



Keskustakirjaston kaivannon mitoitus



Esityksen sisältö

- Eurokoodin mukainen tuetun kaivannon mitoitus
- Esimerkkilaskelma
 - Ankkurin mitoitus
 - Ponttiseinän momenttikestävyys
 - Tukipalkin kestävyys
 - Juuritapin kestävyys
 - Siirtymät



Kuva: Rakennustaito, 6.5.2016, Ari Heinonen

<http://rakennustaito.fi/rakentaminen/lahes-pilariton-keskustakirjasto-vaatii-hehtaariperustukset/>



Kaivanto-ohje, koulutustilaisuus 2016
Juha Kujansuu / Sipti Oy

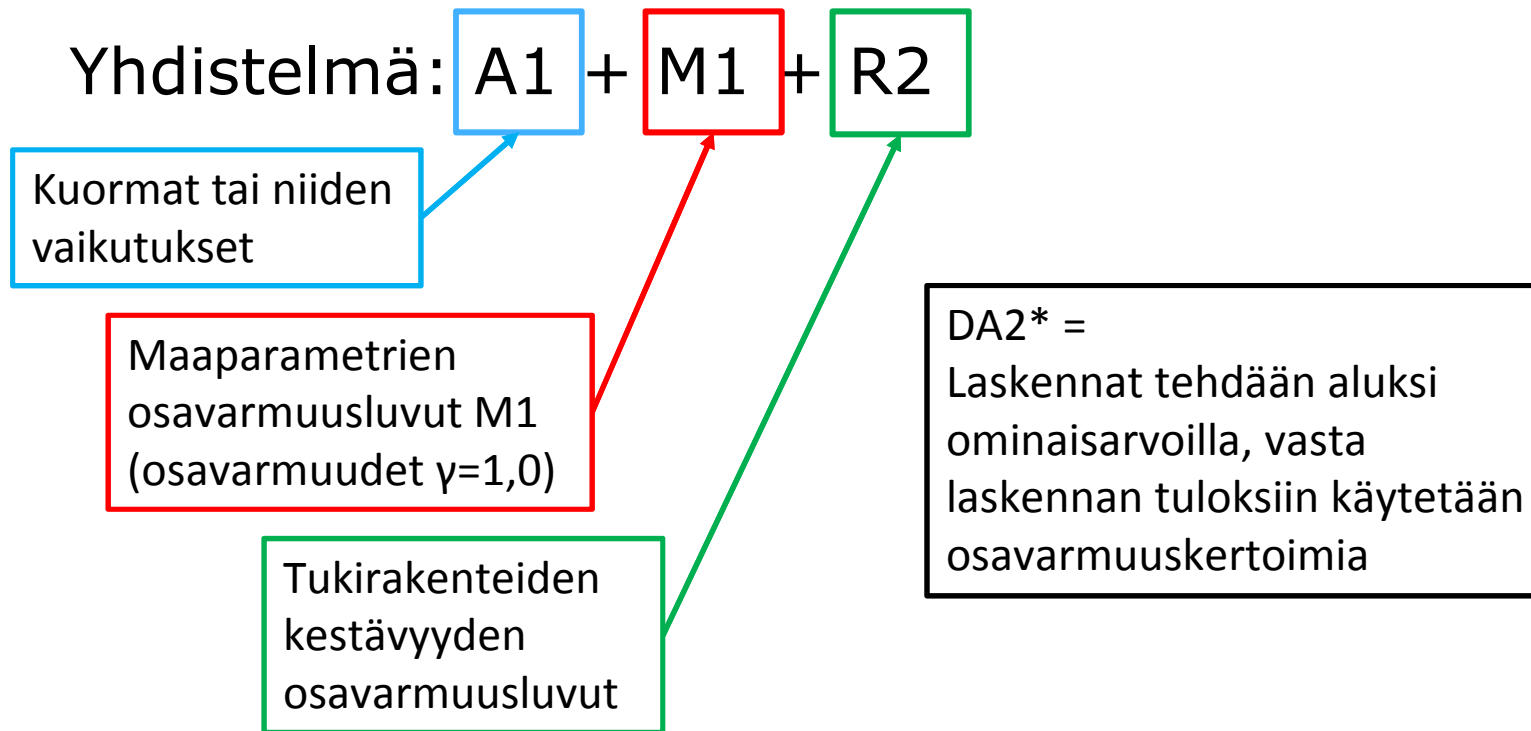
29.11.2016

3



Eurokoodi

Tuetut kaivannot mitoitetaan eurokoodin mukaisesti mitoitustavalla DA2*.





Eurokoodi (yleinen)

- Tukiseinämitoituksessa kuormien yhdistelmänä käytetään epäedullisempaa kahdesta seuraavasta vaihtoehdosta

$$1,35 * [K_{FI} * G_{kj,sup}] + 0,9 * G_{kj,inf} \quad (\text{EN 1990 6.10 a})$$

$$1,15 * [K_{FI} * G_{kj,sup}] + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * [K_{FI} * Q_{k,1}] + 1,5 * [K_{FI} * \sum_{i>1} \Psi_{0,i} * Q_{k,i}] \quad (\text{EN 1990 6.10 b})$$

- $G_{kj,sup}$ = kaatavien pysyvien kuormien/vaikutusten ominaisarvo
- $G_{kj,inf}$ = vaikuttavien pysyvien kuormien/vaikutusten ominaisarvo
- $Q_{k,i}$ = kaatavan muuttuvan kuorman/vaikutuksen ominaisarvo
- K_{FI} = kuormakerroin, CC3; $K_{FI}=1,1$ ja CC2; $K_{FI}=1,0$ (CC1=luokitusta ei käytetä kaivannoissa)

- Tukirakenteita mitoittaessa käytetään lisäksi mallikerrointa γ_M



Mallikerroin?

- Tukirakenteiden mitoituksessa saadut rasitukset tulee vielä kertoa mallikertoimella γ_M
pysyvillä rakenteilla $\gamma_M = 1,35$,
työnaikaisilla rakenteilla $\gamma_M = 1,15$
- *“Mallikerrointa käytetään syystä, että alun perin rakenteellisessa tarkastelussa pysyvän kuorman osavarmuusluvut on johdettu pysyvien rakenteiden **oman painon** hajonnan perusteella.”*
- *“Tukiseinien kohdalla käytetään samoja osavarmuuslukuja maanpaineesta aiheutuvien rasitusten laskentaan. Näiden hajonta muodostuu maan lujuuden hajonnasta ja laskentamallien hajonnasta, ja on selväsi suurempi kuin rakenteiden oman painon hajonta.”*

Huom! Mallikerroin ei koske ankkurin mitoitusta
Ankkurin mitoituksessa ankkuroinnille käytetään seuraavia
osavarmuuskertoimia $\gamma_{a,t} = 1,25$ ja $\gamma_{a,p} = 1,50$



Tukiseinän jatkuva sortuma

- Jos yksi ankkuri pettää, ei saa syntyä ketjureaktiota, jossa jokainen ankkuri pettää vuorollaan kuormituksen siirtyessä viereisille ankkureille
- Ankkureiden (ja vastaavien tukirakenteiden) ominaiskuormilla lasketun varmuuden myötäämistä vastaan tulee olla vähintään 1,1 kuormitustilanteessa, jossa yksi ankkuri pettää



Muuttuvan kuorman huomioiminen

- Varmuus voidaan jousimalleja käyttäessä kohdentaa kahdella **vaihtoehtoisella** tavalla
- VE1
 - Kaikki maaparametrit, nettovedenpaine ja muut pysyvät kuormat sisällytetään laskelmiin niiden ominaisarvoina ja muuttuvat kuormat arvolla:

$$q = q_k(\gamma_Q/\gamma_G) = q_k * 1,30$$

↑
(1,50/1,15) = ~1,30



Muuttuvan kuorman huomioiminen

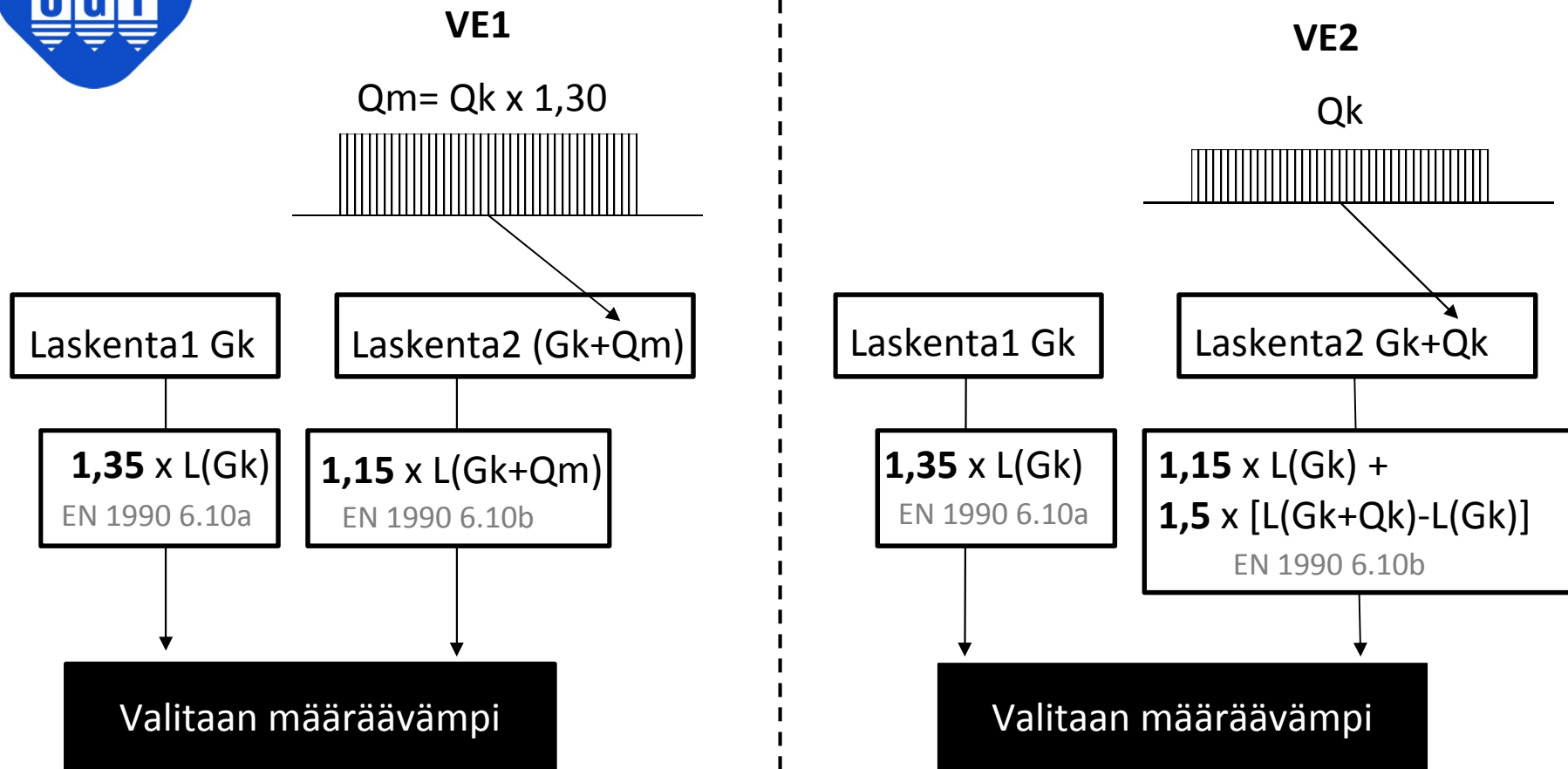
- VE2
 - Lasketaan ensiksi vain pysyvillä kuormilla
 - Seuraavaksi lasketaan siten, että muuttuvat kuormat ovat mukana ominaisarvoina
 - Tästä ratkaistaan laskentakertojen välinen erotus esim. tukivoimien kohdalla: $\Delta T = T_{P+M} - T_P$

T_P = pysyvät kuormat

T_{P+M} = pysyvät kuormat + muuttuvat kuormat



Yhtälöiden EN 1990 6.10a ja 6.10b mukaiset tapaukset VE1 ja VE2 laskentataavalla



G_k = pysyvien kuormat ominaisarvoina
 Q_k = muuttuvat kuormat ominaisarvoina
 Q_m = muuttuvat kuormat x 1,30
 $L()$ = tarkoittaa laskentatulosta kyseisillä arvoilla



Lähtötiedot KEKI

- Kaivannon luokitus **VAATIVA**

→ Luotettavuusluokka
RC2(CC2) $K_{FI} = 1,0$

- Tukiseinän käyttöikä on alle 2 v
eli **työnaikainen rakenne**

→ Vaikutus kertoimiin:
 $\gamma_{a,t} = 1,25$ (ankkuroinnin osavarmuuskerroin)
 $\gamma_M = 1,15$ (tukirakenteiden mitoituksen mallikerroin)



Tukiseinän esimerkkilaskelma

- Kahdelta tasolta tuettu ponttiseinä

1) Ankkurin mitoitus

1.1) Juotoksen mitoitus

1.2) Kalliokartion mitoitus

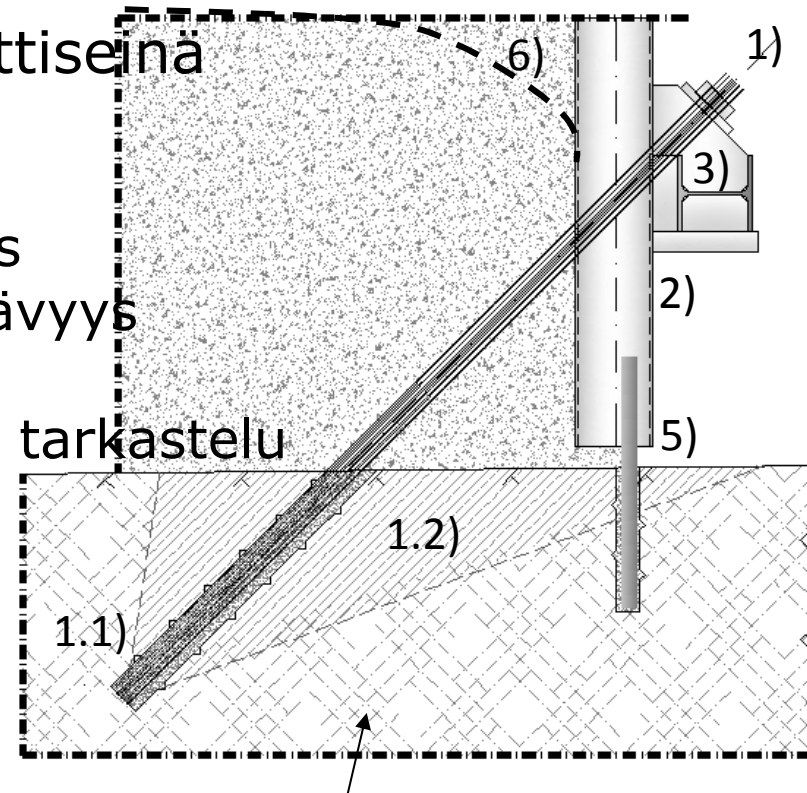
2) Ponttiseinän momenttikestävyys

3) Tukipalkin kestävyys

4) Yhden ankkurin pettämisen tarkastelu

5) Kalliopultin kestävyys

6) Siirtymät ja vaikutukset

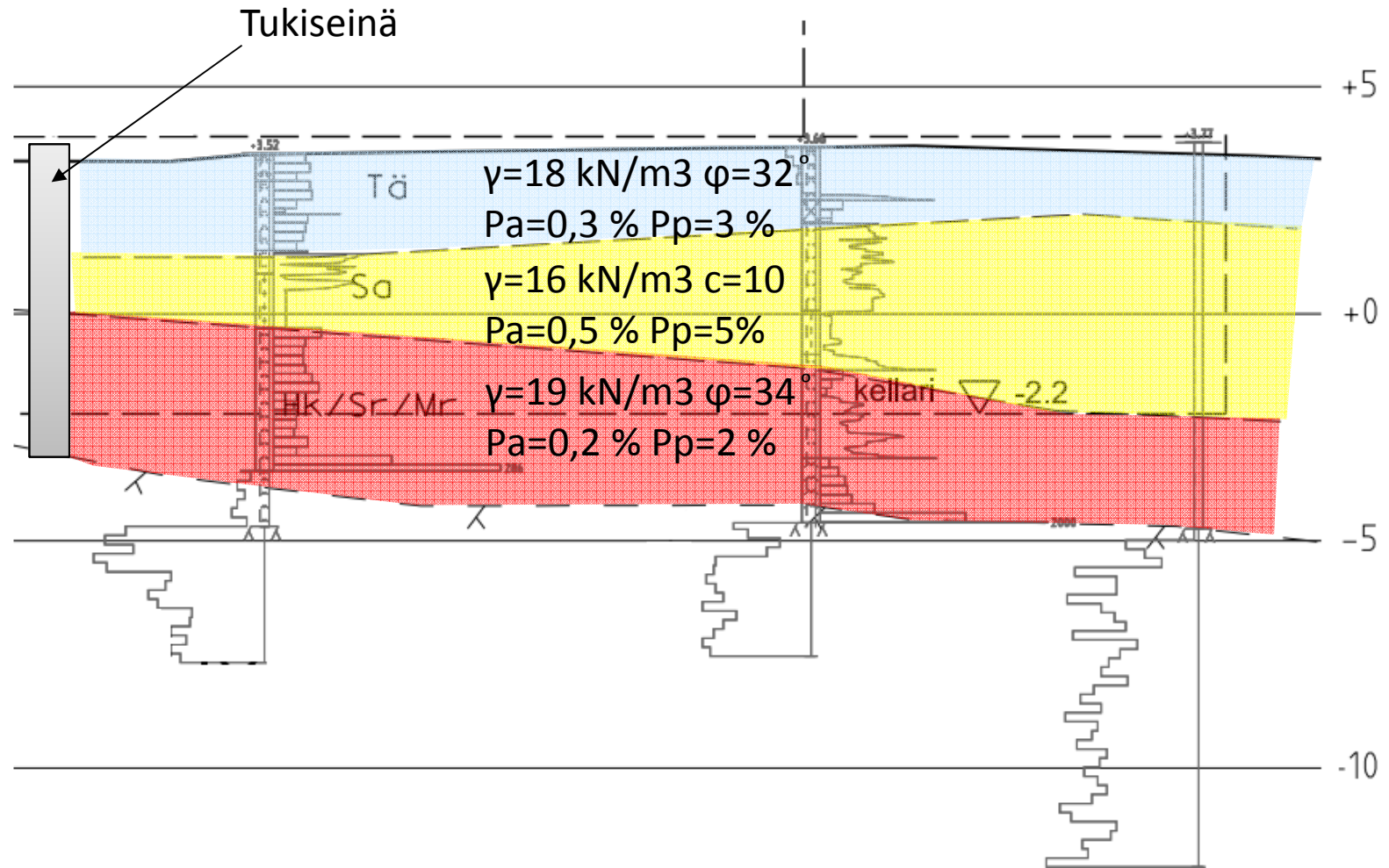


- Laskennat suoritettu Novapoint Geocalc- ja MS-tuki -ohjelmalla

Huom! Informatiivinen kuva, ei todellinen (toivottavasti)



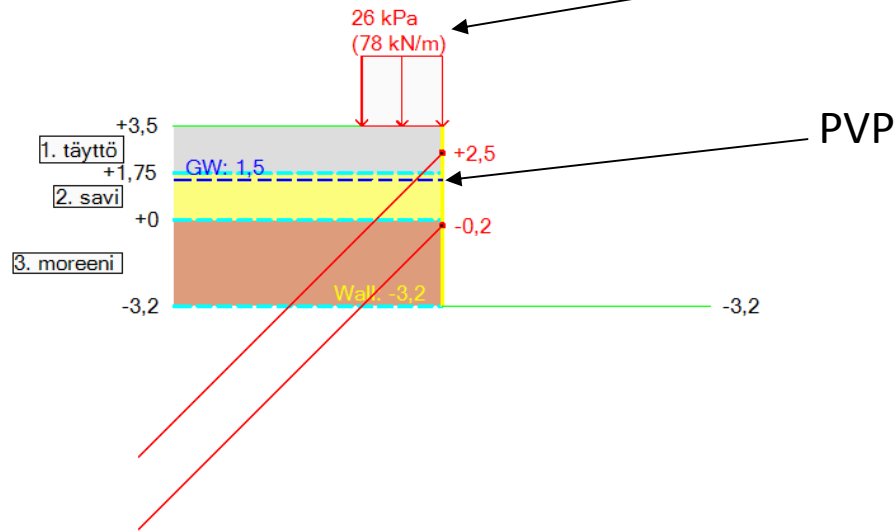
Lähtötilanne, kairaukset





Lähtötilanne, tukiseinä

$$q_d = q \times 1,30$$



| | |
|---|--------------|
| Wall Type | Sheetpile |
| Name | Larssen 603 |
| Manufacturer | ThyssenKrupp |
| Cross Section Area [m ²] | 0,01383 |
| Calculation Width [m] | 1 |
| Inertia Modulus [m ⁴] | 0,000186 |
| Section Modulus [m ³] | 0,0012 |
| Elastic Modulus [kPa] | 210000000 |
| Flexural Stiffness [kNm ²] | 39060 |
| Axial Stiffness [kNm ² /m ²] | 2904300 |
| Length of Wall [m] | 6,7 |

| Name | A [mm ²] | L [m] | α [°] | h [m] | F [kN] | Elastic Modulus [kPa] | Overdig [m] | Horizontal distribution [m] |
|-------------------|----------------------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|-------------|-----------------------------|
| ankkuri 9 punosta | 1350 | 16 | 45 | 1 | 175 | 195000000 | 0,5 | 4,8 |
| ankkuri 7 punosta | 1050 | 16 | 45 | 3,7 | 250 | 195000000 | 0,5 | 4,8 |

| Id | Layer Name | z [m] | h [m] | γ [kN/m ³] | Φ [°] | c [kPa] | Δc [kPa/m] | Ko Model | Ko | Earth Pres. Model | Ka | Kp | d/ud | Material Model | δya | δyp | ξ50a | ξ50p |
|----|------------|-------|-------|------------------------|-------|---------|------------|----------|------|-------------------|------|------|-----------|----------------|-------|------|--------|--------|
| 1. | täyttö | 3,5 | 1,75 | 18 | 32 | 0 | 0 | Jaky | 0,47 | User-defined | 0,35 | 5,08 | Drained | DCM | 0,003 | 0,03 | 0,0015 | 0,015 |
| 2. | savi | 1,75 | 1,75 | 16 | 0 | 10 | 1 | Jaky | 1 | User-defined | 1,25 | 1 | Undrained | DCM | 0,005 | 0,05 | 0,0025 | 0,0025 |
| 3. | moreeni | 0 | 3,2 | 19 | 34 | 0 | 0 | Jaky | 0,44 | User-defined | 0,35 | 5,83 | Drained | DCM | 0,002 | 0,02 | 0,001 | 0,01 |

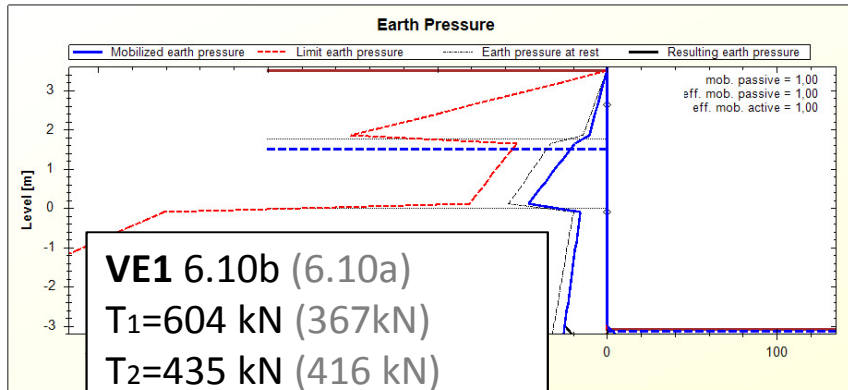
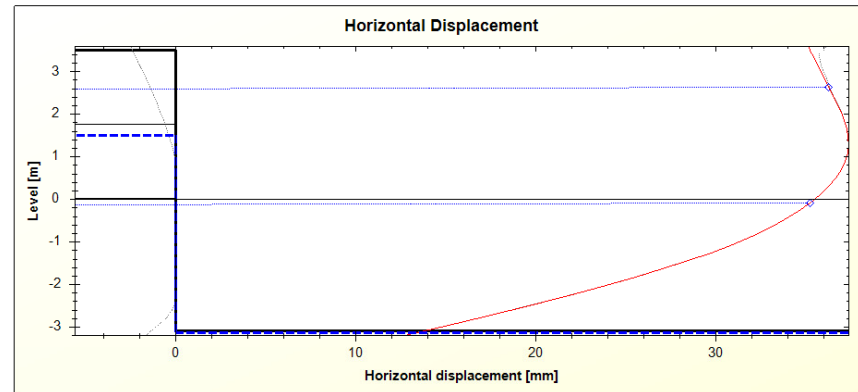
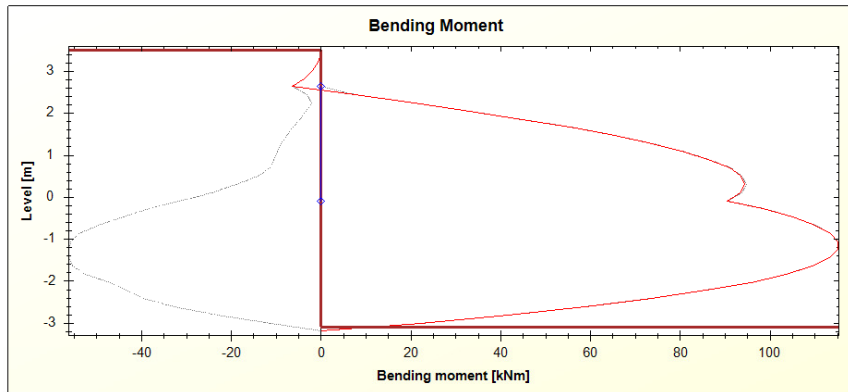
25% korotus K_a -arvoissa
tärinän vaikutus huomioitu



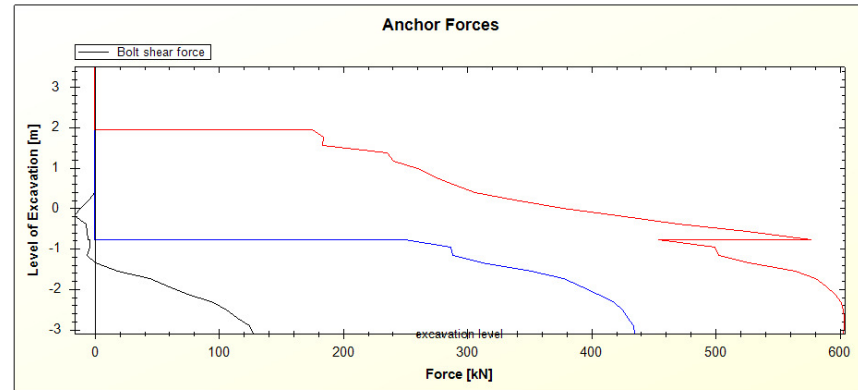
Laskentatulokset

Calculation Graphs Excavation Level -3,1 m

KEKI
Kaivanto-ohje koulutus
L603, 2-tukitasoa, kaivu kallioon
Juha Kujansuu, DI/Sipti Oy
Novapoint GeoCalc 3.0 (15.11.2016 17:03)



VE1 6.10b (6.10a)
T₁=604 kN (367kN)
T₂=435 kN (416 kN)
T_{bolt}= 128 kN (122 kN)
M=115 kNm (104 kNm)



Kaivanto-ohje, koulutustilaisuus 2016
Juha Kujansuu / Sipti Oy



Laskentatulokset

6.10a

$T_1=367$ kN
 $T_2=416$ kN
 $T_{\text{bolt}}=122$ kN
 $M=104$ kNm

x 1,35

$T_1=496$ kN
 $T_2=562$ kN
 $T_{\text{bolt}}=165$ kN
 $M=140$ kNm

6.10b

$T_1=604$ kN
 $T_2=435$ kN
 $T_{\text{bolt}}=128$ kN
 $M=115$ kNm

x 1,15

$T_1=695$ kN
 $T_2=500$ kN
 $T_{\text{bolt}}=147$ kN
 $M=132$ kNm

Laskennan
mitoitusarvot

$T_1=695$ kN
 $T_2=562$ kN
 $T_{\text{bolt}}=165$ kN
 $M=140$ kNm



1) Ankkurin mitoitus

- Suurin ankkurivoima $T_1=695$ kN
- Ankkuroinnin osavarmuuskerroin $\gamma_{a,t} = 1,25$
- $T_{1d}=695 \times 1,25 = 869$ kN
- Ankkurin koeveto $P_p=1800$ kN (9 kpl 15.7 punosta)
- 869 kN < 1800 kN Ankkuri OK!

- Ankkurointi ylimitoitettu. Tällä huomioitu mm. työmaan työkoneet esim. ajoneuvonosturit yms.

HUOM! Tässä yhteydessä ei siis huomioida mallikerrointa $\gamma_M=1,15$



1.1) Kallioankkurin kalliojuotos

Ankkurin juotospituus

Koetavoima

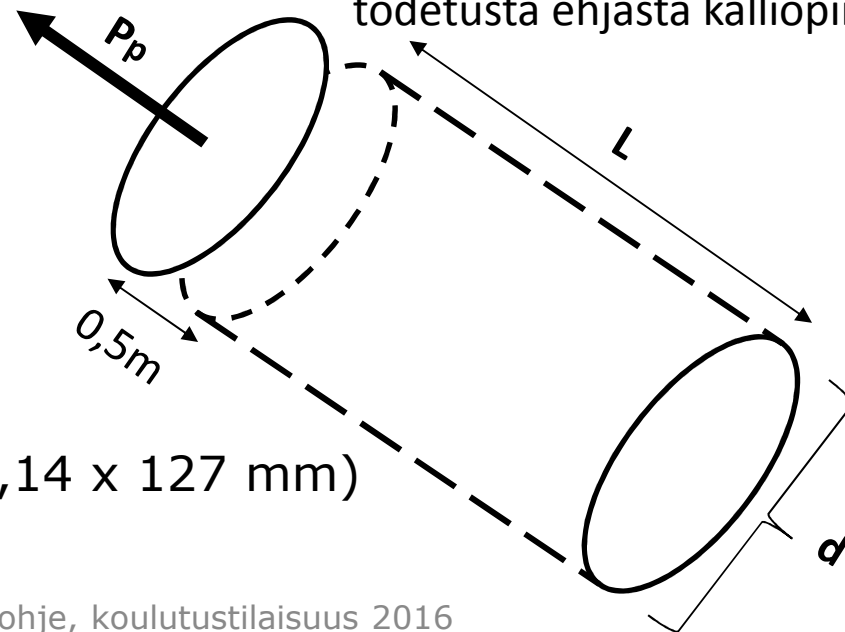
$$L = \frac{P_p}{\tau_d \cdot \pi \cdot d}$$

Porareian halkaisija

Huom! Juotospituus aina vähintään 3,0 m

L=ankkurin juotoksen pituus, Ehjän kallion katsotaan alkavan 0,5 m syvyydessä ankkuriporauksen yhteydessä todetusta ehjästä kalliopinnasta

Juotoslaastin ja kallion välisen tartunnan mitoituslujuus kN/m², korkeintaan 1,0 MPa, mikäli ennakkokokeilla ei pystytä osoittamaan suurempaa arvoa



$$L = 1800 \text{ N} \times 10^3 / (1 \text{ N/mm}^2 \times 3,14 \times 127 \text{ mm})$$
$$= 4511 \text{ mm} = \sim 4,5 \text{ m}$$



1.2) Kalliokartion mitoitus

Kappaleen painon G + kappaletta kuormittavan pysyvän pystykuorman N tulee ylittää ankkurin koevetovoima eli **$G+N > P_p$**

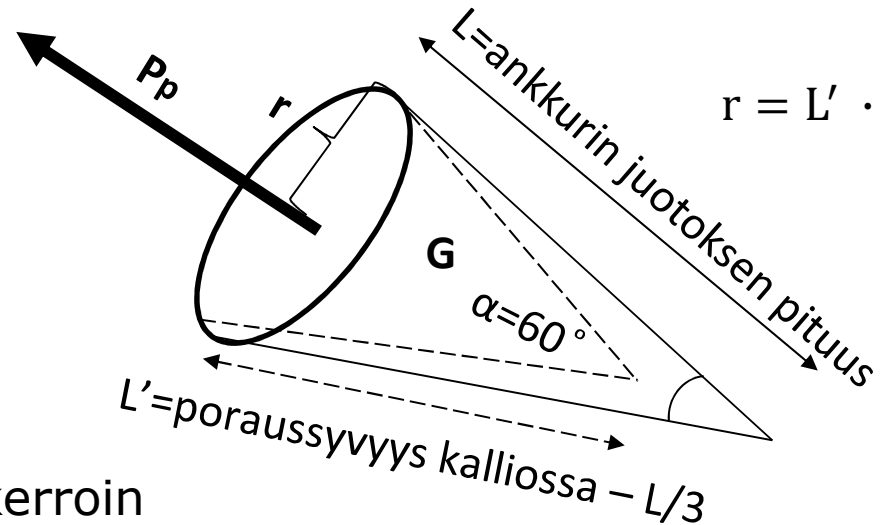
Kartion tilavuus
 $V = 1/3 \times L' \times r^2 \times \pi$

$$G = (V \gamma') \times \gamma_G$$

Tehokas tilavuuspaino juotostasossa
 $\gamma' = 17,5 \text{ kN/m}^3$

Edullisen kuorman varmuuskerroin
 $\gamma_G = 0,9$

$N =$ maasta tuleva tehokas paino



$$r = L' \cdot \tan 30^\circ$$

Rikkonaisessa kalliossa $\alpha = 60^\circ$,
homogeenisessä $\alpha = 90^\circ$



1.2) Kalliokartion mitoitus

Kokeilu; porausyvyys 6 m ehjään kallioon $\rightarrow L'=4,0$

$$G = \underbrace{\left\{ \frac{1}{3} \times 4,0 \text{ m} \times [4,0 \text{ m} \times \tan(30^\circ)]^2 \times \pi \right\}}_V \times \underbrace{17,5 \text{ kN/m}^3}_{\gamma_G} \times 0,9 = 352 \text{ kN}$$

Tehokas jännitys kallion pinnassa $\sim 112 \text{ kN/m}^2$
(kalvon sivun 13-14 olosuhteissa)

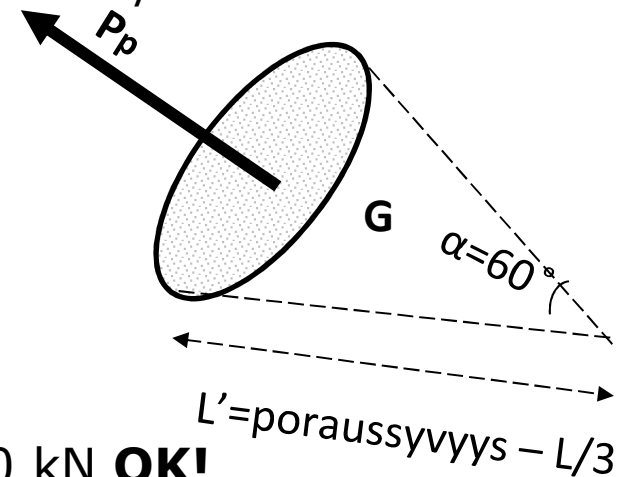
$$\begin{aligned} r &= 4,0 \text{ m} \cdot \tan 30^\circ \\ r &= 2,31 \text{ m} \\ A &= (2,6 \text{ m})^2 \times \pi \\ A &= 16,8 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Teoriassa ankkurin koevetovoima kohdistuisi $\sim 21 \text{ m}^2$ kokoisen kappaleen alalle, jolloin N olisi $16,8 \text{ m}^2 \times 112 \text{ kN/m}^2 = 1882 \text{ kN}$

$$G + N > P_p = 2233 \text{ kN} > 1800 \text{ kN} \text{ OK!}$$

Huom! Allekirjoittaneen mielestäni myös N tulee kertoa 0,9 kertoimella, koska N on tässä tapauksessa edullinen kuorma.

$$1882 \text{ kN} \times 0,9 + 501 \text{ kN} = 2194 \text{ kN} > 1800 \text{ kN} \text{ OK!}$$



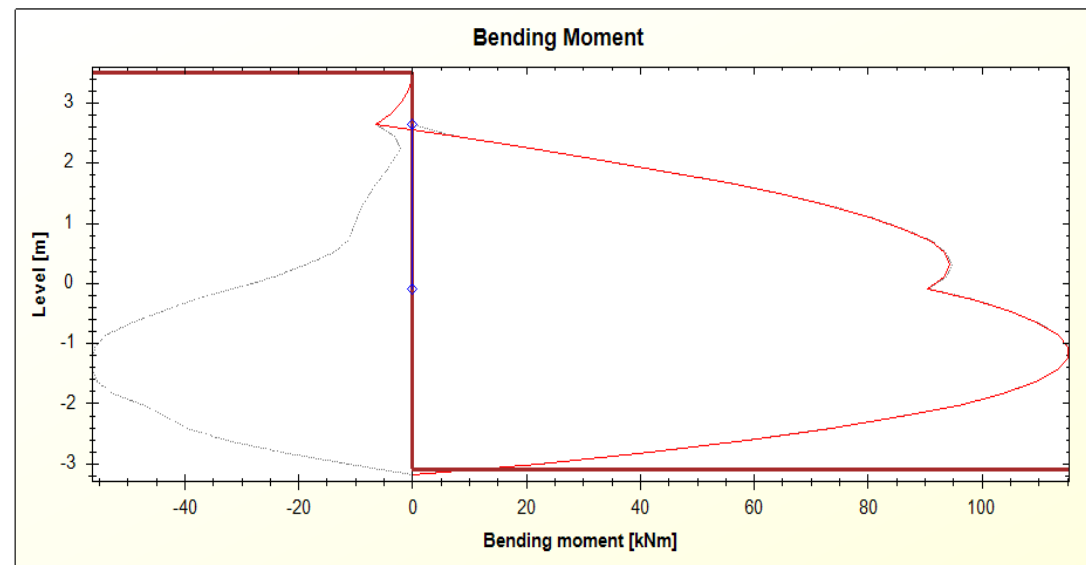


1) Lopputulokset

- Ankkurointi ok (punokset riittää)
- Min. juotospituus 4,5 m
- $L' = 4,0$ m (juotospituus – $L/3$)
- Porauspituuden tulisi olla vähintään:
 $0,5 + 4,0 + (6,0 \text{ m}/3) = 6,5$ m



2) Ponttiseinärakenne, pontin taivutusrasitus



- $M_{sd} \times \gamma_M = 104 \text{ kNm} \times 1,35 \times 1,15 = 161 \text{ kNm}$

6.10a

Työnaikaisen rakenteen mallikerroin



2) Ponttiseinärakenne, pontin taivutuskestävyys

- Poikkileikkauksen taivutuskestävyys M_{rd}

$$M_{rd} = \beta_B \times W_{pl} \times f_d / \gamma_{M0}$$

Ponttiseinän osavarmuusluku,
kansallisessa liitteessä
suositellaan 1,0

Teräksen laskentalujuus

Parametri, joka huomioi leikkausvoiman
mahdollisen puutteellisen siirtymisen
ponttiliitoksessa. Yleensä $\beta_b=1,0$.

Jatkuvalla seinällä määritetty plastinen taivutusvastus
käytetty **kimmoista taivutusvastusta** laskennassa

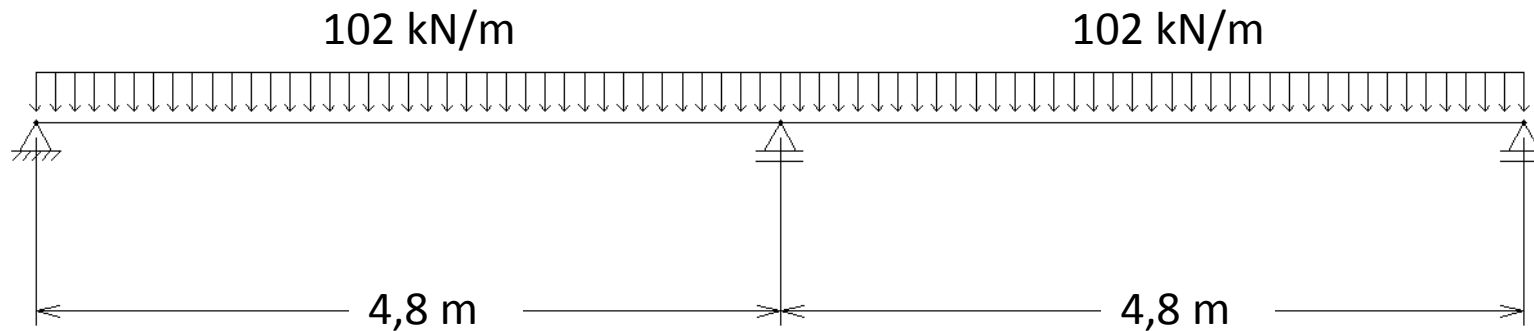
$$M_{rd} = 1,0 \times 1200 \text{ cm}^3 \times 355 \text{ N/mm}^2 / 1,0 = 426 \text{ kNm}$$

161 kNm < 426 kNm **Mitoitus Ok!**



3) Ponttiseinärakenne, ankkuripalkin kestävyys

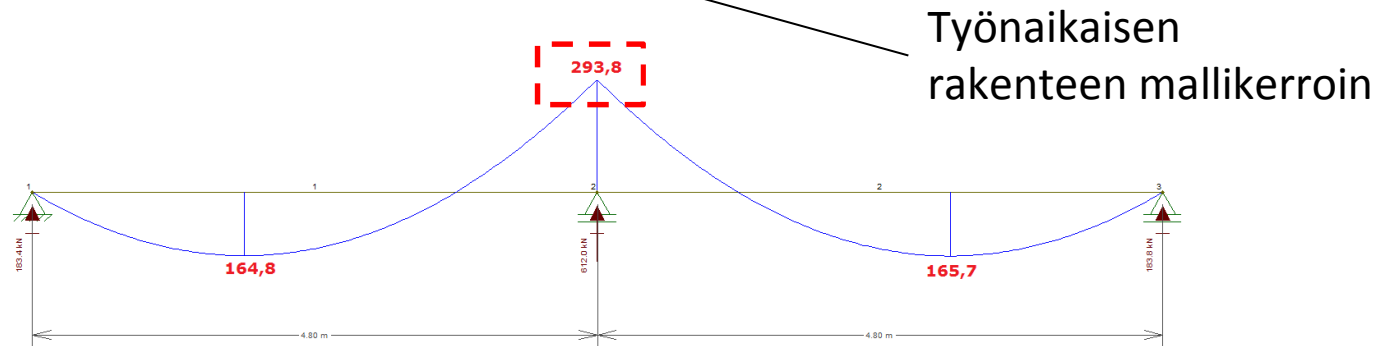
- Suurin ankkurin suuntainen tukireaktio 695 kN (6.10b)
→ $695 \text{ kN} / 4,8 \text{ m} / \sqrt{2} = 102 \text{ kN/m}$



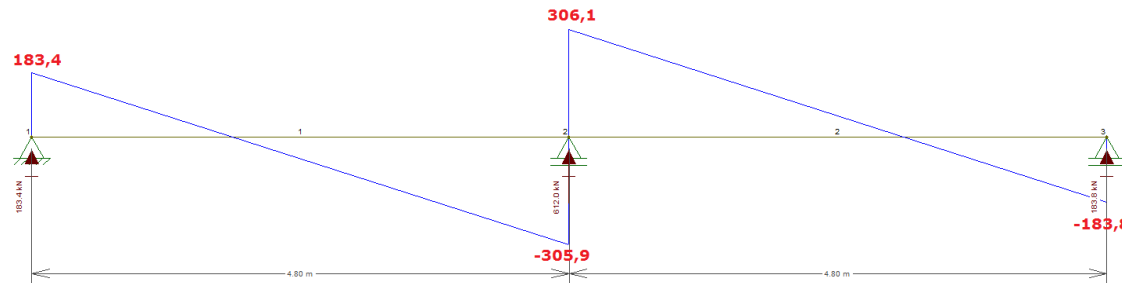


3) Ponttiseinärakenne, ankkuripalkin kestävyys

- Suurin momentti: 294 kNm
- $M_{pd} = 294 \text{ kNm} \times 1,15 = 338 \text{ kNm}$



Huom! Tukimomentin voi tarvittaessa redusoida!





3) Ponttiseinärakenne, ankkuripalkin kestävyys

- Poikkileikkauksen taivutuskestävyys M_{rd}

$$M_{rd} = W_{pl} \times f_d / \gamma_{M0}$$

Ponttiseinän osavarmuusluku,
kansallisessa liitteessä
suositellaan 1,0

Palkille määritetty
plastinen taivutusvastus
(esimerkissä HEB300 ja
kimmoinen taivutusvastus)

Teräksen laskentalujuus

$$M_{rd} = 1678 \times 10^3 \text{ mm}^3 \times 355 \text{ N/mm}^2 / 1,0 = 596 \text{ kNm}$$

$$M_{pd} < M_{rd} = 338 \text{ kNm} < 596 \text{ kNm} \text{ **Mitoitus OK!**}$$



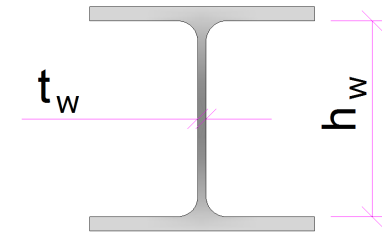
3) Ponttiseinärakenne, ankkuripalkin kestävyys

- Leikkausrasituksen vaikutus? Leikkauksen yhteisvaikutus tulee huomioida, jos leikkausrasitus on enemmän kuin 0,5 x palkin plastinen leikkauskestävyys

Plastinen leikkauskestävyys

$$A_v = \eta \times h_w \times t_w = 1,20 \times 262\text{mm} \times 11\text{mm} = 3458\text{mm}^2$$

$$V_{pl,z,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 3458\text{mm}^2 \cdot \frac{355\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}/\sqrt{3}}{1,0} = 709 \text{ kN}$$



$$V_{z,Ed} = 306 \text{ kN} \times 1,15 = 352 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} < V_{pl,z,Rd} \times 0,5 \quad \rightarrow \quad 352 \text{ kN} < 709 \text{ kN} \times 0,5$$

$$\rightarrow 352 \text{ kN} < 355 \text{ kN}$$

Leikkauksen yhteisvaikutusta ei tarvitse huomioida!



4) Yhden ankkurin pettäminen

- Ankkurin pettäessä ankkuripalkkiin vaikuttava vaakakuormitus on ~ 45 kN/m (määritetty MS-tuella). Ankkurin "voima" jakaantuu pysty- ja vaakasuunnassa muille ankkureille ja tukiseinään syntyä siirtymää.
- Esimerkissä oletuksena on, että ankkurin pettäminen tapahtuu, kun tukiseinä juuripalkkeineen on rakennettu. Huom! Ulkoisen kuorman vaikutusta ei ole otettu huomioon.

$$M_{pd} = q \times l^2 / 8 = 45 \text{ kN/m} \times (9,6 \text{ m})^2 / 8 = 518 \text{ kNm}$$

Plastinen taivutusvastus HEB300:

$$M_{rd} = 1869 \times 10^3 \text{ mm}^3 \times 355 \text{ N/mm}^2 / 1,0 = 663 \text{ kNm}$$

Kokonaisvarmuus-
vaatimus (s.7)

$$M_{rd} / M_{pd} = 663 \text{ kNm} / 518 \text{ kNm} = 1,28 > 1,1 \quad \textbf{Mitoitus OK!}$$

Tukitasolla 2 vastaavanlainen ankkurin pettäminen mobilisoisi viereisille ankkureille suurin piirtein saman suuruisen kuormituksen.

Ponttiseinän taivutusvastus on niin suuri, että se ei tule mitoittavaksi.



5) Kalliopultti, taivutettuna rakenteena

- Taivutuskestävyyden mitoitusarvo

$$M_{rd} = W_{pl} \times f_d / \gamma_{M0}$$

Pyöreän juuripultin rakenteellinen osavarmuusluku $\gamma_{M0} = 1,0$

Pultin plastinen taivutusvastus

Teräksen myötöraja $S355 = 355 \text{ N/mm}^2$

Pyöreän pultin plastinen taivutusvastus

$$W_{pl} = 1,7 \times \pi \times (60\text{mm})^3 / 32 = 36050 \text{ mm}^3$$

Pultin taivutusmomenttikapasiteetti

$$M_{rd} = 36050 \text{ mm}^3 \times 355 \text{ N/mm}^2 / 1,0 = 12,8 \text{ kNm}$$



5) Kalliopultin mitoitus

- Tukiseinän alapäähän vaikuttava voima $N_d = 165 \text{ kN/m}$
- Pulttiin kohdistuva momentti

$$M_{sd} = N_{sd} \times e \times \gamma_M$$

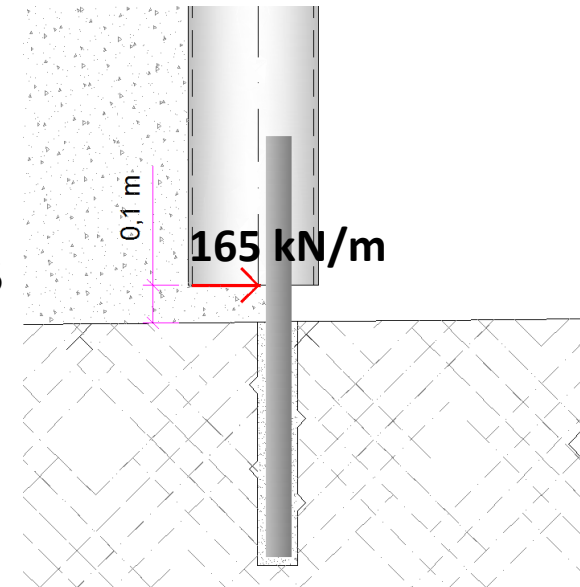
Mitoituskuorma juuripultille

Kuorman mallikerroin 1,15

Mitoitusoletus, pontin alareunan etäisyys väh. 0,1 m kallion pinnasta

$$N_{sd} = N_d \times s$$

Juuripulttien väli [m]



$$M_{sd} = 165 \text{ kN/m} \times 1,2 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} \times 1,15 = 22,8 \text{ kNm}$$
$$M_{sd} < M_{rd} \quad 22,8 \text{ kNm} < 12,8 \text{ kNm} \quad \text{Mitoitus EI ok!}$$



5) Kalliopultin mitoitus

- *”Jos pulttiin kohdistuu leikkausvoimaa joka on enemmän kuin 1/2 pultin plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä, tulee leikkausvoiman vaikutus pultin taivutuskestävyyteen ottaa huomioon”*

Pultin plastisuusteorian mukainen kestävyys:

$$V_{pl,Rd} = A_v \times f_y / \sqrt{3} / \gamma_{M0} =$$

Leikkauspinta-ala Teräksen myötöraja
S355 = 355 N/mm² Kestävyyden osavarmuusluku
γ_{M0} = 1,0

$$0,5 \times (30\text{mm})^2 \times \pi \times 355 \text{ N/mm}^2 / \sqrt{3} / 1,0 =$$
$$290 \text{ kN} > 228 \text{ kN} \longleftarrow 1,15 \times 165 \text{ kN/m} \times 1,2\text{m}$$

Leikkausvoiman vaikutusta ei tarvitse huomioida



5) Kalliopultin mitoitus

- Pultin kapasiteetti, kun pultti on kiinnitetty molemmista päistä kiinni

$$Q_{pu} = (A \times f_d) / \eta_t$$

← Juuripultin menetelmäkohtainen kerroin = 2,4

Pultin pinta-ala

$$= (2827 \text{ mm}^2 \times 355 \text{ N/mm}^2) / 2,4 = 418 \text{ kN}$$

Maksimi pulttiväli $s =$

$$s \leq Q_{pu} / (N_d \times \gamma_M)$$

$$s \leq 418 \text{ kN} / (165 \text{ kN/m} \times 1,15) = 2,2 \text{ m}$$



Ajatuksia tukiseinän mitoituksesta

- Juuritapin mitoitus taivutettuna rakenteena?
- Juuritapin mitoituksessa kallion pinnan etäisyydellä huomattava vaikutus taivutusmomenttiin eli ponttien alapään saattaminen lähelle kallion pintaa oleellista!
- Ankkurikonsolin rakenteellinen mitoittaminen ja työmaaolosuhteet tulee ottaa huomioon ankkurikotelon rakenteen suunnittelussa! (ks. Kaivanto-ohjeen periaateratkaisu s.62)
- Kalliokartion mitoituksessa kartion kulmalla suuri vaikutus (60° ... 90°)
- Leikkausvoima harvoin tulee mitoittavaksi, mutta yhteisvaikutus tulee kuitenkin huomioida

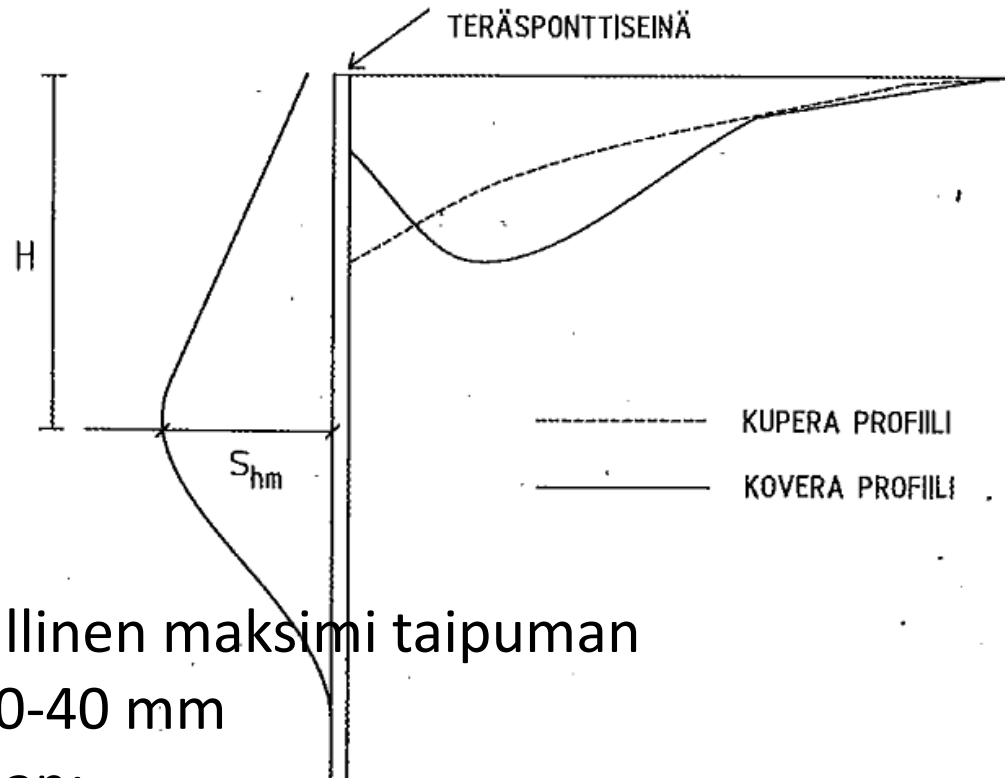


6) Siirtymät

- Tukiseinän taipuman vaikutusta ympäristöön voidaan arvioida kaivanto-ohjeen kaavoilla (s.33-34)
- Kuperan mallisessa painumakuvaajassa maksimi painuma syntyy tukiseinän viereen (kuvaava kitkamaiden käyttäytymistä) ja koveran mallisessa kuvaajassa painuma syntyy jonkin matkan päähän (kuvaava koheesiomaiden käyttäytymistä)



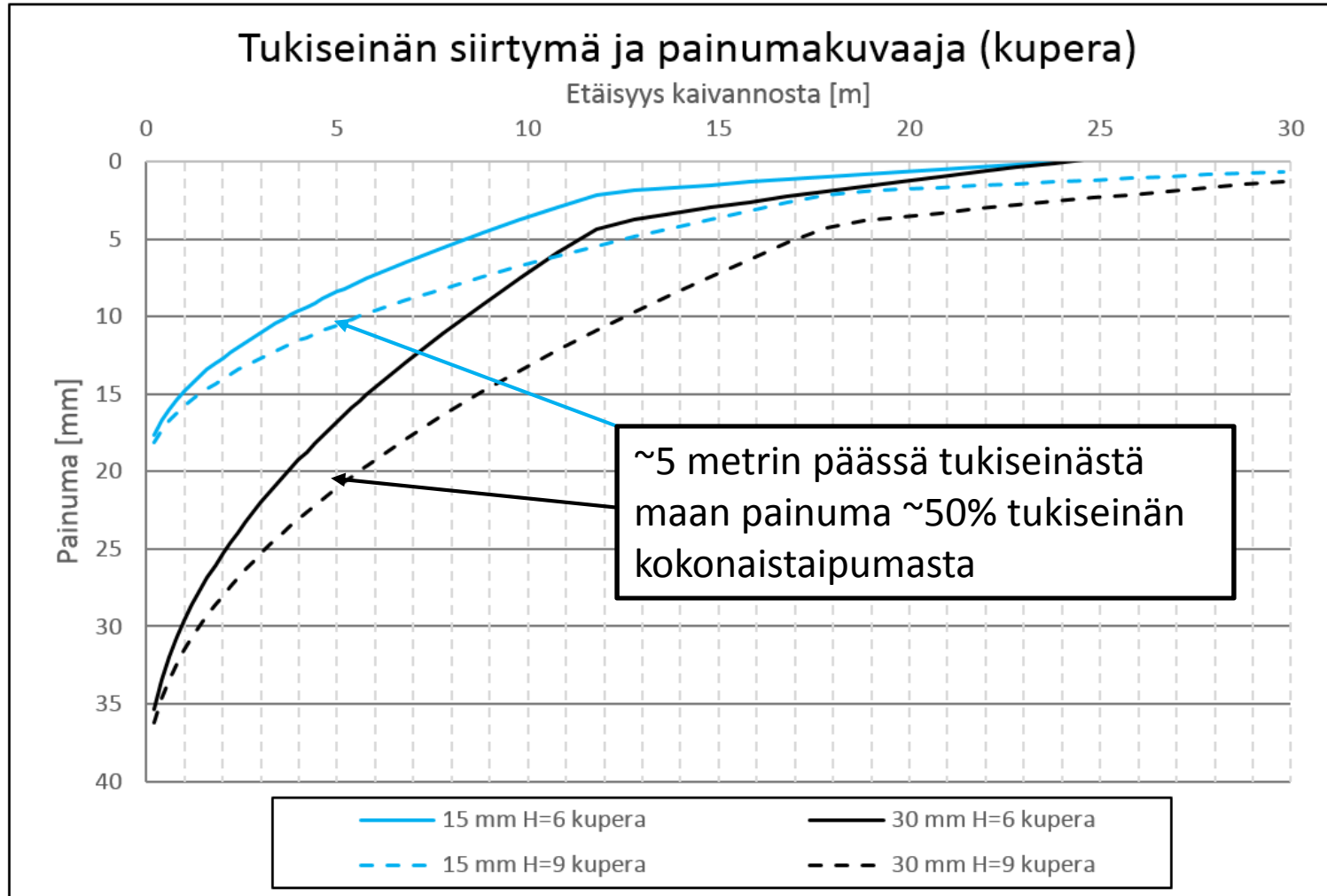
6) Siirtymät



- Tukiseinän laskennallinen maksimi taipuman suuruusluokka on 20-40 mm
- Lähtötietona tarvitaan:
 - Kaivussyvyys H
 - Maksimi vaakasiirtymä S_{hm}
 - Tulee valita kupera tai kovera painumakuvaaja



6) Siirtymät





6) Siirtymät

