suuntaan $L_{cr} = L$** , jolla otetaan huomioon pelkästään lokaali 2.kertaluvun vaikutus (P- δ -vaikutus). Globaali 2.kertaluvun vaikutus (P- Δ) on nimittäin otettu huomioon momenttia kasvatettaessa.
- Heikon suunnan momentti lasketaan tässä esimerkissä 1.krtluvun teorialla (ei koroteta) sillä kehä on sivusiirtymätön heikossa suunnassa.
- Heikon suunnan nurjahdus lasketaan tässä esimerkissä tavallisilla nurjahduskaavoilla ja tavallisen keskeltä tuetun pilarin nur.pituudella $L_{cr}=0,5L$, sillä kehä on sivusiirtymätön heikkoon suuntaan. (Nurjahduskäyrä sisältää P- δ -vaikutuksen ja P- Δ -vaikutus sivusiirtymättömällä = 0)

Profiili: HEA220

A =	6 434	mm ²
I _y =	5,410E+07	mm ⁴
I _z =	1,955E+07	mm ⁴
I _t =	2,861E+05	mm ⁴
I _w =	1,935E+11	mm ⁶

poikkileikkausluokka=	2
W _y =	5,685E+05 mm ³
W _z =	2,706E+05 mm ³

Materiaali:

f _y =	0,355	GPa
E =	210	GPa
G =	80,77	GPa

Mitoitusehdon tarkistus:

Taivutus + vahvan suunnan nurjahdus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{265,7 \text{ kN}}{1862 \text{ kN}} + 0,957 * \frac{122,1 \text{ kNm}}{183 \text{ kNm}} = \mathbf{0,782} \leq 1,0$$

OK, kestää!

Taivutus + heikon suunnan nurjahdus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{265,7 \text{ kN}}{1881 \text{ kN}} + 0,978 * \frac{122,1 \text{ kNm}}{183 \text{ kNm}} = \mathbf{0,795} \leq 1,0$$

OK, kestää!

Mitoitusehdot:

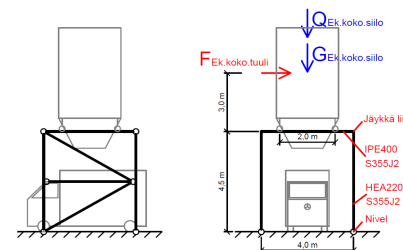
0 - ei NA-siirtymää

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan



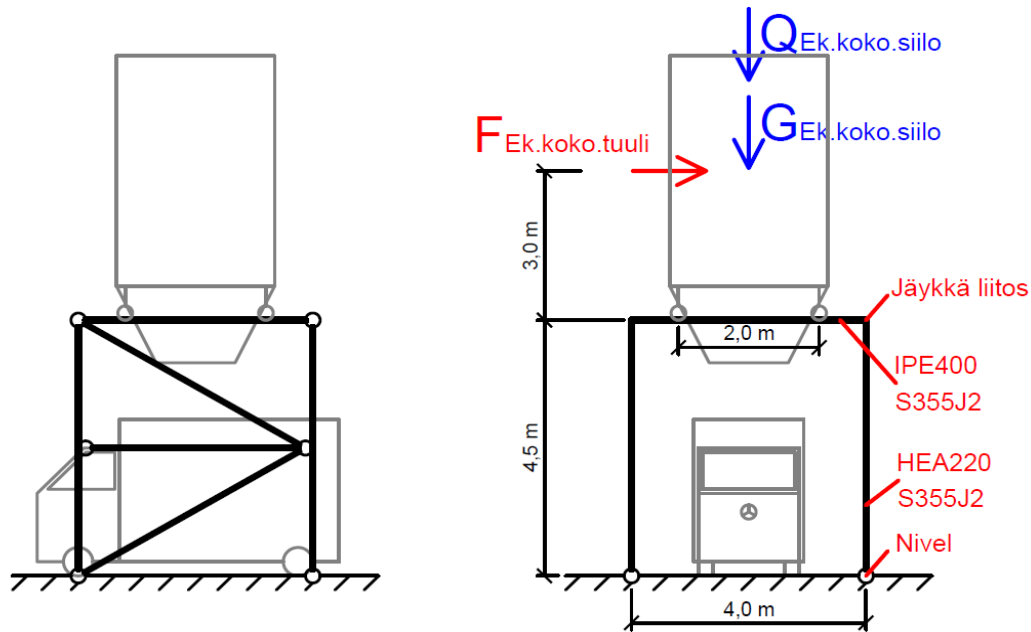
Ratkaisun eteneminen menetelmässä M3:

- Kuormat ja statiiikka (1. kertaluku):**
 - Lasketaan kuormat, myös vaakakuormat
 - Määritetään pilarien alkuvinous ϕ ja lasketaan vinoudesta johtuva lisävaakavoima
 - Ratkaistaan statiiikka -> saadaan 1. kertaluvun voimasuureet
- 2. kertaluvun vaikutukset**
 - Ratkaistaan jokaiselle kuormitusyhdistelmälle $\alpha_{cr,sw}$ erikseen
 - Joko FEM-ominaisarvoratkaisijalla
 - Tai eurokoodin likiarvokaavalla
 - Lasketaan likiarvo 2.kertaluvun voimasuureille
 - Kaikkia 1.kertaluvun kuormia korotetaan kertoimella $k_{sw} = 1/(1-\alpha_{cr,sw})$
- Jäykistävien rakenteitten (= pilareitten) mitoitus**
 - Käytetään puristetun-taivutetun pilarin kaavoja seuraavasti:
 - Voimasuureet ovat korotettuja 2.kertaluvun suureita
 - Nurjahduspituus sivusiirtymään suuntaan on systeempipituus eli $L_{cr} = 1L \rightarrow$ sitä ei kasvateta, koska P- Δ -vaikutus on otettu jo huomioon kuormaa kasvatamalla

Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

- Loppuyhteenveto heti alkuun
 - Miksi aihe on tärkeä?
- Tärkeät termit:
 - Sivusiirtyvyys, lokaalit ja globaalit toisen kertaluvun vaikutukset, $\alpha_{cr,sw}$
- Menetelmät M0..M5 ja EM lyhyesti
 - (Vuori ja hiihtohissi)
- Sivusiirtyvän rakenteen perusmenetelmät
 - Esimerkki menetelmällä M3
 - **Esimerkki menetelmällä EM**
 - Mietteitä menetelmistä M3, EM, ja M4-5
- Loppuyhteenveto myös lopuksi

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä EM”



Koko rakenteen kuormat:

$$F_{Ek,koko.tuuli} = 40 \text{ kN}$$

$$Q_{Ek,koko.siilo} = 400 \text{ kN}$$

$$G_{Ek,koko.siilo} = 200 \text{ kN}$$

Hyötykuormien ψ_0 -kertoimet

$$\psi_{0,tuuli} = 0,60$$

$$\psi_{0,siilo} = 1,00$$

Kuvan siilon alle pitää mahtua ajamaan rekka, joten siilon tukirakenne on onnistuttu jäykistämään sivusiirtymättömäksi vain toisessa suunnassa vinositeiden avulla.

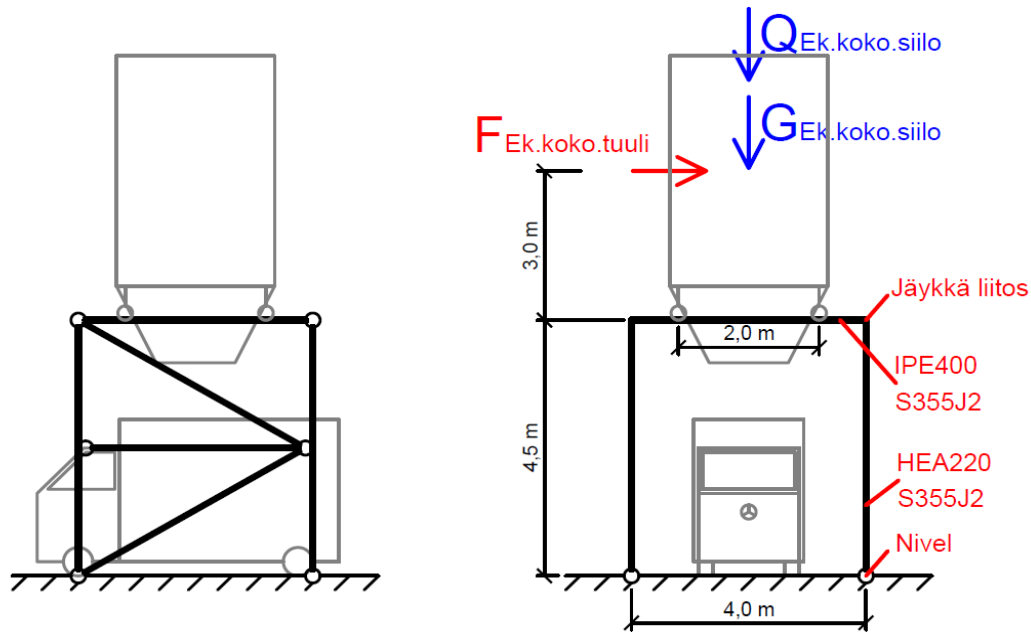
Toiseen suuntaan tukirakenne toimii jäykällä nurkkaliitoksilla jäykistettynä portaalikehänä.

Rakenne on portaalikehän tasossa sivusiirtyvä. Mitoita sivusiirtyvä pilari käyttäen "ekvivalentin sauvan" menetelmää eli pidennettyä nurjahduspituutta. ("Menetelmä EM" prEN 1993-1-1:2019 merkinnöin).

Ratkaisun eteneminen menetelmässä EM:

- **Kuormat ja statiikka (1. kertaluku):**
 - Lasketaan kuormat, myös vaakakuormat
 - Määritetään pilarien alkuvinous ϕ ja lasketaan vinoudesta johtuva lisävaakavoima
 - Ratkaistaan statiikka -> saadaan 1.kertaluvun voimasuureet
- **2. kertaluvun vaikutukset**
 - Määritetään ekvivalentin sauvan nurjahduspituus L_{cr} ottaen huomioon liitosten sekä ympäröivien sauvojen jäykkyydet
- **Jäykistävien rakenteitten (= pilareitten) mitoitus**
 - Käytetään puristetun-taivutetun pilarin kaavoja seuraavasti:
 - Nurjahduspituus sivusiirtyvään suuntaan on ekvivalentin sauvan nurjahduspituus L_{cr} .
 - Voimasuureet ovat 1.kertaluvun suureita. Kuormia ei kasvateta, koska P- Δ -vaikutus tulee otetuksi huomioon nurjahduskaavalla, kun käytetään isompaa nurjahduspituutta.

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä EM”



Koko rakenteen kuormat:

$$F_{Ek,koko.tuuli} = 40 \text{ kN}$$

$$Q_{Ek,koko.siilo} = 400 \text{ kN}$$

$$G_{Ek,koko.siilo} = 200 \text{ kN}$$

Hyötykuormien ψ_0 -kertoimet

$$\psi_{0,tuuli} = 0,60$$

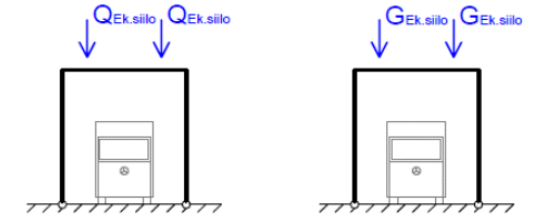
$$\psi_{0,siilo} = 1,00$$

Ratkaistaan yhteen kehärakenteeseen kohdistuvat kuormat:

Siilon kuormat jakaantuvat tasan neljälle tukijalalle, joista 2 kuormittaa yhtä kehää:

$$Q_{Ek,siilo} = Q_{Ek,koko.siilo} / 4 = 100 \text{ kN}$$

$$G_{Ek,siilo} = G_{Ek,koko.siilo} / 4 = 50 \text{ kN}$$



Siilon tuulikuormasta puolet tulee kummallekin portaalikehälle, ja siitä edelleen puolet menee yhden jalan kautta. Tuulikuorma vaikuttaa paljon jalkojen tasoa ylempänä - tästä aiheutuu epäkeskisyyssmomentti ja edelleen yhtä tukijalaa puristava ja toista vetävä voimapari, jonka suuruus voidaan ratkaista siilon vapaakappalekuvasta.

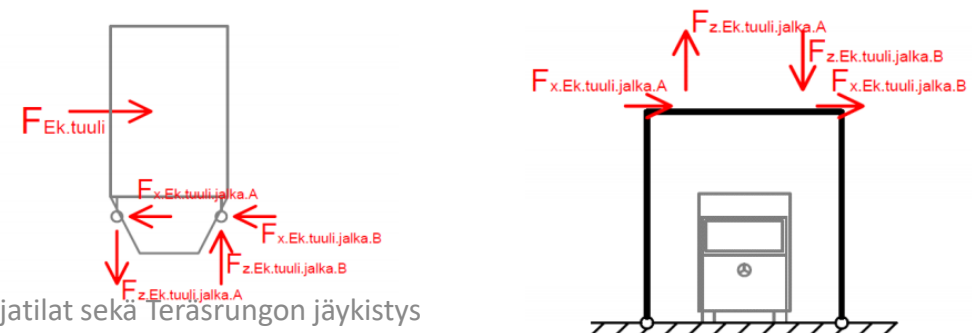
$$F_{x,Ek,tuuli,jalkaA} = F_{Ek,koko.tuuli} / 4 = 10 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ek,tuuli,jalkaA} = -3\text{m}/2\text{m} * F_{Ek,koko.tuuli} / 2 = -30 \text{ kN} \quad (*)$$

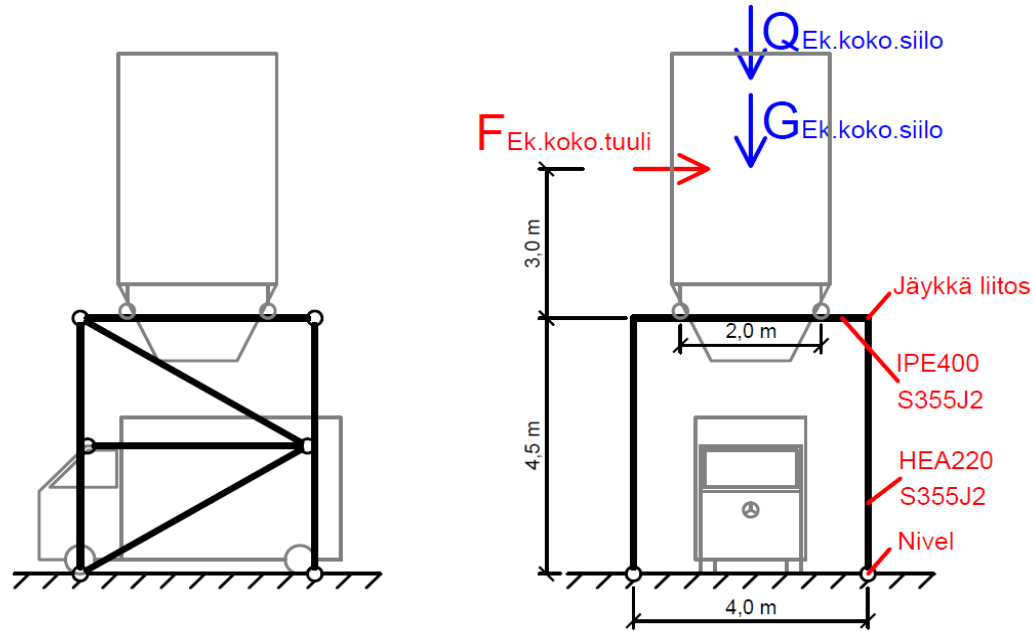
$$F_{x,Ek,tuuli,jalkaB} = F_{Ek,koko.tuuli} / 4 = 10 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ek,tuuli,jalkaB} = +3\text{m}/2\text{m} * F_{Ek,koko.tuuli} / 2 = 30 \text{ kN} \quad (*)$$

*) Merkintätapa tässä: Painovoima positiivista, noste negatiivista



ESIMERKKI: Sivusierityvä pilari ”menetelmällä EM”



Koko rakenteen kuormat:

$F_{Ek,koko.tuuli}$	=	40	kN
$Q_{Ek,koko.siilo}$	=	400	kN
$G_{Ek,koko.siilo}$	=	200	kN

Hyötykuormien ψ_0 -kertoimet

$\psi_{0,tuuli}$	=	0,60
$\psi_{0,siilo}$	=	1,00

Pilarien alkuvinoudesta johtuvat lisävaakavoimat:

Pilarien korkeudesta johtuva alkuvinouden pienennystekijä: $\alpha_h = 2/\sqrt{h} = 2/\sqrt{4,5\text{m}} = 0,943$

Pilarien lukumäärästä m johtuva pien.tekijä: $\alpha_m = \sqrt{0,5 * (1 + 1/m)} = \sqrt{0,5 * (1 + 1/2)} = 0,866$

m = 2 kpl

Globaali ekvivalentti alkuvinous:

$$\phi = \frac{\alpha_m \alpha_h}{200} = 0,004082$$

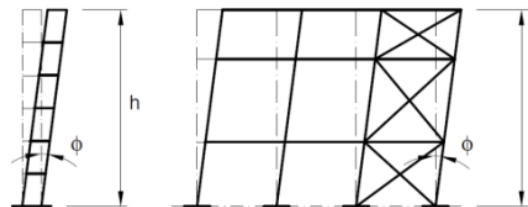
Yhteen pilariin kohdistuva lisävaakavoima: Karakteristinen osuus hyötykuormasta:

$$F_{\phi,Q,Ek} = \phi Q_{Ek,siilo} = 0,41 \text{ kN}$$

Yhteen pilariin kohdistuva lisävaakavoima: Karakteristinen osuus rakenteen painosta:

$$F_{\phi,G,Ek} = \phi G_{Ek,siilo} = 0,20 \text{ kN}$$

(Huom! Koko kehään kohdistuu kahden pilarin lisävaakavoima, ja kehän suunnittelu on tehtävä lisävaakavoiman suunnitteluarvolla $F_{\phi,Q,Ed}$ eikä karakteristisella arvolla)



ESIMERKKI: Sivusierityvä pilari "menetelmällä EM"

Tarkasteltavan kuormitusyhdistelmän valinta

Hyötykuormien ψ_0 -kertoimet

$$\psi_{0,tuuli} = 0,60$$

$$\psi_{0,siilo} = 1,00$$

Koska siilon hyötykuorman yhdistelykerroin on ykköinen, tulee pilarien nurjahdustarkastelussa väistämättä mitoittavaksi yhdistelmä, jossa tuuli on määräävä ja siilokuorma ei-määräävä. Muita yhdistelmiä ei tässä esimerkissä tarvitse tarkastella (ja niiden tarkastelussa olisikin aika kova työ...)

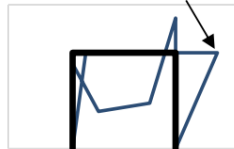
Tarkasteltava murtorajatilan kuormitusyhdistelmä:

$$X_{Ed} = 1,15 X_{G,Ek} + 1,5 X_{Ek,tuuli} + 1,5 \psi_{0,siilo} X_{Ek,siilo}$$



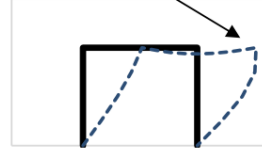
1.krtl. momenttikuvio yhdistelmässä ULS1

$$M_{Ed,ULS1} = 108,31 \text{ kNm}$$



1.krtl. siirtymät yhdistelmässä ULS1

$$\delta_{ULS1} = 45,73 \text{ mm}$$



1.kertaluvun momentti vahvaan suuntaan pilarin päässä:

$$M_{y,Ed,1krt} = 1,15 M_{G,Ek} + 1,15 M_{\phi,G,Ek} + 1,5 M_{Ek,tuuli} + 1,5 \psi_{0,siilo} M_{Ek,siilo} + 1,5 \psi_{0,siilo} M_{\phi Ek,siilo} = 1,15 * 8,91 \text{ kNm} + 1,15 * 0,92 \text{ kNm} + 1,5 * 45 \text{ kNm} + 1,5 * 1 * 17,83 \text{ kNm} + 1,5 * 1 * 1,84 \text{ kNm} = 108,3 \text{ kNm}$$

Pilarin normaalivoima:

Tarkasteltava kuormitusyhdistelmä: ULS 1 - Tuulikuorma määräävä

Normaalivoimat FEM-ratkaisusta (karakteristisia arvoja)

$$N_{Ek,tuuli} = 37,5 \text{ kN}$$

$$N_{Q,Ek,siilo} = 100 \text{ kN}$$

$$N_{G,Ek,siilo} = 50 \text{ kN}$$

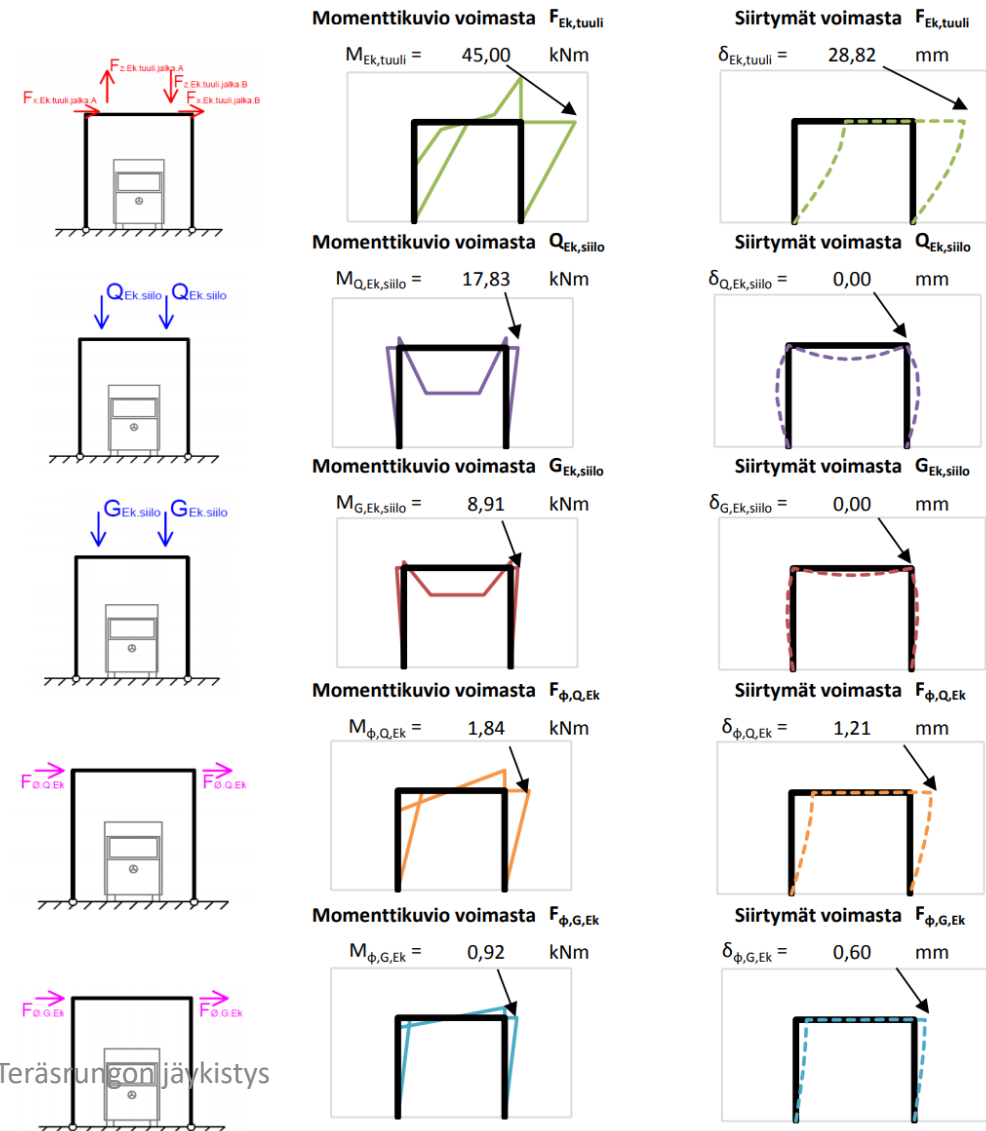
$$N_{\phi,Q,Ek} = 0,919 \text{ kN}$$

$$N_{\phi,G,Ek} = 0,459 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,ULS1} = 1,15 N_{G,Ek} + 1,15 N_{\phi,G,Ek} + 1,5 N_{Ek,tuuli} + 1,5 \psi_{0,siilo} N_{Ek,siilo} + 1,5 \psi_{0,siilo} N_{\phi Ek,siilo} =$$

$$265,7 \text{ kN}$$

Ensimmäisen kertaluvun momenttikuviot ja siirtymät (karakteristisilla arvoilla)



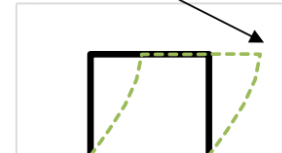
Momenttikuvio voimasta $F_{Ek,tuuli}$

$$M_{Ek,tuuli} = 45,00 \text{ kNm}$$



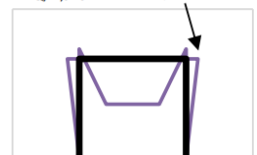
Siirtymät voimasta $F_{Ek,tuuli}$

$$\delta_{Ek,tuuli} = 28,82 \text{ mm}$$



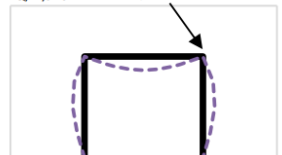
Momenttikuvio voimasta $Q_{Ek,siilo}$

$$M_{Q,Ek,siilo} = 17,83 \text{ kNm}$$



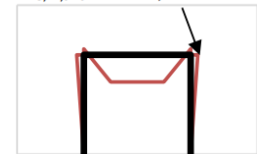
Siirtymät voimasta $Q_{Ek,siilo}$

$$\delta_{Q,Ek,siilo} = 0,00 \text{ mm}$$



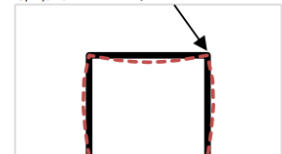
Momenttikuvio voimasta $G_{Ek,siilo}$

$$M_{G,Ek,siilo} = 8,91 \text{ kNm}$$



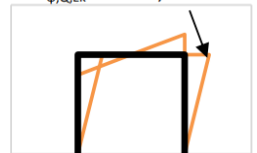
Siirtymät voimasta $G_{Ek,siilo}$

$$\delta_{G,Ek,siilo} = 0,00 \text{ mm}$$



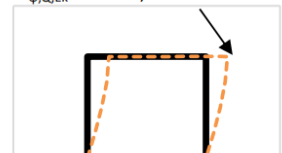
Momenttikuvio voimasta $F_{\phi,Q,Ek}$

$$M_{\phi,Q,Ek} = 1,84 \text{ kNm}$$



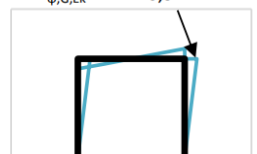
Siirtymät voimasta $F_{\phi,Q,Ek}$

$$\delta_{\phi,Q,Ek} = 1,21 \text{ mm}$$



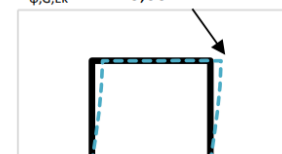
Momenttikuvio voimasta $F_{\phi,G,Ek}$

$$M_{\phi,G,Ek} = 0,92 \text{ kNm}$$



Siirtymät voimasta $F_{\phi,G,Ek}$

$$\delta_{\phi,G,Ek} = 0,60 \text{ mm}$$



ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä EM”

STRATEGIA JÄYKISTÄVÄN PILARIN SUUNNITTELUUN:

Jäykistävä sivusiirtyvä pilari suunnitellaan tässä esimerkissä tulevan eurokoodin luonnoksen prEN 1993-1-1:2019 **menetelmällä EM** (equivalent member, ekvivalentin sauvan menetelmä, vastaa joissakin voimassa olevan standardin EN 1993-1-1:2005 mukaisissa oppikirjoissa esitettyä "ajatusmallia C"). Menetelmässä käytetään pilarille 1.kertaluvun voimasuureita, ja globaali 2.kertaluvun vaikutus (P-Δ -vaikutus) otetaan huomioon nurjahduspituutta kasvattamalla.

Jos vaakapalkki IPE400 olisi äärettömän jäykkä, voitaisiin käyttää $L_{cr} = 2,0 L$. Nyt on tutkittava liittyvien palkkien (ja liitosten) jäykkyyden vaikutus.



Nurjahduspituuden määrittäminen menetelmällä EM:

Pilarin jäykkyystekijät:

$$K_1 = 0$$

$$K_c = I_{col} / L_{col} = 5410 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 / 4500 \text{ mm} = 12\,022 \text{ mm}^3$$

$$K_2 = 0$$

Ympäröivien palkkien jäykkyystekijät:

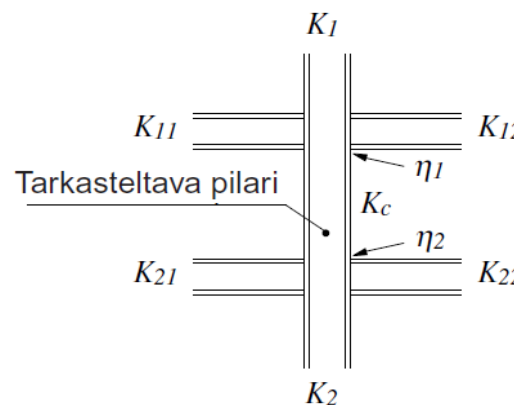
$$K_{11} = 1,5 \cdot I_{beam} / L_{beam} \quad (1-0,2 N/N_e) = 1,5 \cdot 23128 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 / 4000 \text{ mm} = 86\,731 \text{ mm}^3$$

$$K_{12} = 0$$

$$K_{21} = 0$$

$$K_{22} = 0$$

Yksinkertaistus: $N/N_e \approx 0,0$



Pilarin yläpään jäykkyys:

$$\eta_1 = \frac{K_c + K_1}{K_c + K_1 + K_{11} + K_{12}} = \frac{12022 + 0}{12022 + 0 + 86731 + 0} = 0,122$$

Pilarin alapään jäykkyys:

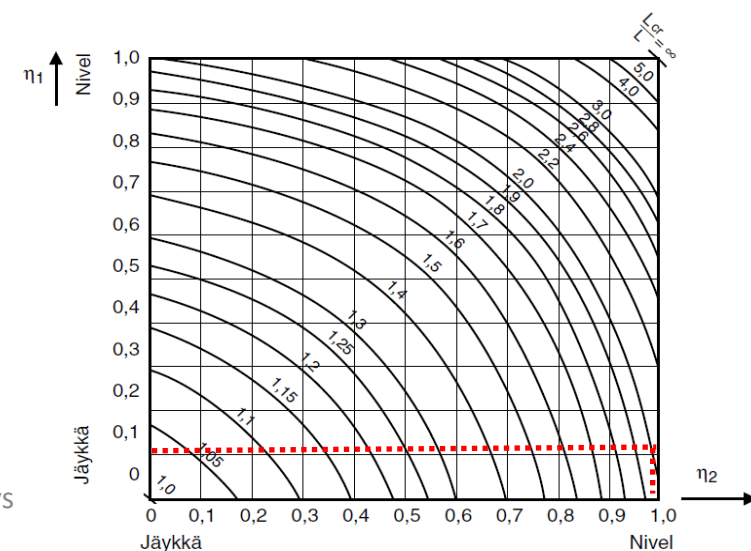
$$\eta_2 = \frac{K_c + K_2}{K_c + K_2 + K_{21} + K_{22}} = \frac{12022 + 0}{12022 + 0 + 0 + 0} = 1,000$$

Korotettu nurjahduspituus tulkitaan käyrästä:

$$L_{cr} = 2,08 L$$

$$= 2,08 \cdot 4,5 \text{ m}$$

$$= 9,37 \text{ m}$$



ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä EM”

VARSINAINEN PILARIN MITOITUS

Sivusiirtyvien kehien ”menetelmässä EM” pilarin mitoitus puristettuna-taivutettuna sauvana tehdään normaaleilla nurjahduskäyriin perustuvilla kaavoilla, seuraavin huomautuksin:

- Vahvan suunnan **momenttina ei koroteta** vaan käytetään 1.kertaluvun momenttia.
- Sen sijaan **nurjahduspituus vahvaan suuntaan korotetaan**, tässä esimerkissä arvoon $L_{cr} = 2,08 L$, jolla otetaan huomioon sekä lokaali (P-δ) että globaali 2.kertaluvun vaikutus (P-Δ -vaikutus).
- Heikon suunnan momentti lasketaan tässä esimerkissä 1.krtluvun teorialla (ei koroteta) sillä kehä on sivusiirtymätön heikossa suunnassa.
- Heikon suunnan nurjahdus lasketaan tässä esimerkissä tavallisilla nurjahduskaavoilla ja tavallisen keskeltä tuetun pilarin nur.pituudella $L_{cr}=0,5L$, sillä kehä on sivusiirtymätön heikkoon suuntaan. (Nurjahduskäyrä sisältää P-δ -vaikutuksen ja P-Δ -vaikutus sivusiirtymättömällä = 0)

Vahvan suunnan nurjahdus:

$$L_{cr,y} = 9,366765 \text{ m} \quad i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 91,7 \text{ mm} \quad \lambda_i = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr}}{i_y \lambda_i} = \frac{9367 \text{ mm}}{91,7 \text{ mm} * 76,4} = 1,337 \quad \text{Nurjahduskäyrä} = b \quad \alpha_y = 0,34$$

$$\Phi_y = \frac{1}{2} (1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) = 1,587 \quad \chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,410$$

$$N_{b,Rd} = \chi_y A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 935 \text{ kN}$$

Profiili: HEA220

$A = 6\,434 \text{ mm}^2$	poikkileikkausluokka=2	$f_y = 0,355 \text{ GPa}$
$I_y = 5,410E+07 \text{ mm}^4$	$W_y = 5,685E+05 \text{ mm}^3$	$E = 210 \text{ GPa}$
$I_z = 1,955E+07 \text{ mm}^4$	$W_z = 2,706E+05 \text{ mm}^3$	$G = 80,77 \text{ GPa}$
$I_t = 2,861E+05 \text{ mm}^4$		
$I_w = 1,935E+11 \text{ mm}^6$		

Materiaali:

$f_y = 0,355 \text{ GPa}$
$E = 210 \text{ GPa}$
$G = 80,77 \text{ GPa}$

Heikon suunnan nurjahdus:

$$L_{cr,z} = 2,25 \text{ m} \quad i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 55,1 \text{ mm} \quad \lambda_i = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_z \lambda_i} = \frac{2250 \text{ mm}}{55,1 \text{ mm} * 76,4} = 0,534 \quad \text{Nurjahduskäyrä} = c \quad \alpha_z = 0,49$$

$$\Phi_z = \frac{1}{2} (1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) = 0,725 \quad \chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 0,824$$

$$N_{b,Rd} = \chi_z A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 1\,881 \text{ kN}$$

Mitoitusehdot:

0 - ei NA-siirtymää

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

ESIMERKKI: Sivusiirtyvä pilari ”menetelmällä EM”

VARSINAINEN PILARIN MITOITUS

Sivusiirtyvien kehien ”menetelmässä EM” pilarin mitoitus puristettuna-taivutettuna sauvana tehdään normaaleilla nurjahduskäyriin perustuvilla kaavoilla, seuraavin huomautuksin:

- Vahvan suunnan **momenttina ei koroteta** vaan käytetään 1.kertaluvun momenttia.
- Sen sijaan **nurjahduspituus vahvaan suuntaan korotetaan**, tässä esimerkissä arvoon $L_{cr} = 2,08 L$, jolla otetaan huomioon sekä lokaali (P-δ) että globaali 2.kertaluvun vaikutus (P-Δ -vaikutus).
- Heikon suunnan momentti lasketaan tässä esimerkissä 1.krtluvun teorialla (ei koroteta) sillä kehä on sivusiirtymätön heikossa suunnassa.
- Heikon suunnan nurjahdus lasketaan tässä esimerkissä tavallisilla nurjahduskaavoilla ja tavallisen keskeltä tuetun pilarin nur.pituudella $L_{cr}=0,5L$, sillä kehä on sivusiirtymätön heikkoon suuntaan. (Nurjahduskäyrä sisältää P-δ -vaikutuksen ja P-Δ -vaikutus sivusiirtymättömällä = 0)

Profiili: HEA220

$A = 6\,434 \text{ mm}^2$	poikkileikkausluokka=2
$I_y = 5,410E+07 \text{ mm}^4$	$W_y = 5,685E+05 \text{ mm}^3$
$I_z = 1,955E+07 \text{ mm}^4$	$W_z = 2,706E+05 \text{ mm}^3$
$I_t = 2,861E+05 \text{ mm}^4$	
$I_w = 1,935E+11 \text{ mm}^6$	

Materiaali:

$f_y = 0,355 \text{ GPa}$
$E = 210 \text{ GPa}$
$G = 80,77 \text{ GPa}$

Mitoitusehdon tarkistus:

Taivutus + vahvan suunnan nurjahdus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{265,7 \text{ kN}}{935 \text{ kN}} + 1,104 * \frac{108,3 \text{ kNm}}{183 \text{ kNm}} = \mathbf{0,938} \leq 1,0$$

OK, kestää!

Taivutus + heikon suunnan nurjahdus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{265,7 \text{ kN}}{1881 \text{ kN}} + 0,978 * \frac{108,3 \text{ kNm}}{183 \text{ kNm}} = \mathbf{0,721} \leq 1,0$$

OK, kestää!

Mitoitusehdot:

0 - ei NA-siirtymää

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

0 - Ei taivutusta heikompaan suuntaan

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

- Loppuyhteenvedo heti alkuun
 - Miksi aihe on tärkeä?
- Tärkeät termit:
 - Sivusiirtyvyys, lokaalit ja globaalit toisen kertaluvun vaikutukset, $\alpha_{cr,sw}$
- Menetelmät M0..M5 ja EM lyhyesti
 - (Vuori ja hiihtohissi)
- Sivusiirtyvän rakenteen perusmenetelmät
 - Esimerkki menetelmällä M3
 - Esimerkki menetelmällä EM
 - **Mietteitä menetelmistä M3, EM, ja M4-5**
- Loppuyhteenvedo myös loppuksi

ESIMERKKI 1: M3 -tason ratkaisu (tarkempi)

Mitoitusehdon tarkistus:

Taivutus + vahvan suunnan nurjahdus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{265,7 \text{ kN}}{1862 \text{ kN}} + 0,957 * \frac{122,1 \text{ kNm}}{183 \text{ kNm}} = 0,782 \leq 1,0$$

OK, kestäää!

Taivutus + heikon suunnan nurjahdus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{265,7 \text{ kN}}{1881 \text{ kN}} + 0,978 * \frac{122,1 \text{ kNm}}{183 \text{ kNm}} = 0,795 \leq 1,0$$

OK, kestäää!

ESIMERKKI 2: EM -tason ratkaisu (likimääräinen)

Mitoitusehdon tarkistus:

Taivutus + vahvan suunnan nurjahdus:

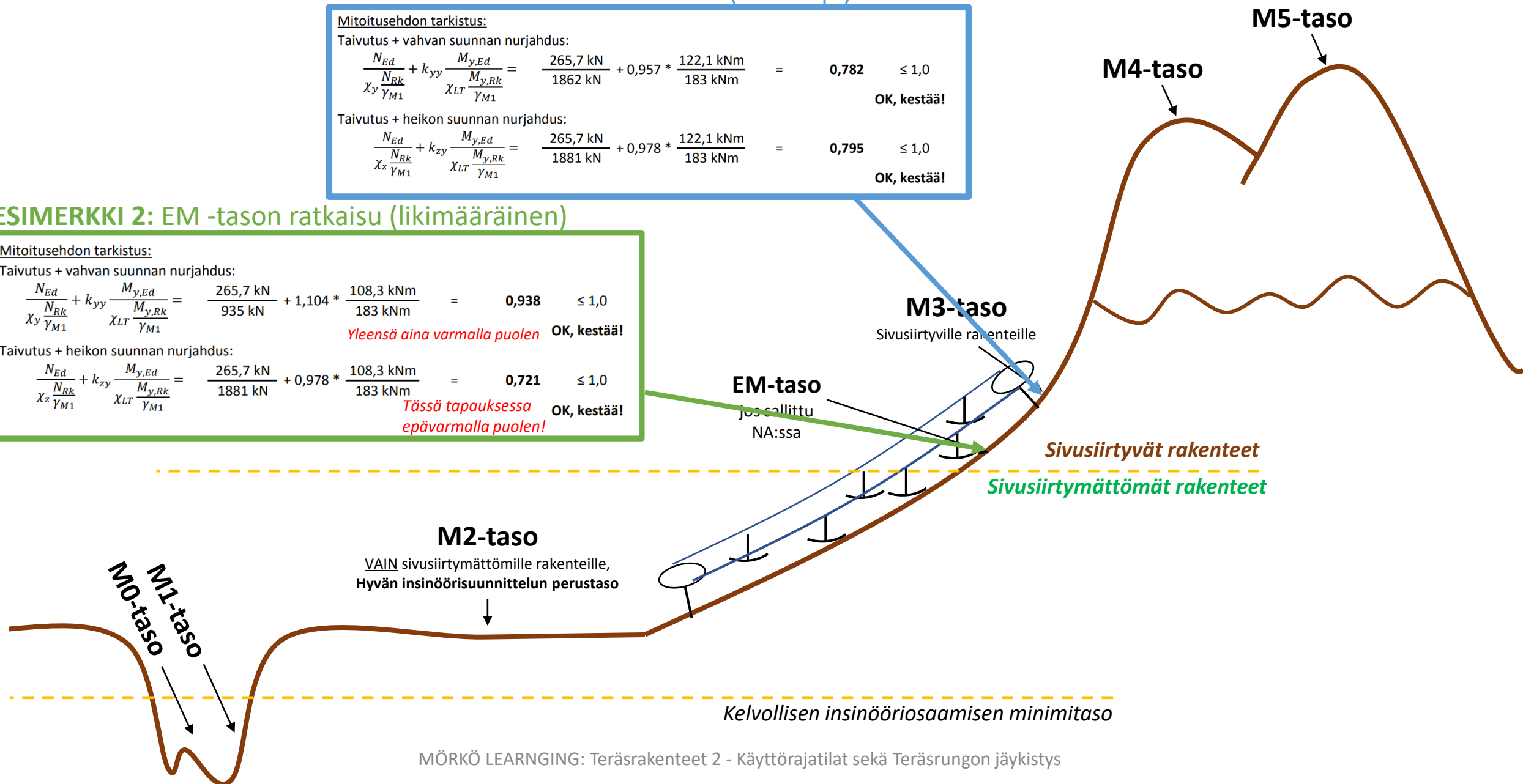
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{265,7 \text{ kN}}{935 \text{ kN}} + 1,104 * \frac{108,3 \text{ kNm}}{183 \text{ kNm}} = 0,938 \leq 1,0$$

OK, kestäää!
Yleensä aina varmalla puolen

Taivutus + heikon suunnan nurjahdus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{265,7 \text{ kN}}{1881 \text{ kN}} + 0,978 * \frac{108,3 \text{ kNm}}{183 \text{ kNm}} = 0,721 \leq 1,0$$

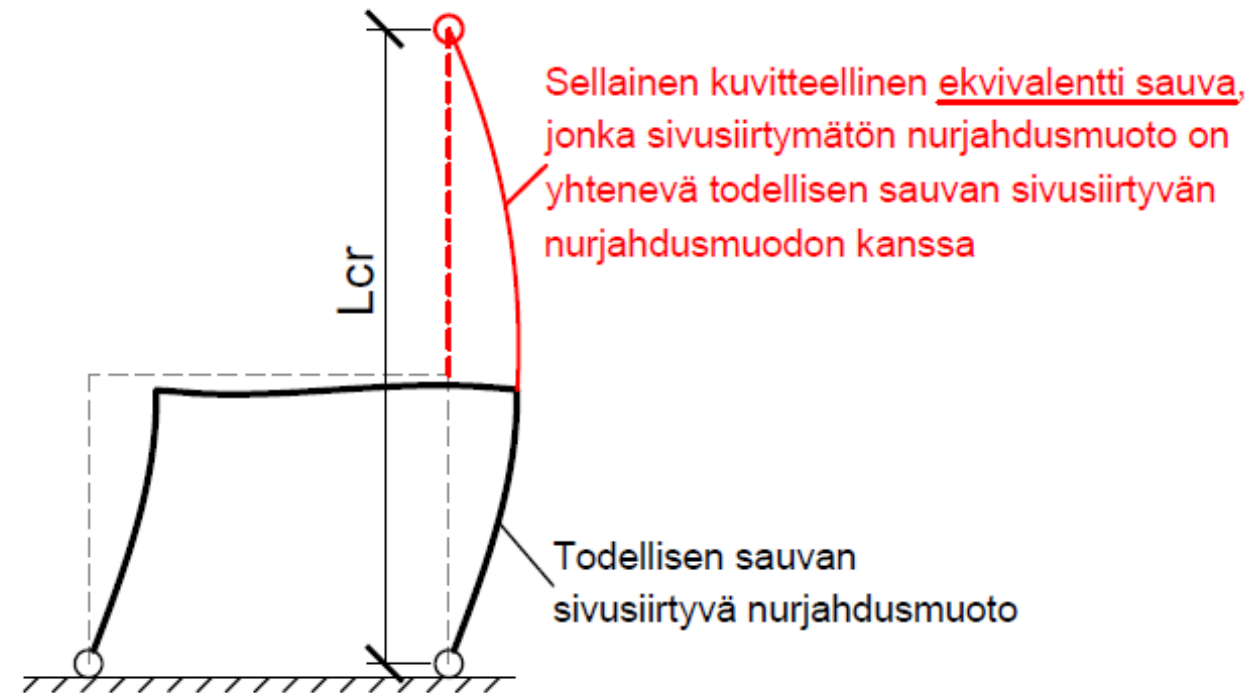
OK, kestäää!
Tässä tapauksessa epävarmalla puolen!



Mietteitä menetelmistä M3, EM, M4 ja M5

Menetelmä EM (equivalent member):

- **Soveltuu etenkin luonnosteluun**
- Saa *kieltää* kansallisella liitteellä
 - Suomessa ei varmaan tulla kieltämään(?)
- **Mitoittanee pilarit suunnilleen oikein**
- **Mitoittaa jäykät liitokset aina väärin(!)**
(oletuksena liitoksen "2nd order sway effect" = 0)
 - **HUOM:** Mitenkähän moni suomalainen suunnitteluyritys laskee nykyään **väärin** teräksisen **mastopilarin peruspultteihin** kohdistuvan globaalin 2.kertaluvun vaikutuksen?



Mörkö Engineering Oy

- Perustettu: Lokakuu 2018
- Henkilöstö: 1

Mm. tänään nähtävät laskuesimerkit julkaistaan morkolearning.com verkkooppimisalustalla 11.9. ja 25.9.2023, luennot TE241 ja TE242

mitä Mörkö



Verko-
oppiminen
ja
Koulutus

Teräs Pertti & Parametrinen /
algoritmiavusteinen rakennesuunnittelu

Eki Lehtimäki

- 15 rakennesuunnittelua
- 10 vuotta valmistumisesta
- 5 vuotta yrittäjänä
 - Lisäksi tuntiopettajana Metropolissa (sivutoimi)

Lisäksi:

Tuntiopettaja, Metropolia AMK 2019-2023
Teräsrakenteet 1 ja Teräsrakenteet 2

Rakenneanalyysi uuden sukupolven eurokoodin EN 1993-1-1:2022 menetelmillä M0-M5 ja EM, sekä esimerkki sivusiirtyvän pilarin mitoituksesta

- Loppuyhteenvedo heti alkuun
 - Miksi aihe on tärkeä?
- Tärkeät termit:
 - Sivusiirtyvyys, lokaalit ja globaalit toisen kertaluvun vaikutukset, $\alpha_{cr,sw}$
- Menetelmät M0..M5 ja EM lyhyesti
 - (Vuori ja hiihtohissi)
- Sivusiirtyvän rakenteen perusmenetelmät
 - Esimerkki menetelmällä M3
 - Esimerkki menetelmällä EM
 - Mietteitä menetelmistä M3, EM, ja M4-5
- Loppuyhteenvedo myös loppuksi

Loppuyhteenveto

- ”Analyysimenetelmiin” eli toisen kertaluvun vaikutusten huomioon ottamiseen tulee uudessa EN1993-1-1:2022:ssa uutta terminologiaa: mm. menetelmät M0, M1, M2, M3, M4, M5 ja EM
 - Laskenta itsessään pysyy melko samanlaisena, mutta asioille tulee ”selkeät” nimet.
- Tämä on **HYVÄ ASIA**, koska aikaisemmin vanhan normin **hankala terminologia vaikeutti** asian oppimista, ymmärtämistä, keskustelemista ja suunnitelmien tarkastamista.
 - Keskeistä on tärkeimpien menetelmien M2, M3 ja EM ymmärtäminen ja ymmärryksen sitominen termeihin, joilla niistä voidaan keskustella.
- Joidenkin mielestä voi olla myös **HUONO ASIA**, koska **kun asiaa ei aiemminkaan ole oikein ymmärretty**, voi uusien monimutkaisten termien lisääminen sen ympärille tuntua hankalalta.
 - Tiettyjen termien suomennoksessa onnistuttava!
 - Sway-imperfection, bow-imperfection → helppo
 - Second order sway/bow effect → hankala, tärkeä!
 - Normin uudistuminen antaa mahdollisuuden osaamisen kehittämiseksi.
 - Mahdollisuus ryhtiikkeseen rakennusvalvonnoissa ja 3.osapuolen tarkastuksissa, etenkin jäykistys!
- Menetelmät lyhyesti:
 - **Sivusiirtymättömille (non-sway) rakenteille:**
 - M0 – tyhmä, ei ammattirakentamiseen
 - M1 – tyhmä, ei ammattirakentamiseen
 - **M2 – Nurjhduskäyrän ja yhteisvaikutuskaavan käyttö**, eli tavallinen ammattimainen teräsrakennesuunnittelu
 - **Sivusiirtyville (sway) rakenteille:**
 - **(EM) – Nurjhduspituuden kasvattaminen** ympäröivien rakenteiden jäykkyys huomioon ottaen
 - Äärimmilleen yksinkertaistettu, helppotajuinen, mitoittaa sauvat oikein mutta **aliarvioi liitosten globaalit 2. kertaluvun voimat** (second order sway effects)!!! Voidaan kieltää kansallisella liitteellä, Suomessa tuskin kielletään...
 - **M3 – Vaakakuormien kasvattaminen $\alpha_{cr,sw}$:n perusteella**
 - **Loistava väline sivusiirtyvyyden problematiikan ymmärtämiseen!**
 - Hieman työläs koneella ja erittäin työläs käsin laskettaessa
 - Vaatii $\alpha_{cr,sw}$:n ratkaisemista (ominaisarvoratkaisija)
 - Mahdollistaa välitulosten raportoinnin ja tarkastamisen (!)
 - M4 – Geometrisesti epälineaarinen FE-laskenta tasossa, nurjhduskäyrät tasosta ulos.
 - M5 – Geometrisesti epälineaarinen FE-laskenta sekä tasossa että tasosta ulos