

Kaivantotoimikunnan koulutuspäivä 17.5.2021

TUKISEINÄMITOITUKSEN LÄHTÖKOHDAT

Juha Kujansuu, Geosolver Oy



Suomen Geoteknillinen Yhdistys
– Finnish Geotechnical Society

Sisältö:

- Yleistä ohjeesta
- Mitoitusperiaatteet
- Mitoitusyhtälöt, osavarmuusluvut, mallikertoimet, käsitteet
- Käyttöiän vaikutus
- Yhden tuen pettäminen

Yleistä ohjeesta 271-2019

- Ohje täydentää RIL 263-2014 Kaivanto-ohjeen sekä NCCI 7 osalta tukiseinien rakenteellista mitoitusta
- Ohjeeseen on pyritty korvaamaan vanhat ohjeet ja tuomaan ne Eurokoodi aikaan:
 - RIL 181-1989 Rakennuskaivanto-ohje
 - RIL 194-1992 Putkikaivanto-ohje
- Ohjeen rakenteellisen mitoituksen sisällön osalta suurin osa peräisin standarteista:
 - EN 1993-5
 - EN 1993-1

Mitoituksen lähtökohdat

- Tukiseinien mitoitus suoritetaan Eurokoodin DA2* mukaisella mitoitusstavalla
- DA2* mitoitusstavassa tukiseinälaskenta tehdään ensiksi ominaisarvoilla. Osavarmuuslukuja käytetään tukiseinämitoituksen laskennan lopputuloksiin (tukivoimiin/rasitukseen jne.)
- Tukiseinän käyttörajatilamitoitus puolestaan riippuu yleensä ympäristön asettamista vaatimuksista (mm. tukiseinän taipuma, maan painuminen tukiseinän taustan puolella)
- Ohje keskittyy pääosin murtorajatilamitoitukseen
- Tässä koulutuksessa pääpaino on teräsponsittiseinillä ja niihin liittyvillä teräsrakenteilla

Mitoituksen lähtökohdat

- Seuraamusluokan CC määrittäminen

Taulukko 1. Seuraamusluokat ja niiden kuvaukset /1/.

Seuraamusluokka	Kuvaus
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.

Mitoituksen lähtökohdat

- Seuraamusluokka & Luotettavuusluokka?
- Edellä mainitut seuraamusluokat ~~CC1~~, CC2 ja CC3 voidaan liittää SFS-EN 1990 mukaisesti vastaaviin luotettavuusluokkiin RC1-RC3. Näiden pohjalta määritetään kuormakerroin K_{FI} . Kaivannot kuuluvat aina vähintään RC2(CC2) luokkaan.

Taulukko 2. Kuormakerroin K_{FI} /1/.

Kuormakerroin K_{FI}	Luotettavuusluokka		
	RC1	RC2	RC3
K_{FI}	0,9	1,0	1,1

- K_{FI} kerroin on aina vähintään **1,0** tai suurempi
- Hankekohtaisesti tilaaja voi tarvittaessa esittää kuormakertoimelle K_{FI} poikkeavia (ts. suurempia arvoja).

Kuormitusten määrittely ja periaatteet

- Geotekninen / pohjarakenteiden suunnittelijan tulee esittää voimien vaikutuksista syntyvien rasituksen (puristusvoimat, taivutusmomentit, leikkausvoimat, ankkurivoimat) ominaisarvot tukiseinien rakenteellista tarkastelua varten.
- Eurokoodin mukaisessa mitoitusmenettelyssä tulee tarkistaa, että kuormien vaikutuksen E_d voimasuureen mitoitusarvon tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin vastaava kestävyuden mitoitusarvo R_d .

$$E_d \leq R_d$$

Varmuusluvut – kestävyys tai materiaali

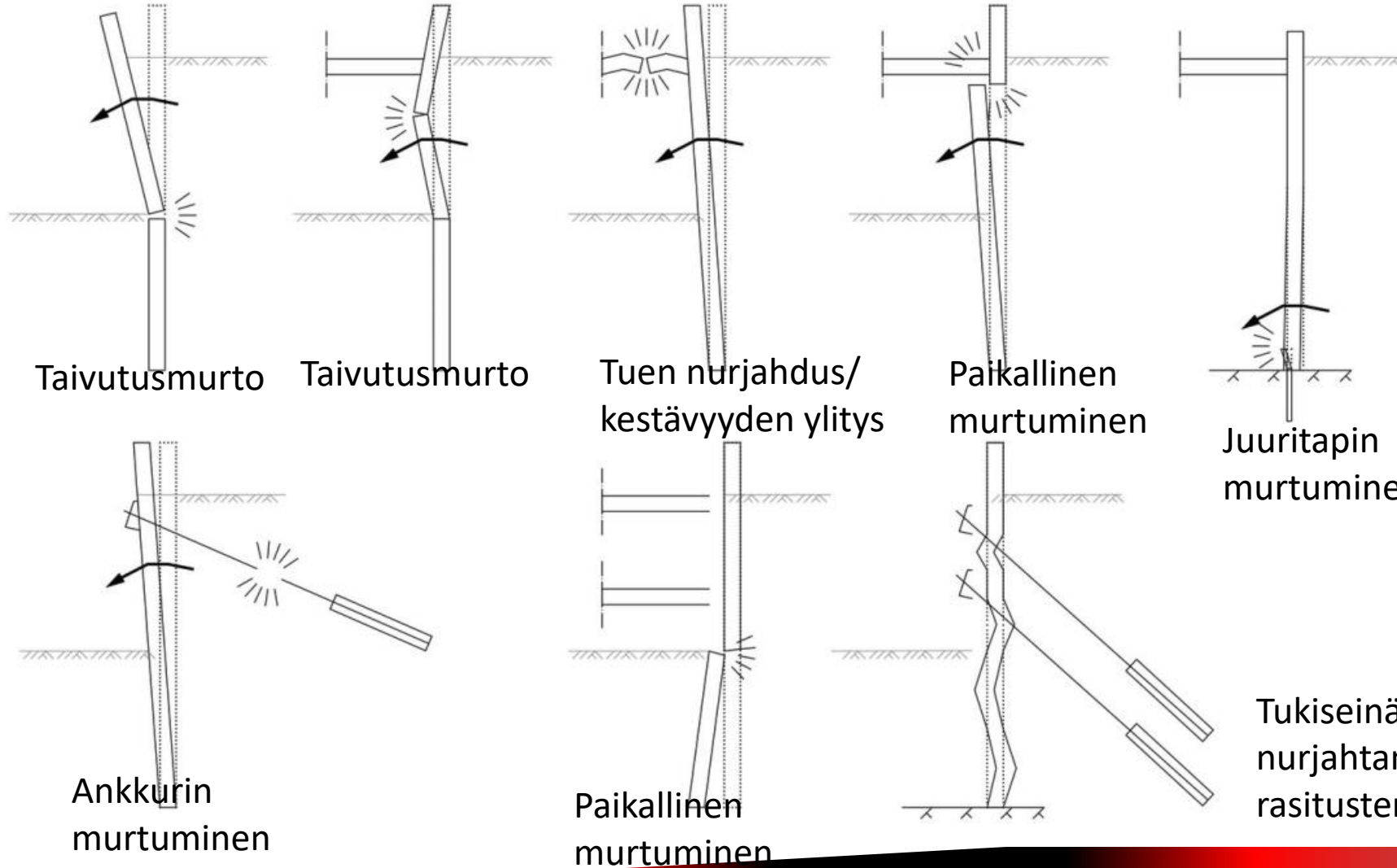
Tukirakenteelle käytetään mitoituslanteesta riippuen seuraavaksi esiteltyjä varmuuslukuja STR- ja GEO-rajatilassa.

Murtorajatiloista:

STR=kantavan rakenteen tai rakenneosan murtuminen tai huomattava muodonmuutos, joka johtaa kantokyvyn menetykseen.

GEO=rakennuspohjan murtuminen tai liiallinen muodonmuutos, joissa maan tai kallion lujuus on merkittävä kestävyuden aikaansaamisessa.

Vaurioitumismekanismit (tyypillisimmät)



Termeistä

- **Ominaisarvo**=laskennan tuloksiin tai kestävyyteen ei ole sovellettu osavarmuuslukuja tai mallikertoimia tai muita kertoimia
- **Kestävyysmitoitussarvo**=rakenneseosan kestävyys on määritetty käyttämällä tilanteeseen soveltuvaa osavarmuuslukua
- **Voimaisuuden/kuorman mitoitussarvo**=laskettuun rasitukseen tai kuormitukseen on sovellettu mallikertoimia, kuormakertoimia ja/tai osavarmuuslukuja

Kuormitusten määrittely ja periaatteet

- Tukiseinän rakenteellisen tarkastelun laativa suunnittelija käsittelee voimasuureiden ominaisarvot kuormien osavarmuusluvulla yhtälöiden 6.10a ja 6.10b mukaisesti.

RIL 263-2014 Kaivanto-ohjeen mukaisesti

$G_{kj,sup}$	kaatavien pysyvien kuormien/vaikutusten ominaisarvo
$G_{kj,inf}$	vakauttavien pysyvien kuormien/vaikutusten ominaisarvo
$Q_{k,i}$	on kaatavan muuttuvan kuorman/vaikutuksen ominaisarvo

$$(6.10a) \quad E_d = 1,35 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf}$$

$$(6.10b) \quad E_d = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot \Sigma(\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i})$$

NCCI 7 ohjeen mukaisesti

$$(6.10a) \quad E_d = 1,35 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf}$$

$$(6.10b) \quad E_d = 1,25 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} + \gamma_{Q,1} \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + \Sigma(K_{FI} \cdot \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i})$$

Kuormitusten määrittely ja periaatteet

- Tukiseinän rakenteellisen tarkastelun laativa suunnittelija käsittelee voimasuureiden ominaisarvot kuormien osavarmuusluvuilla yhtälöiden 6.10a ja 6.10b mukaisesti.

Yhtälössä 2.4.5 kerroin $\gamma_{Q,1} = 1,35$, kun kysymyksessä on ajoneuvo- tai kevyen liikenteen kuorma. Jos kyseessä on rautatiekuorma, niin $\gamma_{Q,1} = 1,45$. Muiden samaan aikaan vaikuttavien muuttuvien kuormien osavarmuusluku on 1,50. Muuttuvien kuormien osavarmuusluku edullisille tapauksille on 0.

NCCI 7:n mukaisessa yhtälössä 2.4.5 tulee huomioida, että pysyvän kuorman kerroin on 1,25 eikä 1,15.

Varmuusluvut – rakenteen käyttöikä

Pysyvä tai työnaikainen tukiseinä

Tukiseinä on työnaikainen, jos sen suunniteltu käyttöikä $\leq 2,0$ vuotta. Käyttöältään pidempiaikaiset tukiseinät ovat **pysyviä tukiseiniä**.

Käyttöikä siis vaikuttaa mitoituksellisesti ankkureiden osavarmuuslukuun sekä mallikertoimeen, joista myöhemmin lisää tarkempaa tietoa.

Huom! Jos tukiseinä on käyttöältään pysyvä, tulee se huomioida varsinaisessa tukiseinämitoituksessa myöskin!

Varmuusluvut – kestävyys tai materiaali

Teräs

- Teräsponttien ja –osien mitoituksessa teräksen kestävyuden osavarmuuslukuna käytetään taulukon mukaisia arvoja.

Teräsosien ja teräsponttien osavarmuusluvut teräsponttiseinämitoituksessa

γ_{M0}	1,00
γ_{M1}	1,00 ¹⁾
γ_{M2}	1,25
γ_{M5}	1,00

Huom!
Nurjahdusmitoituksessa
kerroin $\gamma_{M1}=1,1$

Varmuusluvut – kestävyys tai materiaali

Betoni - osavarmuusluvut

Taulukko 4. Murtorajatilojen materiaaliosavarmuuskertoimet betonille ja betoniteräksille /8/.

	Betoni γ_c	Betoniteräs γ_s
2-rakenneluokka	1,50	1,15

Varmuusluvut – kestävyys tai materiaali

Maa- ja kallioankkurit - osavarmuusluvut

Taulukko 5. Maa- ja kallioankkureiden kestävyden osavarmuusluvut /4/.

Tilapäinen ankkuri	Pysyvä ankkuri
$\gamma_{a,t} = 1,25$	$\gamma_{a,p} = 1,50$

Huom! Ankkureihin ei sovelleta mallikerrointa γ_{MK} !

Varmuusluvut – mallikerroin γ_{MK}

Mallikerrointa käytetään, koska rakenteellista tarkastelua varten johdetut pysyvän kuorman osavarmuusluvut on alun perin johdettu pysyvien rakenteiden oman painon hajonnan perusteella.

Tukiseinän mitoituksessa samoja osavarmuuslukuja käytetään maanpaineesta aiheutuvien rasitukset ja mitoitusarvojen laskentaan.

Näiden hajonta muodostuu maan lujuuden hajonnasta ja laskentamallien hajonnasta, ja on selvästi suurempi kuin rakenteiden oman painon hajonta.

(Kaivanto-ohje s. 102)

Varmuusluvut – mallikerroin γ_{MK}

Kun laskentakohteena on ankkuroituun, tuettuun tai vapaasti seisovaan tukiseinään kohdistua maanpainekuormia rajatilassa STR/GEO käytetään kaatavalle maan- ja vedenpaineelle kuorman mallikerrointa γ_{MK} :

$\gamma_{MK} = 1,15$ (työnaikaisille rakenteille)

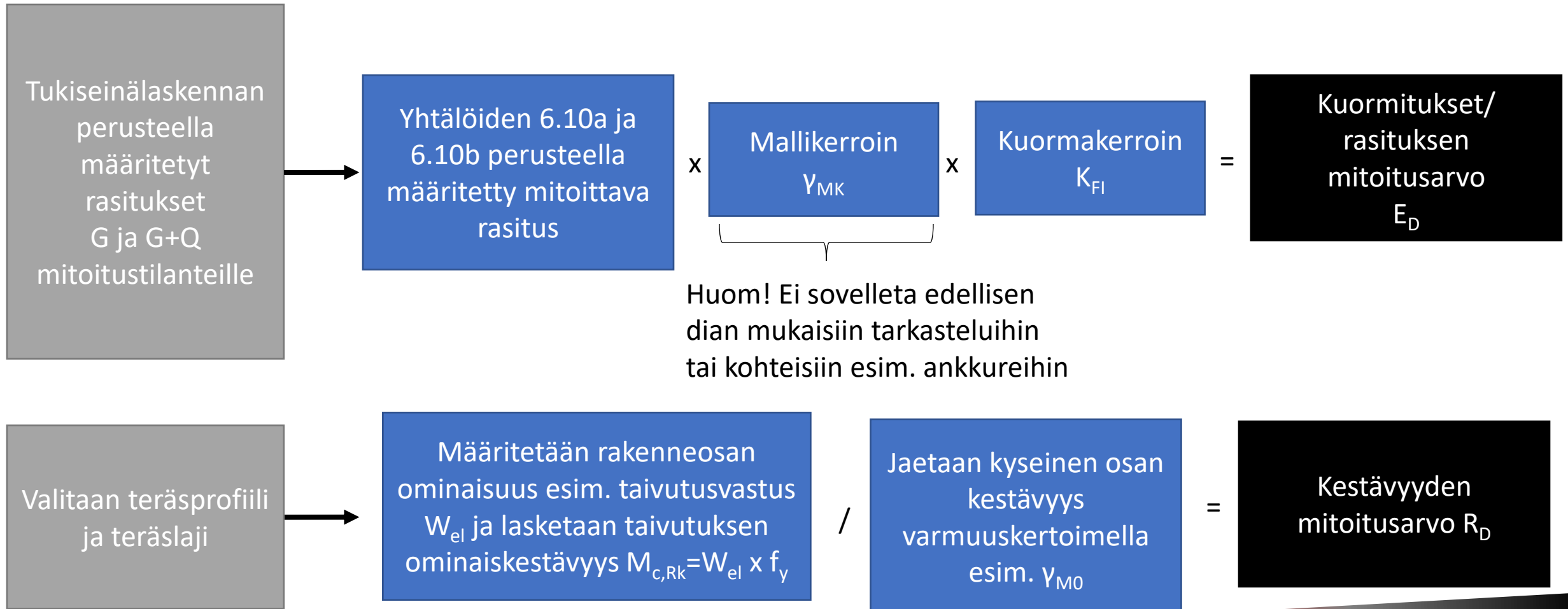
$\gamma_{MK} = 1,35$ (pysyville rakenteille)

Varmuusluvut – mallikerroin

Milloin mallikerrointa γ_{MK} ei huomioida

- Ankkureiden mitoituksessa (ankkureille omat osavarmuusluvut kuten edellä todettiin).
- Tukiseinän nurjahdusmitoituksessa
- Vaakapalkin kiepahdustarkastelussa
- Konsolirakenteen mitoituksessa (jos ankkurin koeveto on mitoittavin kuormitustilanne).
- Yhden tuen poistumistarkastelussa

Mitoitusmenettely tyypillisesti



Tyypillinen esimerkki mitoituksesta ja parametrien käsittelystä

Tukiseinä mitoituksesta on saatu seuraavat rasitukset työnaikaiselle tukiseinän taivutusrasitukselle:

$$M_G = 125 \text{ kNm} \text{ ja } M_{G+Q} = 150 \text{ kNm (jolloin } \Delta M = 25 \text{ kNm)}$$

Eurokoodin 6.10a ja 6.10b yhtälöiden mukaisesti saadaan seuraavat mitoitusarvot:

- 6.10a = $1,35 \times 125 \text{ kNm} \rightarrow 169 \text{ kNm}$
- 6.10b = $1,15 \times 125 \text{ kNm} + 1,50 \times 25 \text{ kNm} \rightarrow \mathbf{181 \text{ kNm (mitoitava)}}$

Koska kyseessä työnaikainen tukiseinä, niin mitoitusarvoon kohdistetaan vielä mallikerroin $\gamma_{MK} = 1,15$ ja kuormakerroin $K_{FI} = 1,0$, jolloin taivutusmomentin mitoitusarvoksi saadaan:

$$\rightarrow 181 \text{ kNm} \times 1,15 \times 1,0 = \mathbf{208 \text{ kNm}}$$

Tukiseinälaskenta on suoritettu ensiksi pysyville kuormituksille ja sen jälkeen pysyvä+muuttuva yhdistelmälle. Kaivanto-ohjeen mukaisesti on mahdollista suorittaa laskenta myös siten, että muuttuva kuorma on kerrottu kuormien osavarmuuslukujen suhdeluvulla $1,50/1,15 \rightarrow 1,30$.

Tyypillinen esimerkki mitoituksesta ja parametrien käsittelystä

Tukiseinä mitoitukselta on saatu seuraavat rasitukset työnaikaiselle tukiseinän taivutusrasitukselle (NCCI 7 mukaisesti):

$$M_G = 125 \text{ kNm} \text{ ja } M_{G+Q} = 150 \text{ kNm (jolloin } \Delta M = 25 \text{ kNm)}$$

Eurokoodin 6.10a ja 6.10b yhtälöiden mukaisesti saadaan seuraavat mitoitusarvot:

- 6.10a = $1,35 \times 125 \text{ kNm} \rightarrow 169 \text{ kNm}$
- 6.10b = $1,25 \times 125 \text{ kNm} + 1,35 \times 25 \text{ kNm} \rightarrow 190 \text{ kNm (mitoitettava)}$

Koska kyseessä työnaikainen tukiseinä, niin mitoitusarvoon kohdistetaan vielä mallikerroin $\gamma_{MK} = 1,15$ ja kuormakerroin $K_{FI} = 1,0$, jolloin mitoitusarvoksi saadaan:

$$\rightarrow 190 \text{ kNm} \times 1,15 \times 1,0 = \mathbf{219 \text{ kNm}}$$

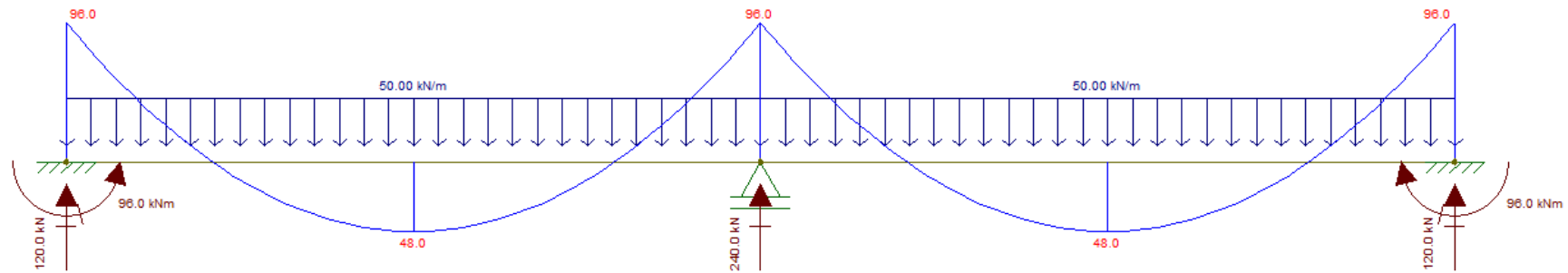
Oletettu muuttuva kuorma on tässä yhteydessä ajoneuvokuormitus, jolloin muuttuvan osan kerroin on 1,35. NCCI:n mukaisesti yhtälössä 6.10b kerroin pysyville kuormille on 1,25 eikä 1,15.

Yhden tuen pettäminen

- Tukiseinien rakenteellisessa mitoituksessa tulee varmistaa, että yhden ankkurin (ja vastaavien tukirakenteiden) pettäessä **ei synny ketjureaktiota**, jossa jokainen ankkuri/tukirakenne pettää vuorollaan kuormituksen siirtyessä viereiselle ankkurille/tukirakenteelle.
- Käytännössä yhden ankkurin pettämistilanteessa tarkastelusta johtuen se kasvattaa muille ankkureille/tukirakenteille tulevaa kuormitusta, esim. vaakapalkin tukiväli suurenee, jolloin vaakapalkkiin kohdistuvat tai itse tukiin kohdistuvat rasitukset kasvavat.
- Ankkureiden ja vastaavien tukirakenteiden **ominaiskuormilla** lasketun varmuuden myöntämistä vastaan tulee olla **vähintään 1,1** kuormitustilanteessa, jossa yksi ankkuri tai tukirakenne pettää. Jatkuvan sortuman tarkastelu tulee tehdä jokaisen rakenneosan kriittisessä kohdassa tai mitoitusapauksessa.
- Myöntäminen tarkoittaa tässä yhteydessä, että laskennassa on käytetty **kimmoisia** poikkileikkaussuureita. Kyseinen tarkastelu edellyttää yleensä erilliset/erillisten tukiseinälaskelmien suorittamista.

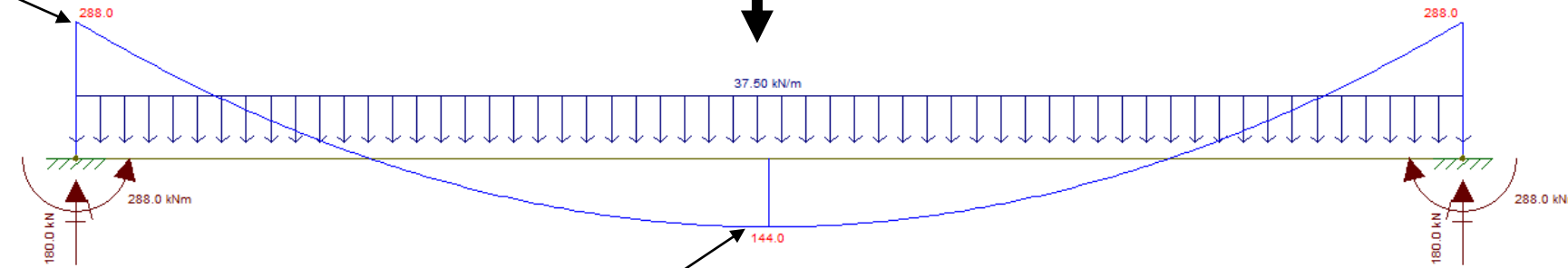
Yhden tuen pettäminen - vaikutukset

Esimerkki, kun yksi tuki poistuu (esim. ankkuri tai pönkäpalkki)



Murtorajatila-tarkastelu

Taivutusmomentti suurenee

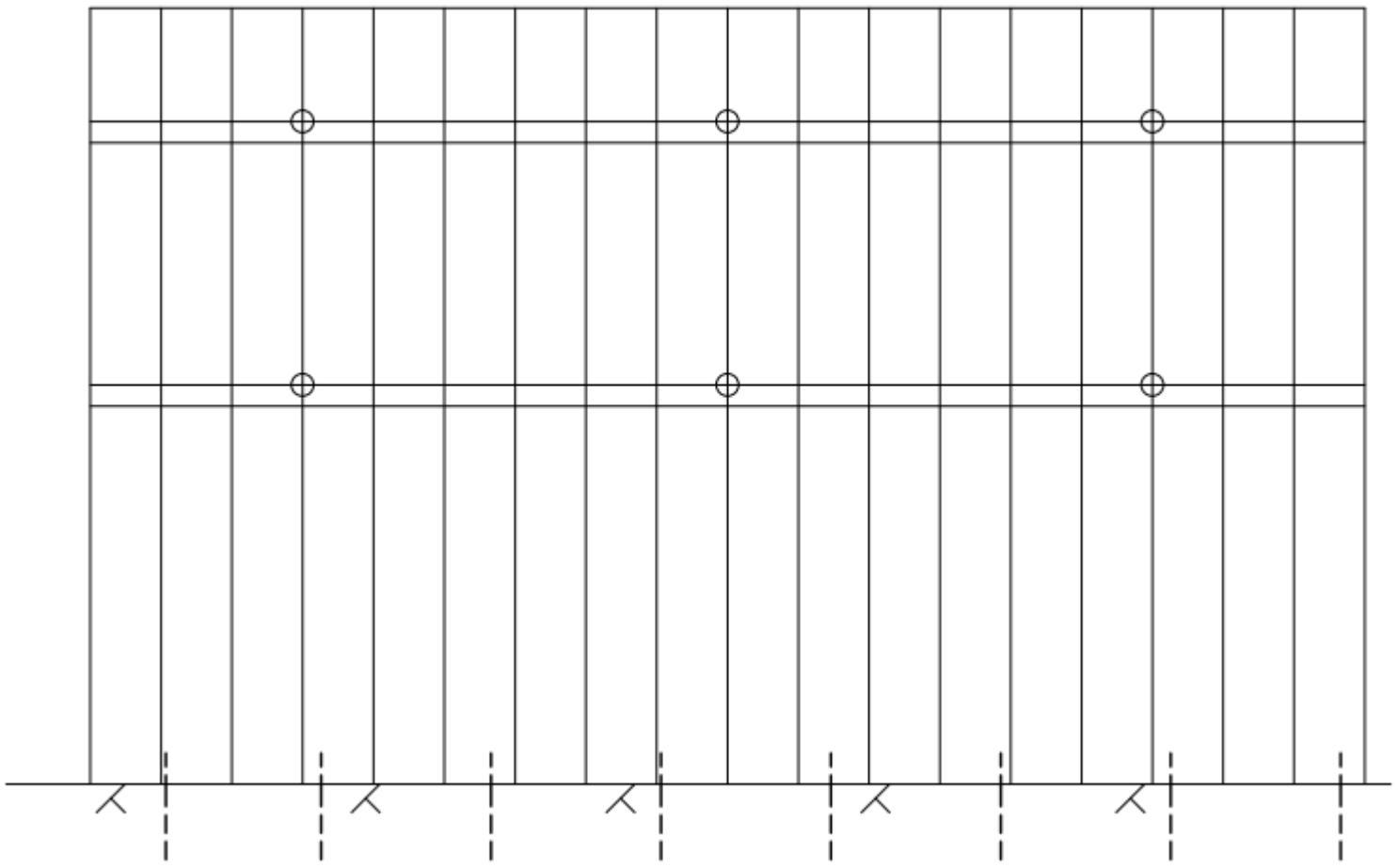


Ominaisarvoilla tehty laskelma, jossa varmuus myötöön tulee olla 1,1 kertainen

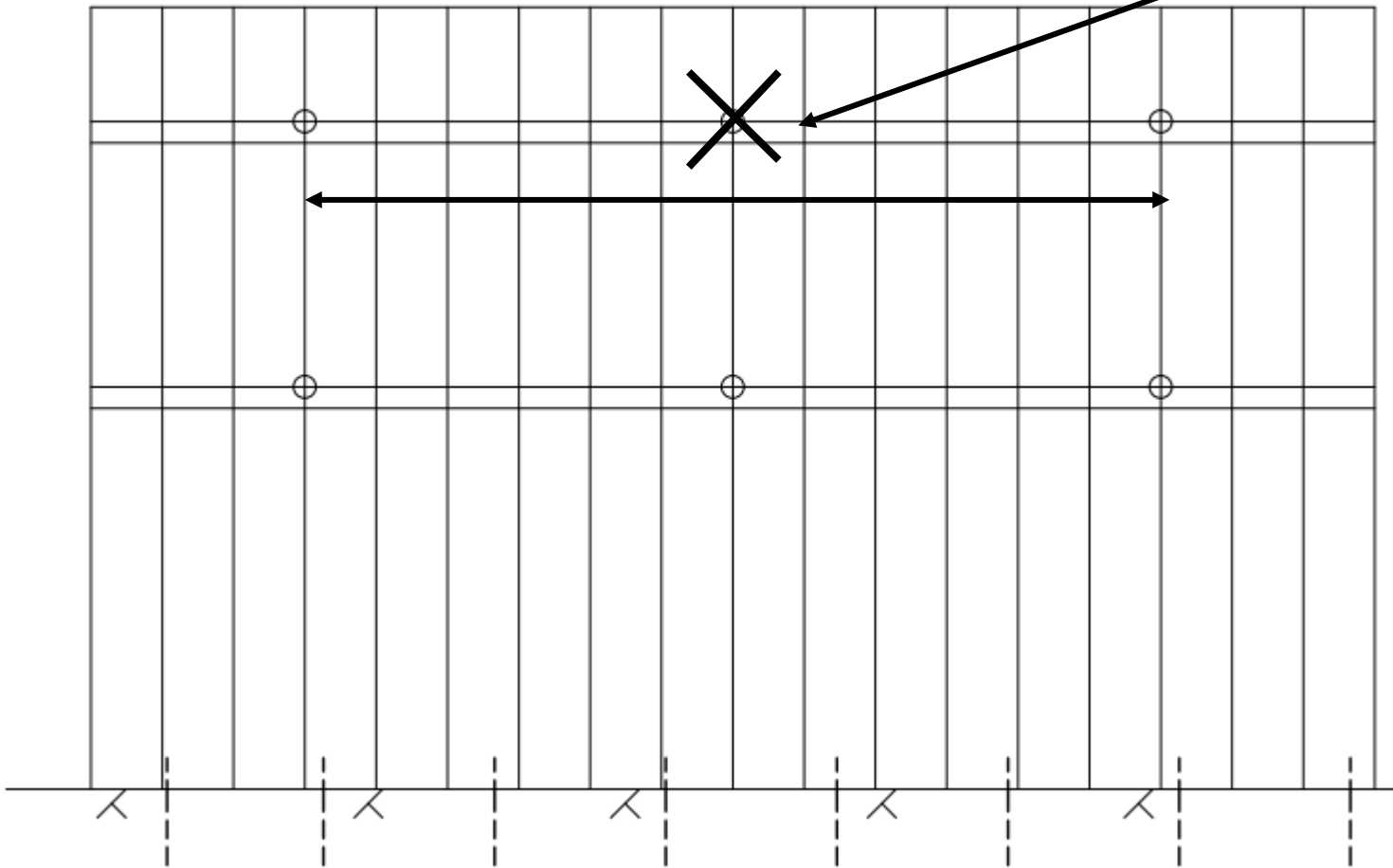
Kenttämometti suurenee

Tuki-/ankkurivoima suurenee

Yhden tuen pettäminen



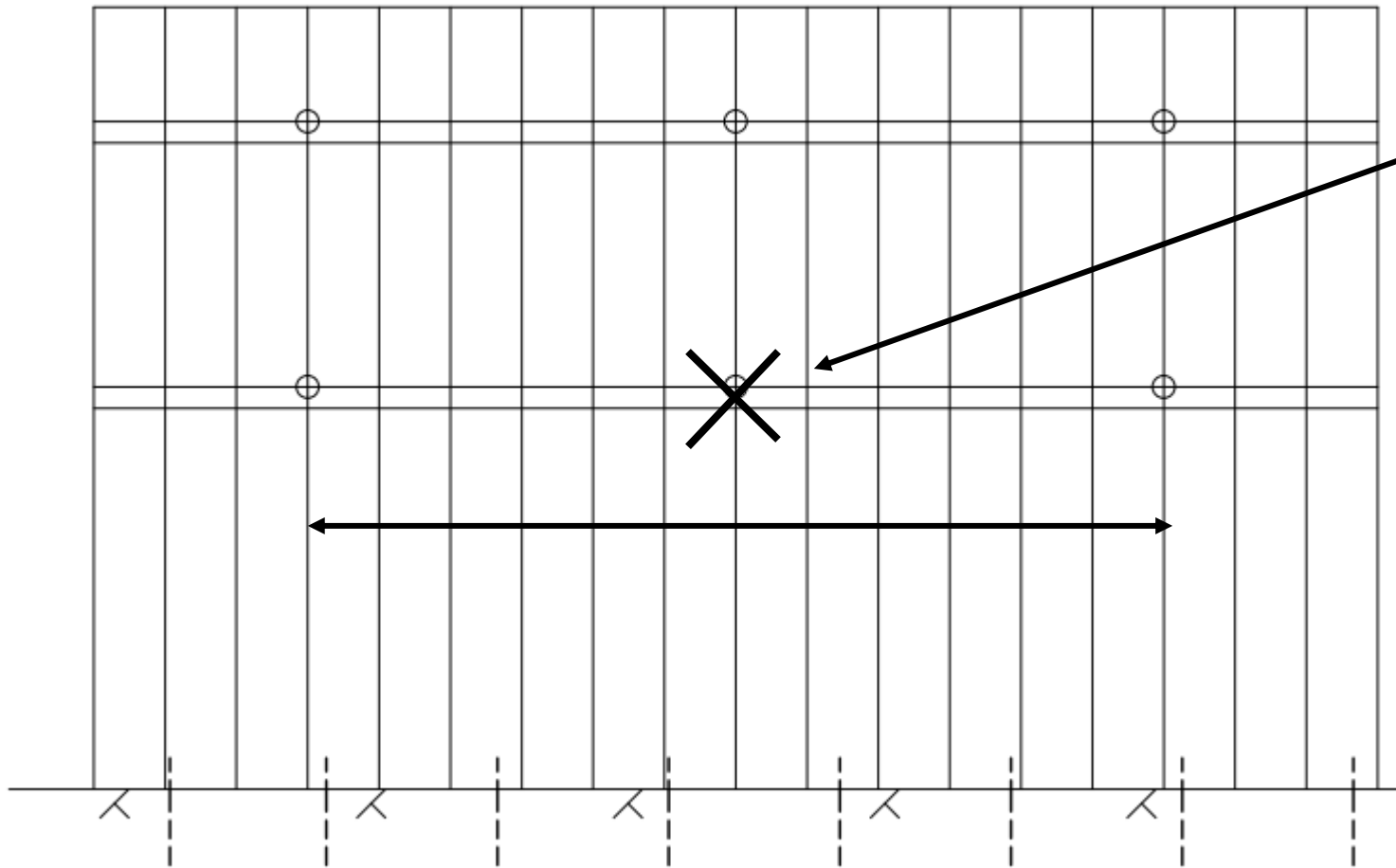
Yhden tuen pettäminen



Vaikutukset:

- Vaakapalkin tukiväli pitenee
- Pontin taivutusrasitus suurenee
- Ankkureiden voima lisääntyy

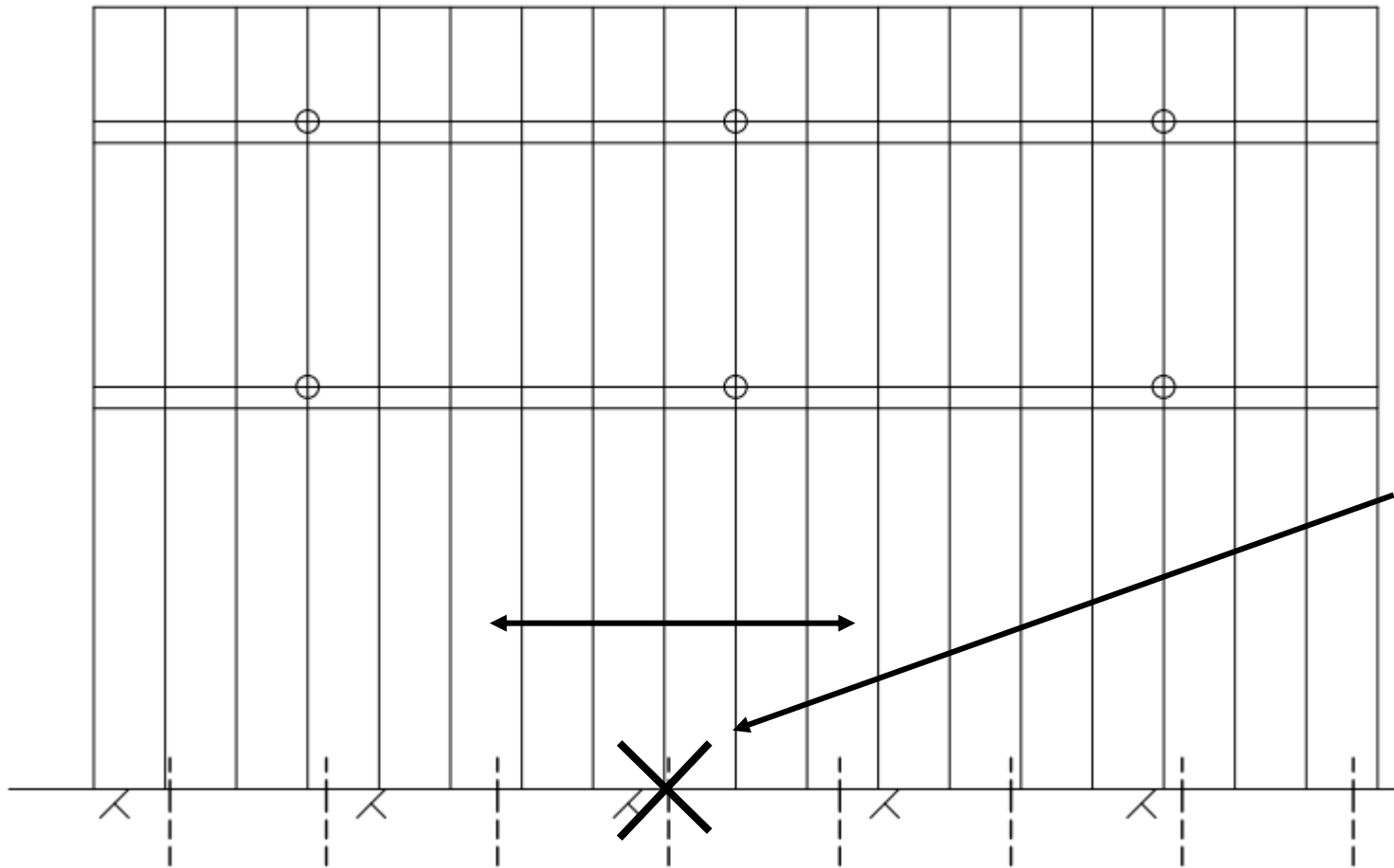
Yhden tuen pettäminen



Vaikutukset:

- Vaakapalkin tukiväli pitenee
- Pontin taivutusrasitus suurenee
- Ankkureiden voima lisääntyy

Yhden tuen pettäminen



Vaikutukset:

- Juuritappien kuormitus lisääntyy
- Pontin taivutusrasitus suurenee
- Ankkureiden voima lisääntyy

Pitkäaikaiskestävyydestä

- Teräsrakenteille korroosion vaikutus tulee ottaa huomioon, jos suunniteltu käyttöikä on $\geq 4,0$ vuotta. Aggressiivisissa pohjaolosuhteissa korroosion vaikutus tulee aina ottaa huomioon.
- Ankkureiden osalta noudatetaan standardin SFS-EN 1537 mukaisia korroosionsuojausmenetelmän periaatteita:
 - Pysyville ankkureille tehdään aina tuplakorroosiosuojaus, kun käyttöikä $\geq 2,0$ vuotta
 - Työnaikaisilla ankkureille riittää yleensä yksinkertainen suojaus (jollei toisin ole määritelty)

Pitkäaikaiskestävyydestä (SFS-EN 1993-5)

Ilmatilakorroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen arvoksi voidaan valita 0,01 mm vuodessa normaalissa ilmastossa ja 0,02 mm vuodessa paikoissa, joissa meriolosuhteet voivat vaikuttaa rakenteen toimivuuteen

Taulukko 7. Maahan asennettujen suojaamattomien paalujen ja teräsponnttien korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen suositeltavat arvot (mm), pohjaveden ylä- ja alapuolella /7/.

Suunnitelmassa edellytetty käyttöikä	5 v	25 v	50 v	75 v	100 v
Häiriintymättömät luonnonmaat (hiekkä, siltti, savi, liuske...)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Pilaantuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiiviset luonnonmaat (suo, räme, turve...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Tiivistämättömät ja ei-aggressiiviset kivennäismaatäytöt (savi, liuske, hiekkä, siltti...)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Tiivistämättömät ja aggressiiviset täytemaat (tuhka, kuona...)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Huomautukset:

¹⁾ Korroosionopeudet tiivistetyissä täytöissä ovat hitaampia kuin tiivistämättömissä.

Tiivistetyissä täytöissä taulukon luvut jaetaan kahdella.

²⁾ 5 ja 25 vuoden arvot perustuvat mittauksiin, kun taas muut arvot on ekstrapoloitu.

Taulukko 8. Makeaan veteen tai meriveteen asennettujen paalujen ja teräsponnttien korroosiosta aiheutuvan paksuuden ohenemisen suositeltavat arvot (mm) /7/.

Suunnitelmassa edellytetty käyttöikä	5 v	25 v	50 v	75 v	100 v
Tavallinen makea vesi (joki, laivakulkuinen kanava...) suuren rasituksen alueella (vesiraja)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Erittäin saastunut makea vesi (viemäri, teollisuusjätevesi...) suuren rasituksen alueella vesiraja...	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Merivesi lauhkeassa ilmastossa suuren rasituksen alueella (matala vesi ja roiskealueet)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Merivesi lauhkeassa ilmastossa pysyvästi veden alla olevalla alueella tai vuorovesialueella	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

Huomautukset:

¹⁾ Korroosionopeus on yleensä suurin roiskealueella tai vuorovesialueella laskuvien tasolla. Useimmissa tapauksissa suurimmat taivutusjännitykset kuitenkin esiintyvät pysyvästi veden alla olevalla alueella, ks. kuva 2.

²⁾ 5 ja 25 vuoden arvot perustuvat mittauksiin, kun taas muut arvot ovat ekstrapoloitu.

Esimerkki – PU12 ponttiprofiili

Tarkastelu tehty Arcelormittal Durability -ohjelmalla

Teräslaji S355GP → $W_{pl} = 1457 \text{ cm}^3$ ja $W_{el} = 1200 \text{ cm}^3$

Testataan seuraavilla oletuksilla:

Laskenta 1 = 50v normaaleilla olosuhteissa $\Delta t = -0,60 \text{ mm}$ (molemmin puolin)

Laskenta 2 = 50v merivedessä (pysyvästi veden alla) $\Delta t = -1,75 \text{ mm}$ (molemmin puolin)

1 → $W_{pl} = \dots \text{ cm}^3$ ja $W_{el} = 1050 \text{ cm}^3$ (88%) ja poikkileikkausluokka alenee luokkaan PL3

2 → $W_{pl} = \dots \text{ cm}^3$ ja $W_{el} = 765 \text{ cm}^3$ (64%) ja poikkileikkausluokka alenee luokkaan PL4

Huomataan, että tukiseinän poikkileikkausluokka muuttuu käyttöiän aikana, jolloin mitoitus monimutkaistuu ja lopputilanteessa ei voida enää hyödyntää teräspontin plastisia ominaisuuksia.

Näistä asioista enemmän teräsasioita käsittelevässä luento-osuudessa.

Muita mitoituksessa huomioitavia asioita

- **Tärinä tai tiivistys** → Kaivanto-ohjeen periaatteiden mukaisesti (vaikutukset aktiivi- ja passiivipaineisiin)
- **Lämpötilakuormitukset** → Jos lämpötilavaihteluista aiheutuu pakkovoimia, tulee niiden vaikutukset huomioida (yleensä ei aiheudu tai maa pystyy sallimaan liikkeen)
- **Väsyminen** → Mitoitus SFS-EN 1993-1-9 mukaisesti
- **Routa** → Pysyvä tukiseinärakenne tulee aina routasuojata, jos taustan puolella voi tapahtua routimista. Sisäpuolisesta tuettu työnaikainen tukiseinä tulee myöskin aina routasuojata. Työnaikaisissa tukiseinissä tulee myöskin huomioida routasuojaus tai tukiseinä työnaikainen lämmittäminen, jos riski roudan aiheuttamille kuormituksille on mahdollinen. Tarvittaessa tukiseinän pinta voidaan myös routaeristää.
- **Palosuojaus** → Tukiseinien palosuojauksen tarve ja mahdollinen palomitoitus tulee harkita hankekohtaisesti