

## Porapaaluilla tehdyn vesitiiviin kaivannon suunnittelu

Henri Rantala

Opinnäytetyö

Lokakuu 2020

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma.



# jamk.fi

Jyväskylän ammattikorkeakoulu  
JAMK University of Applied Sciences

Tekijä(t) Rantala, Henri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä 10/2020
	Sivumäärä 58	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Porapaaluilla tehdyn vesitiiviin kaivannon suunnittelu</b>		
Tutkinto-ohjelma Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka		
Työn ohjaaja(t) Hannu Haapamaa, Marko Viinikainen		
Toimeksiantaja(t) Dracon Oy, Mikko Sarasjärvi		
Tiivistelmä <p>Työssä tutkitaan vesitiiviin kaivannon tukirakenteena toimivan porapaalupatoseinän suunnittelun ja rakenteellisen mitoituksen vaiheita ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksessa käydään pääpiirteittäin läpi yksinkertaisen RD-porapaaluseinän rakenteellinen mitoitus, sekä niiden kanssa yleisesti käytettyjen vaakatuenta- ja ankkurointiratkaisujen rakenteelliset tarkastelut. Työssä tuodaan esille porapaalupatoseinän vesitiiveyteen vaikuttavia tekijöitä ja esitetään vaihtoehtoisia ratkaisuja vesitiiveyden parantamiseksi.</p> <p>Työ tarjoaa toimeksiantajalle kattavan tietopaketin porapaalupatoseinän suunnittelusta ja mitoituksesta. Asioiden esittämisessä pyrittiin selkeyteen ja järjestyksenmukaisuuteen, jotta sitä voisi hyödyntää myös alan opiskelijat.</p> <p>Työn tuloksena syntyi Excel-pohja vaakakuormitettujen RD-porapaalujen ja sen tukirakenteiden mitoittamisesta. Mitoituspohjaa hyödynnettiin laskentaesimerkissä, johon mitoitettiin porapaaluseinä ja ankkuripunokset. Työhön koottiin eri lähteistä tietoa porapaaluseinien vesitiiveyteen vaikuttavista tekijöistä, joita toimeksiantaja voi hyödyntää tulevilla projekteilla.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Porapaaluseinä, vesitiiveys, RD-paalu, tukiseinä, kaivanto		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Rantala, Henri	Type of publication Bachelor's thesis	Date 10/2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 58	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Designing a watertight excavation with bored pile wall</b>		
Degree programme Construction and civil engineering		
Supervisor(s) Hannu Haapamaa, Marko Viinikainen		
Assigned by Dracon Oy, Mikko Sarasjärvi		
Abstract  <p>This study shows main aspects of designing and dimensioning a watertight bored pile wall. Wall structure works as a cut off wall where water pressure causes additional horizontal loads to the wall and creates challenges for maintaining watertightness. Study shows what factors affect pile wall's watertightness and basic methods for improving it. Piles covered are mainly RD-piles, which are steel products made by SSAB, but main aspects of the study can be applied to other types of wall structures. Basic features of designing and dimensioning pile wall's horizontal support beams and bedrock anchors are also presented.</p> <p>Study offers collected information about watertight RD-pile walls and how they are used in supporting excavations. Study works as a tool to the employer in upcoming projects. Study can also be utilized by students.</p> <p>Products of this study are calculation layouts for dimensioning a simple pile wall and its anchoring structures. Calculation layouts are made with Excel.</p>		
Keywords/tags (subjects) Pile wall, Watertightness, RD-pile, Retaining wall, excavation		
Miscellaneous (Confidential information)		

## Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>4</b>
1.1	Toimeksiantaja.....	4
1.2	Työn tavoite ja rajaus.....	4
<b>2</b>	<b>Porapaalupatoseinä</b> .....	<b>5</b>
2.1	RD-porapaalut.....	7
2.2	Porapaaluseinän vesitiiveys .....	8
2.3	Suihkuijektointi ja suihkupaalut .....	11
2.4	Vaakatuenta ja ankkurointi .....	13
<b>3</b>	<b>Suunnittelun lähtökohdat</b> .....	<b>17</b>
3.1	Yleistä .....	17
3.2	Kaivannon kuivanapito.....	18
3.3	Pohjatutkimukset.....	18
3.4	Kallio.....	18
3.5	Kaivannon kuormitukset .....	19
3.6	Ympäristövaikutukset .....	20
3.7	Jatkuva sortuma.....	21
3.8	Palosuojaus.....	21
<b>4</b>	<b>Mitoituksen lähtökohdat</b> .....	<b>22</b>
4.1	Rajatilat .....	22
4.2	Mitoitustapa .....	22
4.3	Seuraamusluokka, luotettavuusluokka ja kuormakerroin .....	24
4.4	Mallikerroin .....	24
4.5	Kestävyyksien osavarmuusluvut.....	25
4.6	Kuormien määrittäminen.....	26
<b>5</b>	<b>Porapaaluseinän rakenteellinen mitoitus</b> .....	<b>28</b>
5.1	Yleistä teräsputkien mitoituksesta .....	28
5.2	Taivutuskestävyys .....	29
5.3	Leikkauskestävyys .....	30
5.4	Puristuskestävyys.....	31

	2
5.5 Nurjahduskestävyys .....	32
5.6 Yhdistetyt rasitukset .....	33
5.7 Lomahdustarkastelu .....	34
5.8 Ankkurirakenteet .....	34
<b>6 Laskentaesimerkki ja tulokset .....</b>	<b>43</b>
<b>7 Pohdinta .....</b>	<b>50</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>52</b>
Liite 1. RD-pienporapaalujen mitat ja poikkileikkaussuureet (SSAB suunnittelu- ja asennusohje). .....	52
<b>Lähteet .....</b>	<b>53</b>

## Kuviot

Kuvio 1. Esimerkki porapaalupatoseinärakenteesta (SSAB, RD-paaluseinien suunnittelu- ja asennusopas, 21).....	5
Kuvio 2. RD-porapaalun lukkoliitokset. (SSAB, suunnitteluohje).....	7
Kuvio 3. Porapaaluseinän lukkoliitoksen tiivistystapoja (RIL 263-2014, 52).....	9
Kuvio 4. RM/RF-lukkoprofiilin integroitu injektointikanava. (SSAB, RD-paaluseinien suunnittelu- ja asennusopas, 11).....	11
Kuvio 5. E21-lukkoprofiili. (SSAB, RD-paaluseinien suunnittelu- ja asennusopas, 11). .....	11
Kuvio 6. 1.Vaiheisen suihkuinjektoinnin toteutuksen periaatekuva. Tehosteena voidaan hyödyntää myös paineistettua vettä ja ilmaa (Liikennevirasto, 16/2018). .....	12
Kuvio 7. Porapaaluseinän tuentatapoja (SSAB, suunnittelu- ja asennusohje).....	14
Kuvio 8. Kallioankkurin rakenne (Tensicon Oy).....	16
Kuvio 9. Poikkileikkausluokan määrittäminen palkin laipalle (Ruukki hitsatut profiilit käsikirja 2010, 84). .....	35
Kuvio 10. Poikkileikkausluokan määrittäminen palkin uumalle (Ruukki hitsatut profiilit käsikirja 2010, 83). .....	36

## Taulukot

Taulukko 1. Kuormien tai kuormien vaikutusten osavarmuusluvut A1 (RIL 263-2014, 100).....	23
Taulukko 2. Maaparametrien osavarmuusluvut, M1 (RIL 263-2014, 101). .....	24
Taulukko 3. Ankkureiden osavarmuusluvut, R2 (RIL 263-2014, 101).....	24
Taulukko 4. Kestävyyksien osavarmuusluvut (Ruukki hitsatut profiilit käsikirja, 2010). .....	25
Taulukko 5. Rakenneterästen myötörajan $f_y$ ja vetomurtolujuuden $f_u$ nimellisarvot (SFS-EN 1993-1-1, 26). .....	25
Taulukko 6. Porapaalun poikkileikkausluokan määrittäminen luokissa 1-3 (SFS-EN 1993-1-1, 47). .....	29

# 1 Johdanto

## 1.1 Toimeksiantaja

Dracon Oy on perustettu vuonna 2009 ja se erikoistuu laaja-alaisesti korjausrakentamisen rakennesuunnitteluun sekä kallio- ja pohjarakentamiseen. Yritys toteuttaa myös rakennuttamis- ja valvontatöitä. Yrityksen toimipiste sijaitsee Helsingissä ja siellä työskentelee täysipäiväisesti 5 rakennesuunnittelijaa. Suunnittelukohteet sijaitsevat pääasiallisesti Suomessa. Opinnäytetyön ohjaajana työpaikalla toimii Mikko Sarasjärvi.

## 1.2 Työn tavoite ja rajaus

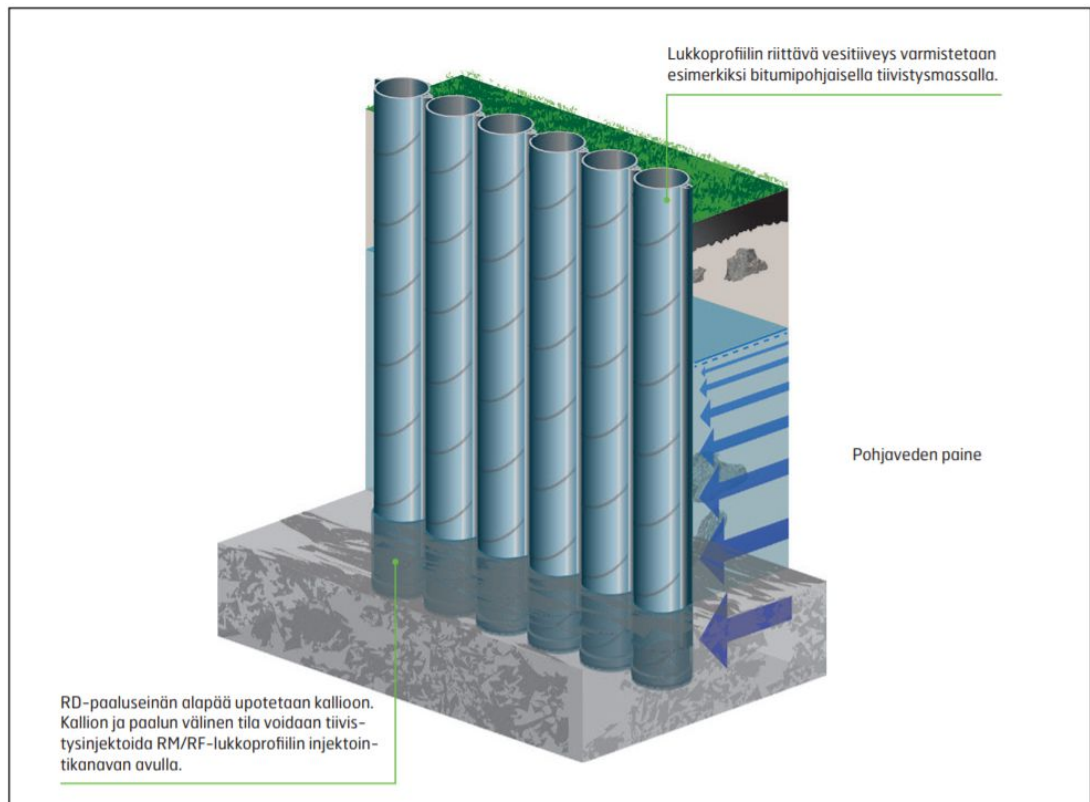
Työssä tutkitaan vesitiiviin porapaalurakenteisen tukiseinän suunnitteluvaiheita ja esitetään RD-porapaaluseinän rakenteellisen mitoituksen perusteet. Suunnittelua ja mitoitusta tukemaan on luotu työn lopussa esitettävä laskentaesimerkki. Suunnitteluohjeessa pyritään esittämään asiat johdonmukaisessa järjestyksessä ja antamaan syitä erilaisten ratkaisujen taustalla.

Työssä käsiteltävä rakenteellinen mitoitus suoritetaan murtorajatilassa, poikkileikkausluokkiin 1-3 kuuluville teräsrakenteille, mikä selkeyttää mitoitusta. Työssä käsitellään pääasiallisesti SSAB:n valmistamia kallioon porattavia RD-porapaaluja, mutta työssä käydyt vaiheet ovat sovellettavin osin yleispäteviä muihinkin teräspalkkutuotteisiin. Porapaalujen vaakatuennasta käsitellään ulkopuolisia vedettyjä kallioankkuureita ja HEB-vaakapalkkia, sillä ne ovat lähes vakioituneita tukirakennerratkaisuja porapaalujen yhteydessä.

Työn lopussa esitetään laskentaesimerkki kaivannon tukirakenteena toimivasta vaakakuormitetusta porapaalupatoseinästä.

## 2 Porapaalupatoseinä

Porapaalupatoseinällä tarkoitetaan ohutseinäisistä teräsputkista lukkoliitoksin toisiinsa kiinnitettyä, vesitiivistä seinärakennetta. Patoseinärakennetta hyödynnetään yleisesti tilanteissa, joissa pohjavedenpintaa ei haluta alentaa työnaikaisesti. Patoseinä estää maaraideiden huokosissa olevan veden kulkeutumisen lävitseen, jolloin rakenteeseen kohdistuu maanpaineen lisäksi huokosvedenpaine. Syvässä kaivannoissa pohjavedenpinnan ollessa korkealla, se muodostaa huomattavaa vaakakuormitusta padottavaan tukiseinään. Jos porapaaluseinää kuormittaa vapaa vesi, muodostuu tukiseinälle myös dynaamisia kuormia virtauksesta ja mahdollisesta aaltovai-  
kutuksesta.



Kuvio 1. Esimerkki porapaalupatoseinärakenteesta (SSAB, RD-paaluseinien suunnittelu- ja asennusopas, 21).

Porapaalujen asentaminen perustuu pääasiallisesti poraamiseen, jossa hyödynnetään paaluputken alapäähän asennettavaa avarrinkruunua. Porapaalujen jäykkyys- ja kestävyysominaisuuksia voidaan parantaa suurentamalla putkiprofiilin halkaisijaa, teräslaadun muutoksilla, putken seinämän paksuuden kasvattamisella ja putken sisäosan betonoimisella ja raudoittamisella. Porapaalujen suuren taivutusjäykkyyden ansiosta tukitasojen lukumäärän ja sijainnin määrittämiseen saadaan enemmän vapauksia. (RIL 263-2014, 51.)

Porapaaluseinä soveltuu kiviseen, lohkareiseen ja hienorakeisiin pohjaolosuhteisiin, mutta se ei sovellu kohteisiin, joissa esiintyy romumetallia. Porapaalujen asentaminen maaperään aiheuttaa teräspoikkileikkaukseen jännityksiä, joten suunnittelussa on tärkeää huomioida putken seinämäpaksuuden suhde putken kokonaishalkaisijaan, ettei jännitykset pääse aiheuttamaan putkeen haitallisia muodonmuutoksia. Putken halkaisijan ollessa alle 500mm, suositellaan seinämän paksuudeksi vähintään 10mm ja 600-700mm halkaisijalla suositellaan 12,5mm seinämävahvuutta. (RIL 263-2014, 52.)

Porapaaluseinän toteutus on yleensä kustannuksiltaan kalliimpaa kuin muiden tavanomaisten tukirakenteiden toteuttaminen. Porapaaluseinää käytetään tästä syystä pääasiallisesti haastavissa pohjaolosuhteissa, joihin muut tukiratkaisut eivät sovellu yhtä hyvin. Tämänkaltaisia tilanteita voi muodostua esimerkiksi, kun rakenteelta vaaditaan suurta taivutuskestävyyttä, jäykkyyttä, tukiseinä tulee osaksi pysyvää pystykuormitettua rakennetta tai ympäristön häiriintyminen halutaan minimoida. Porapaaluseinää hyödynnetään usein myös lopullisen rakennuksen pysyvänä, pystykuormia kantavana rakenteena. Suuren taivutusjäykkyyden ansiosta seinärakenteen taipuma ja ympäröivän maapohjan häiriintyminen ovat yleensä varsin vähäisiä. (RIL 263—2014, 51-53.)

Porapaaluseinää käytetään myös tyypillisesti kohteissa, joissa kallionpinnan korkeusvaihtelut ovat suuria, sekä ympäristön häiriintyminen halutaan minimoida esimerkiksi läheisten rakennusten tai liikenteen takia. Toisinaan myös työn toteuttajien saatavuus ja aikataululliset tekijät vaikuttavat seinärakenteen valinnassa.

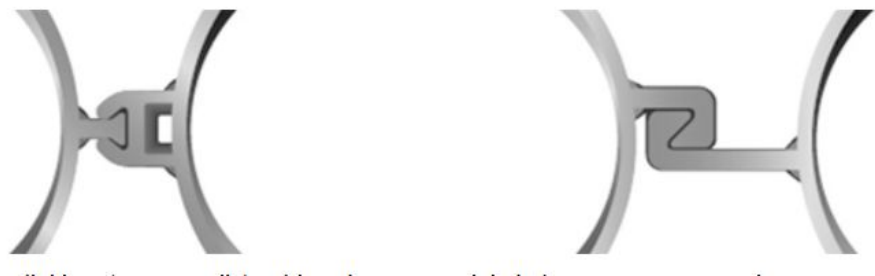
## 2.1 RD-porapaalut

RD-porapaalut ovat SSAB:n valmistamia pohjarakentamiseen suunniteltuja teräsputkituotteita. Valmistaja tarjoaa myös RDs-paaluja, joilla tarkoitetaan porattavia erityislujia pienpaaluja. Tyypillisiä paalukokoja on saatavilla välillä RD220-RD1200, missä luku esittää paalun halkaisijan millimetreinä.

RD-porapaaluja on saatavilla teräslajeilla S355J2H, S440J2H, S460MH ja S550J2H. RD90-RD320 porapaalujen vakioteräslaji on S460MH ja RDs-porapaaluilla S550J2H. (SSAB suunnittelu- ja asennusohje, 9.)

Pienikokoiset RD-porapaalut voidaan asentaa tarkasti pienellä kalustolla, mikä mahdollistaa niiden käytön ahtaissaakin paikoissa. Kohteissa tulee tapauskohtaisesti määrittää käytetyn kaluston ja ympäristövaatimusten perusteella riittävät etäisyydet muihin olemassa oleviin rakenteisiin. (SSAB suunnittelu- ja asennusohje, 26.)

RD-porapaaluihin on saatavilla kahdenlaisia lukkoprofiileja: RM/RF-lukkoprofiili (kuvio 2 vasen) ja vanhempi E21-profiili (kuvio 2 oikea). E21-profiilia käytetään yleisesti epäjatkuvuuskohdissa esimerkiksi porapaalu-teräsponttiliitoksessa. RM/RF-lukkoprofiili soveltuu RD200-1200 paaluille ja E21-lukkoprofiili paaluille RD400-RD600. (SSAB, suunnittelu- ja asennusohje.)



Kuvio 2. RD-porapaalun lukkoliitokset. (SSAB, suunnitteluohje).

## 2.2 Porapaaluseinän vesitiiveys

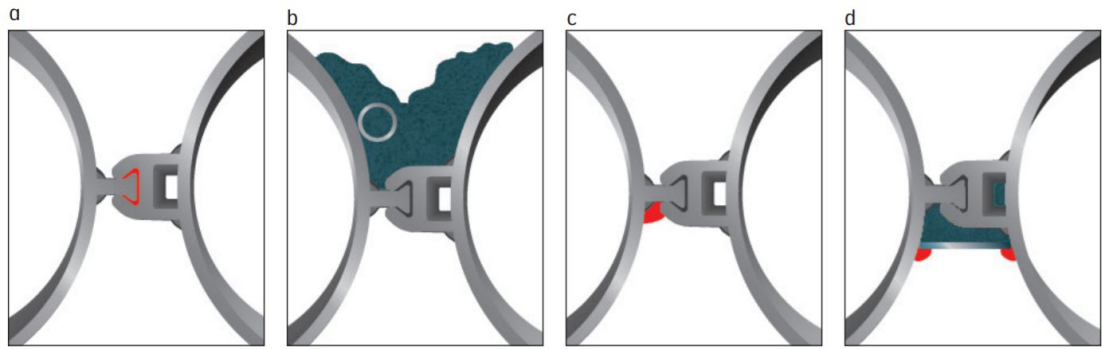
### **Yleistä**

Porapaalupatoseinärakenteen vesitiiveyden kannalta kriittisimpiä kohtia ovat lukkoliitos sekä rakennetta lävistävien ankkurireikien kohdat, mutta myös upotettaessa alapää kallioon voidaan joutua lisätoimenpiteisiin vedenpitävyyden varmistamiseksi. Rakennuskohteen pohjaolosuhteilla on merkittävä vaikutus vesitiiveyden saavuttamisessa.

### **Lukkoliitos**

Paalun lukkoliitoksen vedenläpäisevyys riippuu hyvin pitkälti ympäröivän maaperän vedenläpäisevyydestä sekä vedenpaine-erosta kaivannon sisä- ja ulkopuolen välillä. Yleensä huonosti vettä läpäisevissä hienorakeisissa maaperissä, kuten savikoilla, veden mukana kulkeutuvat hienot maarakeet tukkivat lukkosauaman. Tilanne vaatii toteutuakseen myös kohtuullisen vedenpaine-eron tukiseinän eri puolten välillä, jotta lukon tukkeutuminen saavutetaan. Karkearakeisissa maaperissä ja avoveden läsnä ollessa lukkoliitoksen tukkeutumista ei pääse juurikaan tapahtumaan, jolloin vuotovesimäärät voivat muodostua huomattavankin suuriksi. (RIL 263-2014.)

RIL 263-2014 mukaan, porapaaluseinän lukkoura voidaan tiivistää kuvan 2 mukaisilla tavoilla. Lukkoura voidaan tiivistää tiivistysmassalla ennen asennusta (a), suihkuinjektoimalla umpeen (b), hitsaamalla lukkoura umpeen (c) tai lukkouran väliin voidaan hitsata erillinen lattateräs tiivisteksi (d).



Kuvio 3. Porapaaluseinän lukkoliitoksen tiivistystapoja (RIL 263-2014, 52).

E. Tirkkosen (2018) diplomityössä tutkittiin porapaalupatoseinän vesitiiveyteen vaikuttavia tekijöitä. Työssä tehdyssä haastattelussa lukkoliitoksen sisäpuolinen tiivistäminen bitumilla todettiin puutteelliseksi ratkaisuksi, sillä bituminauhat irtosivat usein pois lukkosauomoista jo kuljetuksen aikana. Myös auringon ja asennuksen aikaisesta kitkasta muodostuvan lämpörasituksen uskottiin irrottavan bituminauhoja. Varmimpana ratkaisuna koettiin lukkouran suihkuinjektointia erillisen injektointiputken kautta (b).

### Ankkurireiät

Ankkurireikien vesitiiveydestä on entuudestaan olemassa erittäin niukasti aineistoa. E. Tirkkosen (2018) diplomityön mukaan, ankkurireiästä voi toisinaan tulla merkittäviäkin määriä vettä ja toisinaan jopa hienorakeista maa-ainesta läpi.

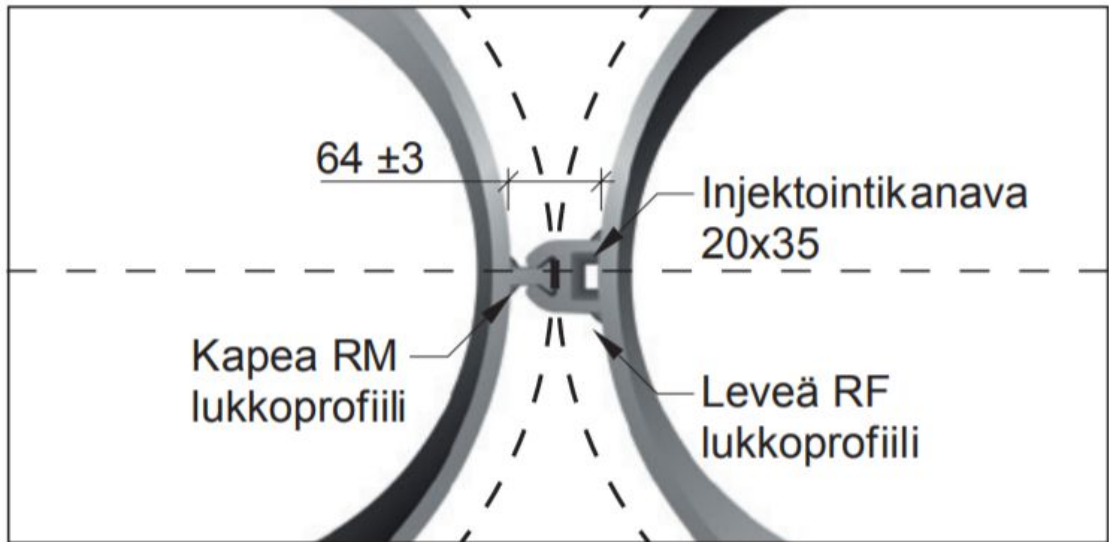
Ankkurireikien kohdat yleensä betonoidaan tai suihkupaalutetaan lävistettävien porapaalujen taustalta. Suihkupaalutuksen onnistumiseen vaikuttaa merkittävästi paalua ympäröivä maa-aines (ks. kohta 2.4.). Hienojakoinen ja vähän plastinen maa-aines edesauttaa ankkurireikien tukkeutumisessa, kun taas lohkarainen maaperä sisältää suuria huokostiloja ja suurien lohkaraiden tiivistyminen suihkuinjektointissa on epävarmaa. (Liikennevirasto,16.) E. Tirkkosen haastattelussa ilmeni, että yhtenä tiivistysratkaisuna käytettiin injektointimansettia, jonka kautta porapaalun vedenpainellinen tausta tiivistetään esimerkiksi polyuretaanilla.

## Paalun alapään kalliokontakti

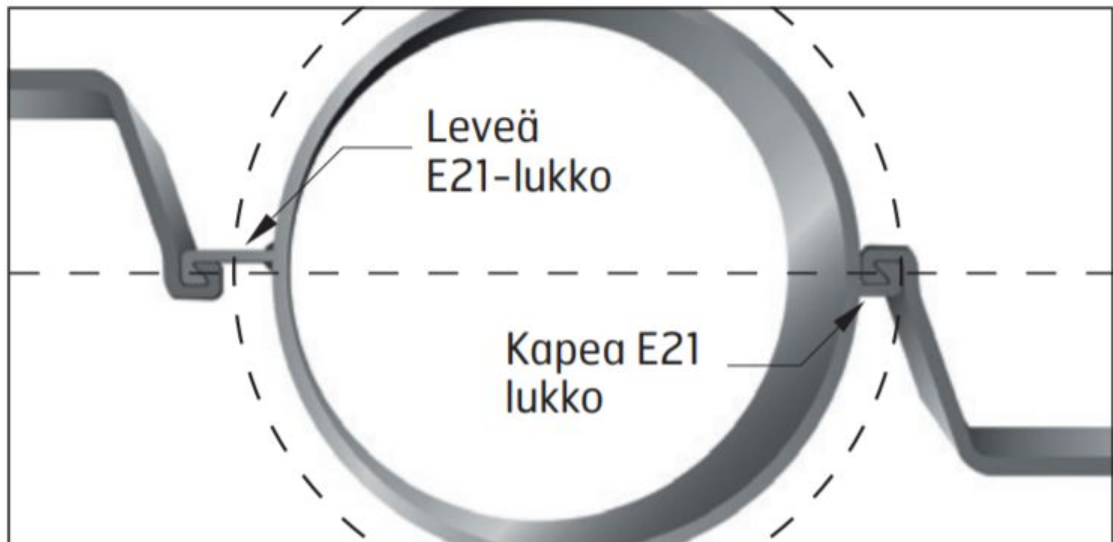
Porapaaluseinän alapään liitoskohta on usein riittävän vesitiivis, kun se upotetaan ehjään kallioon. Porapaaluseinän alapuoleinen kallio voidaan verhoinjektoida vesitiiviiksi paaluputken sisälle asennettavalla injektointiputkella. Paaluvaipan ulkopuolinen kallioreikätila voidaan injektoida umpeen vesitiiveyden varmistamiseksi. (RIL 263-2014, 53.)

RD-porapaaluille on käytössä kahdenlaisia lukkoprofiileja: RM/RF-profiili (kuvio 4) sekä E21-profiili (kuvio 5). Näistä jälkimmäiseen täytyy asentaa erillinen injektointiputki paaluvaipan kallioreiän injektoimiseksi. E21-profiilia käytetään porapaaluseinän epäjatkuvuuskohdissa esimerkiksi, kun porapaalu liitetään teräsponttilevyyn. (SSAB suunnittelu- ja asennusohje.)

E. Tirkkosen (2018) diplomityön haastatteluissa useat olivat skeptisiä RM/RF-lukkoprofiilin injektointikanavan toimintaan erityisesti porapaalun jatkoskohdassa, missä injektointikanavaa ei voida hitsata. Kokonaisuudessaan RM/RF-lukkoprofiili koettiin positiivisena kehityksenä vanhaan E21-lukkoprofiiliin, sillä sen koettiin aukeavan porattaessa.



Kuvio 4. RM/RF-lukkoprofiilin integroitu injektointikanava. (SSAB, RD-paaluseinien suunnittelu- ja asennusopas, 11).

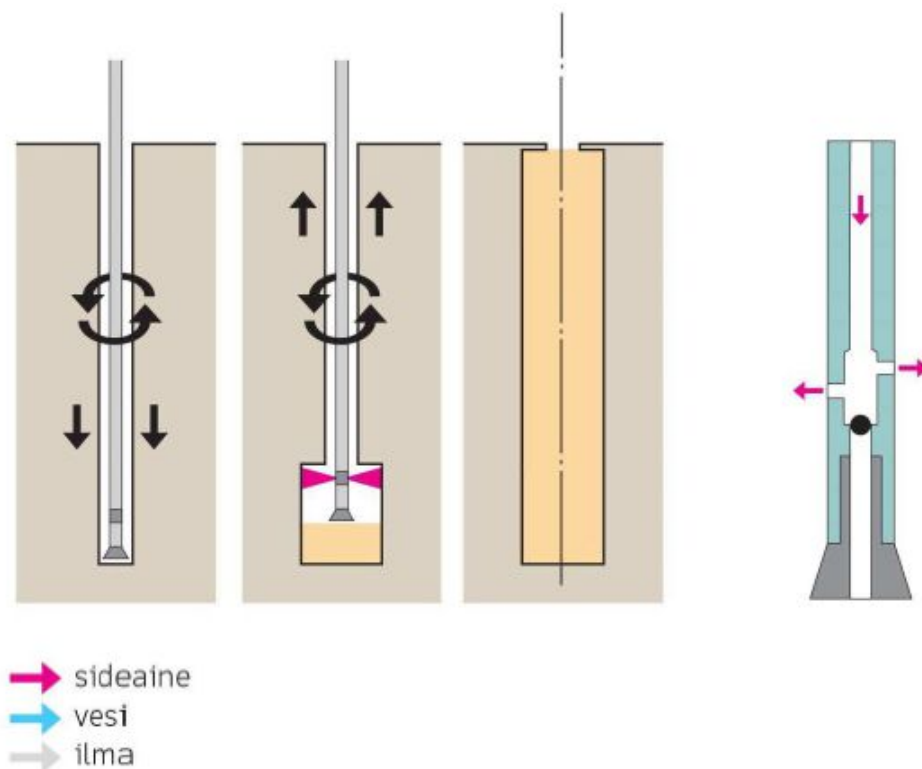


Kuvio 5. E21-lukkoprofiili. (SSAB, RD-paaluseinien suunnittelu- ja asennusopas, 11).

### 2.3 Suihkuinjektointi ja suihkupaalut

Vesitiiviiden kaivantojen suunnittelussa päädytään usein käyttämään erilaisia rakenneratkaisuja yhdessä. Suihkupaalutus ja injektointi ovat erittäin yleistyneitä tapoja porapaaluseinien vesitiiveyden varmistamisessa ja parantamisessa.

Suihkuinjektointia käytetään yleisesti kaivantojen tukirakenteissa sekundäärisenä tukirakenteena, lujitteena ja vesitiiveyden parantamisessa. Yleisesti porapaalujen yhteydessä suihkuinjektointia hyödynnetään paalun lukkourien ja ankkurireikien kohdilla sekä kalliokontaktin vesitiiveyden parantamisessa. Injektointikalustoa on saatavilla eri kokoluokissa, joten suihkutustyö saadaan onnistumaan myös suhteellisen ahtaissa tiloissa. Suihkuinjektointi voidaan toteuttaa sekä pysty- että vaakainjektointina. (Liikennevirasto 16/2018.)



Kuvio 6. 1.Vaiheisen suihkuinjektoinnin toteutuksen periaatekuva. Tehosteena voidaan hyödyntää myös paineistettua vettä ja ilmaa (Liikennevirasto, 16/2018).

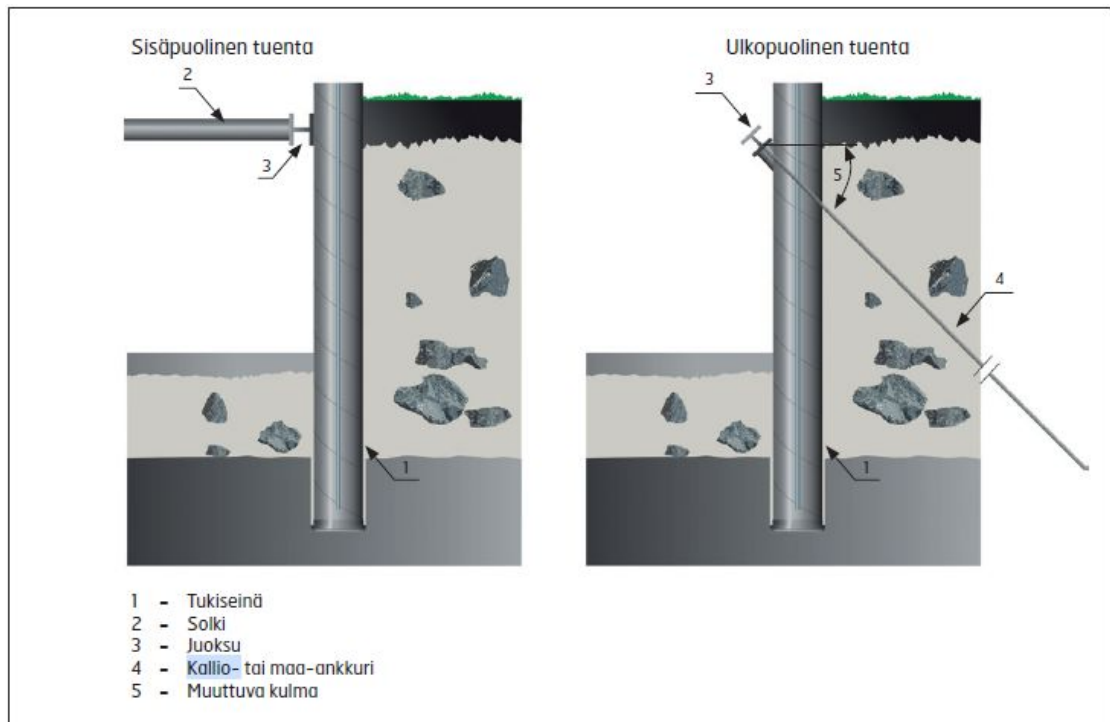
Ennen suihkuinjektointia maapohjan laatu tulee määrittää huolellisesti (RIL 263-2014, 54). Suihkutus muodostuu yleensä portland-sementistä tai sitä vastaavasta massasta sekä erilaisista seosaineista. (Liikennevirasto, 16/2018). Erittäin sulfaattipitoisessa maaperässä tulee kuitenkin käyttää SR-sementtiä. (RIL 263-2014, 54). Vednipitävyyttä voidaan parantaa lisäämällä seokseen bentoniittiä. Suihkuinjektoinnin sivutuotteena syntyy voimakkaasti emäksistä lietettä, jonka muodostuminen, leviäminen, hävittäminen ja reaktiovaikutus maaperän mahdollisten epäpuhtauksien

kanssa tulee selvittää, sekä sitä tulee seurata työn suorituksen aikana. (Liikennevirasto 16/2018.) RIL 263-2014 mukaan, suihkuinjektoidun rakenteen läpi vuotava vesi ei saa kulkeutua salaojaverkostoon, sillä kalkkipitoinen vesi tukkii salaojaputket.

Suihkuinjektointi soveltuu parhaiten maaperiin, joiden rakenne saadaan helposti rikottua ja maarakeet syrjäytettyä sideainesuihkutuksen tieltä. Löyhät, keskisuuren raekoon ja alhaisen plastisuuden omaavat maaperät ovat suihkutuksen onnistumisen kannalta edullisimpia. Hiekka, sora ja silttimaat soveltuvat erinomaisesti suihkutukseen, mutta myös plastisissa koheesiomaissa voidaan saavuttaa riittäviä vaikutuksia. Suuret kivet ja lohkareet voivat estää suihkutuksen leviämistä riittävän laajalle alueelle, muodostaen epätiivetyys- ja vesivuotoalueita. (Liikennevirasto 16/2018.)

## 2.4 Vaakatuenta ja ankkurointi

Porapaaluseinien vaakatuennassa käytetään yleisesti HEB-teräspalkkeja, mutta toisinaan käytössä on myös putkipalkit, teräspontit sekä erilaiset betonirakenteet. Teräspalkki suunnitellaan yleensä jatkuvana rakenteena. Edullisinta on sijoittaa momenttijatkos  $\frac{1}{4}$  päähän ankkurivälistä ankkuritukeen, jolloin säästytään lisävahvistuksilta tai työmaahitsaamiselta. (RIL 263-2014, 62,110). Tässä pisteessä sijaitsee suurin leikkausrasitus, joten samanaikaisesti taivutusmomentti on statiikan sääntöjen mukaisesti pienimmillään.



Kuvio 7. Porapaaluseinän tuentatapoja (SSAB, suunnittelu- ja asennusohje).

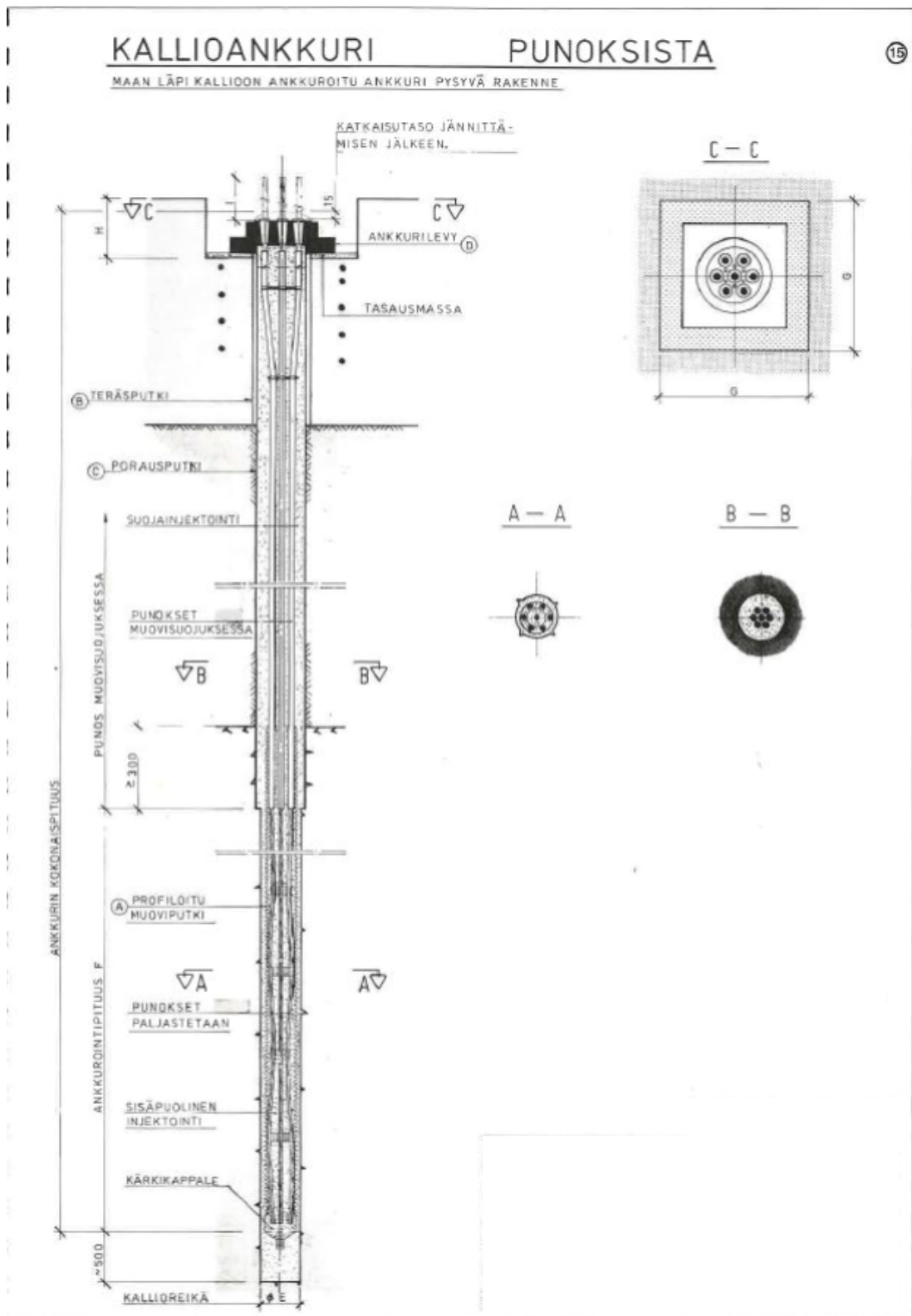
### Kallioankkurit

Porapaaluseinä voidaan ankkuroida maa- ja kallioankkureilla. Ankkuripunos katso-  
taan pysyväksi, kun sen suunniteltu käyttöikä ylittää 2 vuotta; muussa tapauksessa  
punos suunnitellaan tilapäisenä rakenteena. Mitoituksessa varmuuskertoimilla  $\gamma_{a,t}$   
sekä  $\gamma_{a,p}$  otetaan kantaa ankkurin suunniteltuun käyttöikään (taulukko 3). Eurokoodit  
vaativat vetoankkureille suoritettavan tutkimus-, soveltuvuus- ja hyväksyntäkokeen.  
Tavanomaisilla, laajaa aikaisempaa käyttökokemusta omaavilla ja hyväksyntävaati-  
mukset täyttävillä ankkurityypeiltä ei vaadita kaikkien edellä lueteltujen tutkimusko-  
keiden suorittamista. Suomessa yleisesti käytössä oleville kallioankkureille riittää  
yleensä vain hyväksyntäkokeiden teko. Hyväksyntäkokeella kallioankkurille varmiste-  
taan, että ankkuria voidaan kuormittaa sille määritetyllä koevetovoimalla ja todenne-  
taan, että suunniteltu jättövoima voidaan toteuttaa. (RIL 263-2014, 102.)

Tyypillisesti porapaaluseinän ankkuroinnissa pyritään hyödyntämään kallioon porat-  
tavia ja injektaitavia kallioankkureita (kuvio 8). Kallioankkureiden asennuskulmaa

saatetaan joutua säätämään, jos maaperässä on esteitä, mutta tyypillisesti se on 45 astetta. Kulmaa suurentamalla ankkuripunoksiin muodostuva vetorasitus samalla kasvaa, mikä täytyy huomioida mitoituksessa.

Ankkurivalmistajilta saa yleensä tarkkaa tietoa heidän valmistamien ankkurien kestävyyksistä ja sallituista rasituksista. Jäljempänä esitetään laskentamalli ankkurien koevetovoimalle. Ankkurivalmistajat esittävät yleisesti laskenta-arvoja tuotteilleen, jolloin mitoituksessa tulee käyttää näistä arvoista pienempää. (RIL 263-2014.)



Kuvio 8. Kallioankkurin rakenne (Tensicon Oy)

## **Muut tuentatavat**

Porapaaluseinän vaakatuennassa voidaan hyödyntää myös kaivannon sisäpuolisia puristussauvoja (kuvio 7), kun kaivanto on riittävän kapea eivätkä puristussauvat ole esteenä työn toteutuksessa tarvittavalle kalustolle.

Jos porapaaluseinän alapää jätetään kalliopinnan tasolle, tulee alapuolisessa tuennassa hyödyntää juuritappeja sekä juuripalkkia. Juuritappi ja juuripalkki ovat tyypillisesti teräsponttiseinän toteutuksessa käytettyjä alapuolisen tuennan ratkaisuja, mutta ne soveltuvat myös kallion pintaan jätetyille porapaaluseinille. Lisätietoa teräsponttiseinän, juuritapin ja juuripalkin mitoituksista löytyy teoksesta RIL 271-2019.

## **Liittorakenteet**

Kun porapaalun halutaan toimivan yhdessä esimerkiksi paalun sisään valetun betonin ja betoniterästen kanssa, tulee se tarkastella liittorakenteena. Liittorakenteiden mitoituksen kulkua esitetään yksityiskohtaisesti SFS-EN 1994-1-1 standardissa sekä yksinkertaistettu menetelmä esitetään teoksessa RIL 271-2019.

# **3 Suunnittelun lähtökohdat**

## **3.1 Yleistä**

RIL 263-2014 mukaan, porapaaluseinien suunnittelussa tulee ottaa kantaa rakenteen kestävyys- ja ankkuroinnin lisäksi myös moniin työtekniisiin asioihin:

- Porapaaluseinien liitokset seinärakenteen muuttuessa, esimerkiksi paaluseinän liittyminen ponttiseinään,
- kallistumien oikaiseminen,
- Paaluputken teoreettisen tyhjätilan täyttö ja tiivistys,
- lukkoliitosten tiivistämismenetelmät.

Kaivannolta vaadittaessa vesitiiveyttä sijoitetaan se vaativuusluokkaan vaativa tai erittäin vaativa (RIL 263-2014, 66).

### 3.2 Kaivannon kuivanapito

Sadevedet ja muut vuotovedet tulee poistaa kaivannosta pumpaamalla. Kallistukset kaivannon pohjalla ohjaavat veden pumppauskuoppiin tai kaivoihin, josta ne ohjataan pois kaivannosta. (RIL 263-2014, 69.)

### 3.3 Pohjatutkimukset

Jos rakennuskohteessa on entuudestaan saatavilla riittävästi luotettavaa tietoa rakennuspohjan olosuhteista ja kohde kuuluu helppoon GL1 tai vaativaan GL2 pohjarakennusluokkaan, voidaan pohjatutkimusten teko jättää suorittamatta. Kaikissa tapauksissa on kuitenkin oltava maaperästä vähintään 4 tutkimuspistettä tulevan rakennusalueen kohdalta. (RIL 254-1-2011.)

### 3.4 Kallio

Jotta porapaalun kalliokontaktia voidaan pitää momenttijäykkänä, tulee se injektoida. Kalliokontakti voidaan olettaa momenttijäykäksi, kun upotussyvyys ehjään kallioon on vähintään 4 kertaa paalun ulkohalkaisijan verran ja se injektoidaan kallioon vähintään C20/25 betonilla. Tässä tilanteessa porapaaluseinän geotekninen kestävyys voidaan olettaa suuremmaksi kuin porapaalun kestävyys. Yleisestikin suositellaan paalu porattavaksi noin 3 kertaa halkaisijansa verran kallioon, kuitenkin vähintään 500mm syvyyteen. (SSAB suunnittelu- ja asennusohje.)

## 3.5 Kaivannon kuormitukset

### **Yleistä**

Tukiseinään voi vaikuttaa maaperässä useita erilaisia kuormituksia, joiden esiintyminen ja vaikutus tulee tapauskohtaisesti huomioida kaivannon suunnittelussa. Yleisimpiä kuormia ovat maanpaine, vedenpaine, pintakuormat kaivannon sisä- ja ulkopuolella sekä mahdolliset dynaamiset kuormitukset (RIL 263-2014, 79). Työkoneiden omapainot ja ympäröivä liikenne voivat tapauskohtaisesti muodostaa merkittävää pintakuormaa kaivantoon.

Maanpaineita ovat lepopaine sekä aktiivi- ja passiivipaine. Aktiivi- ja passiivipaine vaativat muodostuakseen rakenteessa riittävää muodonmuutosta. Tässä työssä käsitellään ainoastaan jäykkänä rakenteena toimivaa porapaaluseinää, jolle ei sallita suuria muodonmuutoksia, joten tarkastelu tehdään ainoastaan lepopaineelle.

### **Lepopaine**

Kun rakenteen oletetaan pysyvän liikkumattomana suhteessa ympäröivään maaperään vaakakuormituksessa, puhutaan lepopaineesta (Liikennevirasto 13/2017,73). Rakenteen siirtymä tukiseinän kokonaispituuden  $h$  funktiona on tällöin alle  $5 \times 10^{-4} \times h$  (SFS-EN 1997-1, 2014). Pysyvät ja taipuisat tukirakenteet mitoitetaan myös lepopaineelle niiden sijaitessa koheesiomaassa (Liikennevirasto, 13/2017). Vaakatuetut, syvälle kallioon upotetut porapaalut ovat tukirakenteena hyvin jäykkiä, ts. erittäin vähän myötääviä rakenteita, joten niiden jännitystila muistuttaa yleisesti lepopainetta. Lepopaine on aina suurempi kuin aktiivipaine. Lepopaine lasketaan kaavan (1) mukaan.

### **Aktiivi- ja passiivipaine**

Aktiivi- ja passiivipaine esiintyvät yleisesti yhdessä. Aktiivi- ja passiivipaineen muodostuminen vaatii toteutuakseen tukiseinän riittävää siirtymiskykyä. Tukiseinän siir-

tymä aiheuttaa kuormituksen puolella aktiivipaineen ja kaivutason alapuolella tukirakenteen alapäähän vastareaktiona passiivipaineen. Tyypillisesti taipuisat ja siirtyvät tukirakenteet kitkamailla mitoitetaan aktiivi- ja passiivipaineelle. (RIL 263-2014, 79.)

### **Vedenpaine (huokosvedenpaine)**

Syvien vesitiiviiden kaivantojen kuormituksista merkittävä osa muodostuu maarakeiden huokosissa esiintyvän veden hydrostaattisesta paineesta. Kuormittava vedenpaine voidaan yleisesti määrittää suoraan vedenpinnan korkeudesta lopulliseen kaivutasoon nähden (SFS-EN 1997-1, 2014). Kuormitusyhdistelmissä huokosvedenpaine huomioidaan omapainona.

Karkearakeisilla maalajeilla voidaan huokosvedenpaine olettaa suoraan veden hydrostaattisen painetason mukaan kaavalla (2). Kaava toimii myös normaalikonsolidoituneille koheesiomaille, joihin ei kohdistu veden virtauspainetta tai muita dynaamisia kuormituksia (Liikennevirasto,13/2017.)

### **3.6 Ympäristövaikutukset**

Porauksen yhteydessä paaluputken poikkileikkausta suuremman avarinkruunun seurauksesta paalun ulkopintaan muodostuu teoreettista tyhjättilaa. Pohjaolosuhteet määrittävät, missä määrin tyhjättila täyttyy porasoijalla sekä ympäröivällä maa-aineksella. Mitä vähemmän tyhjättilaan pakkautuu porasoijaa, sitä enemmän maaperässä esiintyy muodonmuutoksia porauksen yhteydessä. Tiiviissä kitkamaissa tyhjättila täyttyy enimmäkseen porasoijalla, mutta löyhissä kitka- ja koheesiomaissa tyhjättilaan kulkeutuu enemmän myös ympäröivällä maalla. Porauksen aiheuttamia maapohjan muodonmuutoksia voidaan kohteessa todentaa luotettavasti paalujen koeasennuksella ja tarkkailemalla koeasennuksen aiheuttamia painumia sekä siirymiä. (RIL 263-2014, 53.)

RD-porapaalujen aiheuttama värinä, huokosvedenpaineen nousu sekä maaperän siirtyminen ja tiivistyminen ovat vähäisiä käytettäessä RD400 ja läpimitaltaan pienempiä paaluputkia (SSAB, RR ja RD-porapaalujen suunnittelu- ja asennusohjeet, 28).

## Korroosio

Korroosio tulee huomioida kaivannon tukirakenteessa sen jäädessä pysyväksi rakenteeksi. Korroosio huomioidaan tyypillisesti porapaalun ylimitoituksella, jolla varmistetaan, että rakenne kestää sille muodostuvat kuormitukset suunnitellun käyttöiän loppuun asti korroosion vaikutuksesta huolimatta (Liikennevirasto 13/2017). SSAB:n suunnittelu- ja asennusohjeessa on taulukoituna porapaalujen kestävyysominaisuuksia korroosiovaroilla 1,2mm ja 2,0mm.

### 3.7 Jatkuva sortuma

Jatkuva sortuma tarkoittaa tilannetta, jossa yksittäisen rakenneosan pettäessä/vaurioituessa läheisyydessä olevien rakenneosien rasitukset kasvavat huomattavasti, sillä vaurioituneen osan kuormat siirtyvät niiden vastaanotettavaksi. Kun kapasiteetti ylittyy, seurauksena syntyy äkillinen laaja vaurio tai jopa rakenteen kokonaisvaltainen romahtaminen.

Ankkurien mitoituksessa varmuuden tulee olla vähintään 1,1 yhden ankkurin pettäessä ominaiskuormilla laskettaessa (RIL 263-2014, 119).

### 3.8 Palosuojaus

RD-porapaalut voidaan tarpeen vaatiessa esimerkiksi verhoilla erillisellä rakenteella. (SSAB suunnitteluohje). Palonsuojausta voidaan parantaa merkittävästi myös betoimalla porapaalu tai palosuojamaalauksella. Palosuojaukseen pätee samat vaatimukset kuin yleisesti muillekin rakenneteräksille.

## 4 Mitoituksen lähtökohdat

### 4.1 Rajatilat

Eurokoodien mitoitus pohjautuu rajatilojen käyttöön, käyttö- ja murtorajatila.

Käyttörajatilassa ominaiskuormat huomioidaan sellaisenaan ilman mitoituksellisia varmuuskertoimia. Käyttörajatilassa tarkistetaan yleensä, ettei rakenteeseen pääse muodostumaan liiallisia taipumia, halkeamia tai muita muodonmuutoksia.

Murtorajatilassa ominaiskuormiin asetetaan osavarmuuskertoimia. Murtorajatilassa todistetaan, ettei rakenteen laskennallinen kapasiteetti ylitä millään kuormitusyhdistelmällä.

### 4.2 Mitoitustapa

RIL 263-2014 mukaan, tuettujen kaivantojen mitoitus suoritetaan Eurokoodien mukaisesti mitoitustavalla 2. Mitoitustavassa 2 tukiseinien kuormitusyhdistelmänä käytetään yhdistelmää  $A1 + M1 + R2$ .

missä

$A1$  = kuorman tai kuormien vaikutuksen osavarmuusluvut (Taulukko 1)

$M1$  = Osavarmuusluku maaparametreille (Taulukko 2)

$R2$  = Osavarmuusluvut tukirakenteiden kestävyyksille, esimerkiksi kallioankkureille. (Taulukko 3).

## Mitoitusmenetelmä

Tukiseinien osavarmuuslukujen huomioimisessa on Suomessa kaksi tapaa, DA2 ja DA2\*. Menetelmässä DA2 kuormien osavarmuusluvut huomioidaan laskelmien alussa niiden lähtöarvoihin, kun taas menetelmässä DA2\* osavarmuusluvut otetaan huomioon laskelmien lopussa saatuihin tukivoimiin ja kaikki oletetaan epäedullisiksi. (RIL 263-2014, 100.)

Taulukko 1. Kuormien tai kuormien vaikutusten osavarmuusluvut A1 (RIL 263-2014, 100).

<b>Pysyvä kuorma</b> ( $\gamma_G$ )	Epäedullinen	
	(Yhtälö EN 1990 6.10 a)	1,35 $K_{FI}$
	(Yhtälö EN 1990 6.10 b)	1,15 $K_{FI}$
Edullinen		0,9 $K_{FI}$
<b>Muuttuva kuorma</b> ( $\gamma_Q$ )		
Epäedullinen		1,5 $K_{FI}$
Edullinen		0

Kuormien yhdistelmänä käytetään EN 1990 mukaisesti kaavoja 6.10a ja 6.10b. Murtorajatilalaskennassa käytetään suurempaan tulokseen johtavaa kaavaa.

$$1,15 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad 6.10a$$

$$1,35 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} \quad 6.10b$$

missä

$G_{kj,sup}$  Rakenteelle kohdistuva epäedullinen kuorma (kaatava).

$G_{kj,inf}$  Rakenteelle kohdistuva edullinen kuorma (vakauttava).

$K_{FI}$  Kuormakerroin, kohta 4.3

Taulukko 2. Maaparametrien osavarmuusluvut, M1 (RIL 263-2014, 101).

Leikkauskestävyysskulma	$\gamma_{\phi} = 1,0$
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'} = 1,0$
Suljettu leikkauslujuus	$\gamma_{cu} = 1,0$
Yksiaksiaalinen puristuskoe	$\gamma_{qu} = 1,0$
Tilavuuspaino	$\gamma_{\gamma} = 1,0$

Taulukko 3. Ankkureiden osavarmuusluvut, R2 (RIL 263-2014, 101).

Tilapäinen ankkuri	$\gamma_{a,t} = 1,25$
Pysyvä ankkuri	$\gamma_{a,p} = 1,5$

### 4.3 Seuraamusluokka, luotettavuusluokka ja kuormakerroin

Kuormakerroin  $K_{FI}$  määräytyy luotettavuusluokan perusteella. RIL 263-2014 mukaan kuormakertoimella otetaan kantaa kohteen poikkeuksellisuuteen ja haastavuuteen ja ne määräytyvät seuraavalla tavalla:

- RC3 poikkeuksellisen haastavat olosuhteet, suuret vahingot  $K_{FI} = 1,1$
- RC2 keskiuuret vahingot  $K_{FI} = 1,0$
- RC1 ei ole käytössä kaivantosuunnittelussa.

### 4.4 Mallikerroin

Eurokoodien mukaisessa varmuustarkastelussa tulee ottaa huomioon mallikerroin, joka kohdistetaan tukirakenteiden rakenteellisessa mitoituksessa rakenteen rasitukseen. (RIL 263-2014, 19.) Mallikerroin huomioidaan porapaaluseinän taivutus- ja leikkausmitoituksessa, mutta sitä ei käytetä nurjahduksen tai leikkauslommahduksen tarkastelussa. Kallioankkureiden mitoituksessa mallikerrointa ei käytetä.

Mallikerroin  $\gamma_{MK}$  lisätään ainoastaan tukiseinän murtorajatilan rasitukseen. 1,15 työnaikaiset (alle 2 vuotta) tukiseinät. Pysyvillä rakenteilla (yli 2 vuotta) mallikerroin on 1,35. (RIL 263-2014, 113.)

#### 4.5 Kestävyyksien osavarmuusluvut

Osavarmuusluvuilla vähennetään rakenteiden kestävyysominaisuuksissa esiintyviä epävarmuustekijöitä ja mahdollisia valmistuksessa esiintyviä mittavirheitä (Taulukko 4).

Taulukko 4. Kestävyyksien osavarmuusluvut (Ruukki hitsatut profiilit käsikirja, 2010).

Standardi	Tarkastelutilanne	Osavarmuusluku	Osavarmuusluvun arvo	
			Eurocoden suositusarvo	Suomi
EN 1993-1-1:	Teräsrakenteiden yleiset säännöt:			
	Poikkileikkauksen kestävyys poikkileikkauksluokasta riippumatta, mukaan lukien paikallinen lommahdus ja vinoutumisen urjahdus	$\gamma_{M0}$	1,0	1,0
	Sauvan kestävyys stabiiliuden suhteen, kun laskelmat tehdään sauvan tarkastuksena	$\gamma_{M1}$	1,0	1,0
	Nettopoikkileikkauksen kestävyys vetomurtumisen suhteen (reikien osuus vähennetty bruttopoikkileikkauksesta)	$\gamma_{M2}$	1,25	1,25
	Liitosten kestävyys	ks. EN 1993-1-8		

Taulukko 5. Rakenneterästen myötörajan  $f_y$  ja vetomurtolujuuden  $f_u$  nimellisarvot (SFS-EN 1993-1-1, 26).

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>EN 10025-2</b>				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
<b>EN 10025-3</b>				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
<b>EN 10025-4</b>				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
<b>EN 10025-5</b>				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
<b>EN 10025-6</b>				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

## 4.6 Kuormien määrittäminen

### Lepopaine

Bond & Harris (2008) määrittelevät eurokoodin mukaisen lepopaineen **kokonaisjännityksen** kaavan (1) mukaisesti.

$$\sigma_h = K_0 \cdot \left( \int_0^z \gamma dz + q - u \right) + u \quad (1)$$

missä

$\sigma_h$  = tukirakenteeseen vaikuttava vaakasuuntainen kokonaisjännitys [N/mm<sup>2</sup>]

$K_0$  = Lepopainekerroin

$z$  = tarkastelupinnan syvyys maanpinnasta, rakenteen kuormitetun osan korkeus [m]

$\gamma$  = Maaperän tilavuuspaino [kN/m<sup>3</sup>]

$q$  = pintakuorma [kN/m<sup>2</sup>]

$u$  = huokosvedenpaine [kN/m<sup>2</sup>]

Laskentakaavassa on huomioitava, että  $\gamma$  tarkoittaa tässä yhteydessä täysin vedellä kyllästynyttä arvoa  $\gamma_{SAT}$ .

SFS-EN 1997-1 (2014) mukaan, lepopainekerroin ( $K_0$ ) määritetään normaalikonsolidoituneille maaperille kaavan (2) ja (3) mukaan.

$$K_0 = (1 - \sin\varphi')\sqrt{OCR} \quad \text{kun maaperä vaakatasossa} \quad (2)$$

$$K_{0;\beta} = K_0 \cdot (1 + \sin\beta) \quad \text{kun maaperä viistossa ylöspäin} \quad (3)$$

missä

$\varphi'$  = maaperän tehokas leikkauskestävyyskulma [°]

$\beta$  = tukiseinän takana viistossa olevan maaperän kaltevuuskulma, positiivinen ylöspäin [°]

OCR = ylikonsolidoitumissuhde.

Tehokasta leikkauskestävyyskulmaa käytetään pohjavedenpinnan alapuolella. Savi- mailla tehokas leikkauskestävyyskulma menee muotoon  $\varphi = \varphi' = 0$ , jolloin lepopainekerroin  $K_0 = 1,0$  (RIL 95, 76). Kitkamailla tehokas leikkauskestävyyskulma saadaan yksinkertaistettuna kaavalla  $\varphi' = \varphi - 2^\circ$ .

Maaperän ajatellaan olevan normaalikonsolidoitunutta, kun sen arvo on 0,5 – 1,0 välillä (RIL95 Pohjarakennus 1974, 60). Tällöin termi  $\sqrt{OCR}$  poistuu yhtälöstä ja kaava pelkistyy muotoon  $K_0 = (1 - \sin\varphi')$ .

### Huokosvedenpaine

$$u = \gamma_w \cdot z \tag{4}$$

missä

$u$  = huokosvedenpaine [kN/m<sup>2</sup>]

$\gamma_w$  = veden tilavuuspaino, vakio 10 kN/m<sup>3</sup>

$z$  = vedenpainetason korkeusero tarkastelutasoon [m]

## 5 Porapaaluseinän rakenteellinen mitoitus

### 5.1 Yleistä teräsputkien mitoituksesta

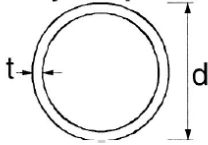
#### Poikkileikkausluokitus

Teräsrakenteiden kestävyysmitoitus aloitetaan poikkileikkausluokan määrittämisellä. Poikkileikkausluokka määräytyy porapaaluilla niiden kokonaishalkaisijan ja ainevahvuuden suhteesta, sekä teräksen lujuusluokasta. Poikkileikkausluokat kuvaavat, missä määrin rakenteen paikallinen lommahdus rajoittaa sen kiertymiskykyä ja kestävyyttä (SFS-EN 1993-1-1, 42). Poikkileikkaukset jaetaan neljään luokkaan ja standardissa SFS-EN 1993-1-1 ne esitetään seuraavalla tavalla:

- **Poikkileikkausluokassa 1** rakenne voidaan mitoittaa plastisuusteorian mukaisesti. Paikallinen lommahdus ei rajoita rakenteen kiertymiskykyä tai kestävyyttä. Rakenne mitoitetaan plastisuusteorian mukaisesti.
- **Poikkileikkausluokassa 2** rakenteelle voi kehittyä plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys, mutta paikallinen lommahdus rajoittaa rakenteen kiertymiskykyä. Kestävyyslaskelmissa voidaan hyödyntää plastisuusteoriaa, mutta kokonaistarkastelu suoritetaan kimmoteorian mukaisesti.
- **Poikkileikkausluokassa 3** rakenteen suurimmassa puristetussa reunassa voi saavuttaa myötörajan, mutta paikallinen lommahdus estää plastisuusteorian mukaisen taivutuskestävyyden saavuttamisen. Rakenne mitoitetaan kimmoteorian mukaisesti.
- **Poikkileikkausluokassa 4** paikallinen lommahdus saavutetaan rakenteen jollain alueella ennen myötörajaa. Rakenteen teholliset leveydet tulee määrittää ja kestävyyttä pienennetään EN-1993-1-5 kohdan 5.2.2. mukaisesti.

Poikkileikkausluokat järjestäytyvät täten suotuisuuden mukaisesti välille 1-4, josta luokka 1 on edullisin ja luokka 4 epäedullisin. Poikkileikkausluokkia voi olla useita rakenteen eri osilla, mutta yleisesti epäedullisin poikkileikkausluokka määrittää mitoitusmenettelyn koko rakenteelle. (SFS-EN 1993-1-1, 43.)

Taulukko 6. Porapaalun poikkileikkausluokan määrittäminen luokissa 1-3 (SFS-EN 1993-1-1, 47).

Pyöreä putki						
						
Poikkileikkausluokka	Taivutettu ja/tai puristettu poikkileikkaus					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
	<b>Huom.</b> Kun $d/t > 90\epsilon^2$ , ks. EN 1993-1-6.					
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\epsilon^2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

## 5.2 Taivutuskestävyys

RIL 271-2019 mukaan, porapaaluseinän taivutuskestävyyden tulee toteuttaa mitoitusehto (5). Mitoitusehdossa taivutusrasitusta  $M_{Ed}$  tulee korottaa mallikertoimella  $\gamma_{MK}$  (ks. kohta 4.4).

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \quad (5)$$

missä

$$M_{Ed} = \text{Mitoittava taivutusrasitus [kNm/m, kNm/jm]}$$

$$M_{c,Rd} = \text{Rakenteen taivutuskestävyys [kNm/m, kNm/jm]}$$

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo  $M_{c,Rd}$  saadaan määritettyä eri poikkileikkausluokissa kaavoilla (6) ja (7).

$$\text{Poikkileikkausluokat 1 ja 2} \quad M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (6)$$

missä

$W_{pl}$  = Rakenteen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus [mm<sup>3</sup>]

$f_y$  = Teräksen myötölujuus [N/mm<sup>2</sup>]

$\gamma_{M0}$  = materiaaliosavarmuuskerroin (taulukko 4)

Poikkileikkausluokka 3  $M_{c,Rd} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}$  (7)

missä

$W_{el}$  = Rakenteen kimmoteorian mukainen taivutusvastus [mm<sup>3</sup>]

### 5.3 Leikkauskestävyys

RIL 271-2019 mukaan porapaalun leikkauskestävyys tarkistetaan kaavojen 8-12 avulla, kun rakenteessa ei esiinny vääntörasitusta. Leikkauskestävyyden tulee toteuttaa kaavan (8) mukainen mitoitusehto. Mitoitusehdossa leikkausrasitusta  $V_{Ed}$  tulee korottaa mallikertoimella  $\gamma_{MK}$  (ks. kohta 4.4).

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} \quad (8)$$

missä

$V_{Ed}$  = Mitoittava leikkausrasitus [kN/m, kN/jm]

$V_{pl,Rd}$  = Rakenteen leikkauskestävyys [kN/m, kN/jm]

Poikkileikkauksen plastinen leikkauskestävyys määritetään kaavalla (9).

$$V_{pl,Rd} = \frac{2 \cdot A_{RD}}{\pi} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \quad (9)$$

missä

$A_{RD}$  = Porapaaun leikkausrasitetun poikkileikkauksen pinta-ala [mm<sup>2</sup>]

Ruukki EN-1993 käsikirjan (2012) mukaan putken leikkausrasitettu poikkipinta-ala määritetään kaavan (10) mukaan.

$$A_{RD} = 2 \cdot A / \pi \quad (10)$$

Porapaaun leikkauskestävyyden käyttöasteen ylittäessä 50%, tulee rakenteen taivutuskapasiteettiä pienentää poikkileikkausluokissa 1-3 kaavan (11) mukaisesti.

$$M_{k,Rd} = M_{c,Rd} \cdot (1 - \rho) \quad (11)$$

missä

$M_{k,Rd}$  = taivutuskestävyys [kNm/m, kNm/jm]

$\rho$  = Taivutusmomenttikapasiteetin pienennystekijä

$$\rho = \left( \frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (12)$$

#### 5.4 Puristuskestävyys

RIL 271-2019 mukaan puristuskestävyys tarkistetaan kaavojen 13-14 avulla. Porapaa-luseinän puristuskestävyyden tulee toteuttaa kaavan (13) mukainen mitoitusehto.

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \quad (13)$$

missä

$N_{Ed}$  = Mitoittava tasainen puristusrasitus [kN]

$N_{c,Rd}$  = Rakenteen puristuskestävyys [kN]

Puristuskestävyyden mitoitusarvot tasaiselle puristukselle voidaan laskea kaavan (14) avulla.

Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3 
$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = A_{RD} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (14)$$

## 5.5 Nurjahduskestävyys

RIL 271-2019 mukaan nurjahduskestävyys tarkistetaan kaavojen 15-21 avulla. Nurjahduskestävyyden tulee toteuttaa kaavan (15) mukainen mitoitusehto. Kun porapaalu toimii pääasiallisesti vaakakuormitettuna kaivannon tukirakenteena, määräävä laskeutakuorma  $N_{Ed}$  johdetaan määrävimmän tukitason ankkuripunokseen vaikuttavan tukireaktion pystykomponentista. Mikäli rakenteessa on myös aksiaalista puristuskuormaa, tulee se huomioida nurjahdusmitoituksessa.

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (15)$$

missä

$N_{b,Rd}$  = Nurjahduksen huomioiva puristuskestävyys [kN]

$N_{Ed}$  = Mitoittava keskeinen puristusrasitus [kN]

Nurjahduskestävyys määritetään kimmoteorian mukaisesti Eulerin nurjahduskaavasta johtamalla. Rakenteen puhdasta puristuskestävyyttä pienennetään nurjahduksen huomioivalla pienennyskertoimella  $\chi$ , joka saa arvoja välillä 0-1. Kun rakenne ei ole altis nurjahdukselle  $\chi=1,0$ . Kertoimen suuruuteen vaikuttaa oleellisesti rakenteen muunnettu hoikkuus  $\bar{\lambda}$ . Nurjahdusta ei tarvitse huomioida, jos kumpikaan kaavan (16) ehdoista toteutuu:

$$\bar{\lambda} \leq 0,2 \text{ tai } N_{Ed}/N_{cr} \leq 0,4 \quad (16)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad (17)$$

missä

$L_{cr}$  = Rakenteen nurjahduspituus.

$E$  = Kimmokerroin. Teräksellä  $E = 210\,000\text{N/mm}^2$

$I$  = jäyhyysmomentti [ $\text{mm}^4$ ]. (Liite 1)

$N_{cr}$  = kriittinen nurjahduskuorma [kN]

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{RD} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (18)$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (19)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ jossa } \chi \leq 1,0 \quad (20)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{RD} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (21)$$

missä

$\gamma_{M1} = 1,0$  (taulukko 4).

## 5.6 Yhdistetyt rasitukset

Kun porapaalurakenteeseen vaikuttaa maaperästä tulevan vaakakuorman lisäksi pysty akselin suuntaista kuormaa, tulee ne tarkastella yhdistelmänä. Yhdistettyjä rasituk-  
sia voidaan RIL 271-2019 mukaisilla laskukaavoilla.

## 5.7 Lommahdustarkastelu

Lommahdustarkastelua ei tarvitse tehdä, kun porapaalu betonoidaan sisältä. Muussa tapauksessa se tarkastellaan yhdistetyille puristus- ja taivutusrasituksille. Lommahdustarkastelu tulee suorittaa, mikäli kaavan (22) ehto ei toteudu. Porapaalun jäädessä pysyväksi rakenteeksi, tulee tarkastelussa huomioida myös teräksen korroosiovara. (RIL 271-2019, 55.)

$$\frac{D}{t_p} \leq 90 \cdot \frac{f_0}{f_y} \quad (22)$$

missä

$D$  = putkiprofiilin ulkohalkaisija [mm]

$t_p$  = putkiprofiilin seinäpaksuus [mm]

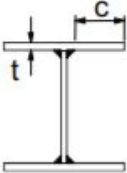
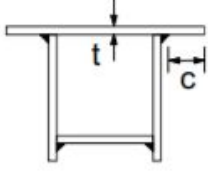
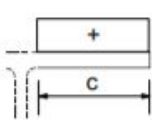
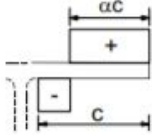
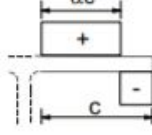
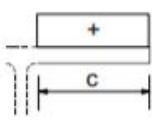
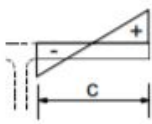
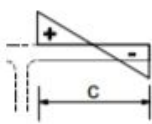
$f_0$  = 235 MPa

$f_y$  = poikkileikkauksen teräksen myötölujuus [N/mm<sup>2</sup>]

## 5.8 Ankkurirakenteet

### **Vaakapalkki**

Porapaaluseinän vaakapalkki toimii porapaaluseinän vaakatuennassa taivutettuna palkkina. Leikkausvoiman ylittäessä 50% käyttöasteesta, tulee rakenteen momenttikapasiteettiä pienentää. (RIL 271-2014,110.) Laskentakaavat soveltuvat sellaisenaan palkeille, jotka kuuluvat poikkileikkausluokkiin 1 ja 2. Poikkileikkausluokassa 3 käytetään plastisen taivutusvastuksen  $W_{pl}$  sijaan elastista taivutusvastusta  $W_{el}$ . Vaakapalkin poikkileikkausluokka voidaan määrittellä kuvioiden (9) ja (10) avulla.

							
Poikkileikkausluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat <sup>a)</sup>					
		Vapaa reuna on puristettu			Vapaa reuna on vedetty		
Taso-osan jännitysjaakauma (puristus positiivinen)							
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$			$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$			$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Taso-osan jännitysjaakauma (puristus positiivinen)							
3	$c/t \leq 14\epsilon$ <sup>b)</sup>	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ <sup>c)</sup>					
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	<b>355</b>	420	460	500
	$\epsilon$	1,0000	0,9244	<b>0,8136</b>	0,7480	0,7148	0,6856
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	550	600	620	650	690	700
	$\epsilon$	0,6537	0,6258	0,6157	0,6013	0,5836	0,5794
a) Varmalla puolella oleva arvio saadaan, kun poikkileikkausluokka määritetään puhtaan puristuksen mukaan							
b) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 13,96\epsilon$							
c) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 21,29\epsilon\sqrt{k_\sigma}$							

Kuvio 9. Poikkileikkausluokan määrittäminen palkin laipalle (Ruukki hitsatut profiilit käsikirja 2010, 84).

Poikkileikkausluokka		Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutus ko. akselin suhteen			
Taso-osan jännitys jakauma (puristus positiivinen)							
1	$b/t \leq 72\epsilon$	$b/t \leq 33\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: b/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha-1}$ $kun \alpha \leq 0,5: b/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$				
2	$b/t \leq 83\epsilon$	$b/t \leq 38\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: b/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha-1}$ $kun \alpha \leq 0,5: b/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$				
Taso-osan jännitys jakauma (puristus positiivinen)							
3	$b/t \leq 124\epsilon$ <sup>c)</sup>	$b/t \leq 42\epsilon$ <sup>d)</sup>	$kun \psi > -1: b/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ <sup>e)</sup> $kun \psi \leq -1$ <sup>f)</sup> : $b/t \leq 62\epsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460	500
	$\epsilon$	1,0000	0,9244	0,8136	0,7480	0,7148	0,6856
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	550	600	620	650	690	700
	$\epsilon$	0,6537	0,6258	0,6157	0,6013	0,5836	0,5794

a) Varmalla puolella oleva arvio saadaan, kun poikkileikkausluokka määritetään puhtaan puristuksen mukaan  
b) Puristetun osan korkeuden määrittäminen ( $\alpha$ -kerroin), ks. kohta 2.7.1  
c) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan:  $b/t \leq 121,43\epsilon$   
d) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan:  $b/t \leq 38,25\epsilon$   
e) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvo riippuu lommahduskertoimesta  $k_\sigma$  ja jännityssuhteesta  $\psi$   
f) Kohtaa  $\psi \leq -1$  käytetään, kun joko puristusjännitys  $\sigma < f_y$  tai vedetyn puolen venymä  $\epsilon_y > f_y / E$

Kuvio 10. Poikkileikkausluokan määrittäminen palkin uumalle (Ruukki hitsatut profiilit käsikirja 2010, 83).

Vaakapalkin mitoituksessa tulee huomioida taivutus- ja leikkausrasituksen lisäksi kiepahdus, leikkauslommahdus ja tarvittaessa vääntörasitus. Vaakapalkissa kiepahdus on harvoin määräävä ja rakenne on edullisinta suunnitella siten, ettei se ole altis kiepahtamiselle. Tähän vaikuttaa pääasiallisesti palkin hoikkuus ja tukien/ankkurien välinen etäisyys. (RIL 271-2019, 80.)

Vaakapalkki voidaan suunnitella toimivan jatkuvana rakenteena tai 1-aukkoisena palkkina. Jatkuvuuskohta on edullisinta sijoittaa taivutusrasituksen nollakohtaan, lähelle ankkuritukea. (RIL 263-2014, 110.)

### Taivutusmitoitus

RIL 263-2014 esittää laskentakaavat vaakapalkin taivutuskestävyyden mitoitukselle kaavojen (23) – (27) avulla. Kaavan (23) mitoitusehdon tulee toteutua.

$$M_{Rd} \geq M_{pd} \quad (23)$$

$M_{Rd}$  = Palkin taivutuskestävyyden mitoitusarvo [kNm/m]

$M_{pd}$  = Mitoittava palkin taivutusrasitus [kNm/m]

Palkin taivutuskapasiteetti lasketaan kaavan (24) mukaisesti, kun palkki suunnitellaan 1-aukkoisena rakenteena. Laskentakaavoja (25-27) käytetään, kun palkki suunnitellaan jatkuvana rakenteena.

$$M_{Rd} = W_{pl} f_d / \gamma_{M0} \quad (24)$$

$$M_{pd}^1 = k (q \gamma_{MK}) l^2 \quad (25)$$

$M_{pd}^1$  = Palkkiin kohdistuva mitoittava kenttämomentsi [kNm/m]

$k$  = Palkin aukkojen määrästä ja kuormitustavasta määräytyvä kerroin. 2-aukkoisella vapaasti päistään ja keskeltä tuetulla palkilla  $k=0,1$ .

$q$  = palkkiin kohdistuva vaakasuuntainen kuormitus [kN/m]

$l$  = tukipisteiden välinen etäisyys [m]

$\gamma_{MK}$  = kuorman mallikerroin. 1,35 pysyvät rakenteet, 1,15 työnaikaiset rakenteet.

$$M_{pd}^2 = k ( q \gamma_{MK} ) l^2 - \Delta M \quad (26)$$

$\Delta M$  = tukirakenteiden leveyteen perustuva tukimomentin redusointi [kNm/m]

$$\Delta M = T t/8 \quad (27)$$

$T$  = Tukivoima [kN]

$t$  = Tukirasituksen leveys vaakapalkin takapinnalla [m]

### Leikkausmitoitus

RIL 271-2019 mukaan, mitoitusehdon (28) tulee toteutua. Laskentakaavassa (29) palkki huomioidaan 1-aukkoisena palkkina, mikä johtaa varmalle puolelle, mikäli rakenne suunnitellaan jatkuvana rakenteena.

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} \quad (28)$$

missä

$V_{Ed}$  = mitoittava leikkausrasitus [N, kN]

$V_{c,Rd}$  = palkin leikkauskapasiteetti [N, kN]

$$V_{c,Rd} = \frac{A_w \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \quad (29)$$

missä

$A_w$  = palkin uuman poikkileikkauspinta-ala [mm<sup>2</sup>]

$f_y$  = teräksen myötölujuus [N/mm<sup>2</sup>]

$\gamma_{M0}$  = teräksen osavarmuusluku = 1,0 (taulukko 4)

Valssatuilla I – ja H profiileilla  $A_w$  lasketaan kaavan (30) mukaisesti.

$$A_w = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f \geq \eta_t \cdot h_w \cdot t_w \quad (30)$$

missä

$b$  = vaakapalkin kokonaisleveys [mm]

$h_w$  = vaakapalkin kokonaiskorkeus [mm]

$t_f$  = vaakapalkin laipan paksuus [mm]

$t_w$  = vaakapalkin uuman paksuus [mm]

$r$  = pyöristyssäde uuman ja laipan rajassa [mm]

$\eta_t$  = teräslajista riippuva kerroin. 1,2, kun  $f_y \leq 460$  N/mm<sup>2</sup>. Muulloin 1,0.

### Leikkauslommahdus

RIL 271-2019 mukaan, rakenne ei ole altis leikkauslommahdukselle jos mitoitusehto (31) toteutuu.

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72\epsilon}{\eta_t} \quad (31)$$

## Ankkuripunokset

Kaikilta osavana kaivannon tukirakenteena toimivilta vetoankkureilta vaaditaan SFS-EN ISO-22477-5:2018 mukaista hyväksyntäkoetta. Hyväksyntäkokeessa käytetään koevetovoimaa  $F_{koe,max}$ , joka määritetään kaavojen (32-34) mukaisesti, joista pienempään lopputulokseen johtavaa arvoa käytetään. (RIL 271-2019, 95-96.)

$$F_{koe,max} \leq 0,8 \cdot f_{t,k} \cdot A_{pp} \quad (32)$$

$$F_{koe,max} \leq 0,95 \cdot f_{t,0,1,k} \cdot A_{pp} \quad (33)$$

tai

$$F_{koe} \leq 0,95 \cdot f_{t,0,2,k} \cdot A_{pp} \quad (34)$$

missä

Ankurivalmistaja voi esittää ankkureille kestävyysominaisuuksia, jolloin tulee tapauskohtaisesti määrittää kaavojen ja valmistajan arvojen eroavaisuuksia ja valita niistä pienin arvo (RIL 271-2019, 96).

## Ankurikonsoli

Ankurikonsoli koostuu yleisesti ankkurilevystä ja poskilevyistä. Konsolin mitoitus on edullisintä, kun vaakapalkin ja ankkuripunosten pystysuora keskiöetäisyys on yhtä suuri kuin punosten ja porapaalun keskiöetäisyys vaakasuunnassa. Tällöin voidaan todeta rakenne vääntörasittamattomaksi. Edellä esitetään ankurikonsolin mitoitus käsin laskennalla, mutta suurien kaivantojen alueella on suositeltavaa suorittaa mitoitus FEM-laskentaohjelmalla, sillä käsin laskenta johtaa suurempaan ylimitoitukseen. (RIL 271-2019, 91-92.)

### Ankkurilevy

Paalun lävitse kallioon injektoidut ankkuripunokset aiheuttavat ankkurilevyyn merkittävää lävistävää rasitusta. Lävistyskestävyys  $B_{p,Rd}$  tarkistetaan RIL 271-2019 mukaisella kaavalla (35).

$$B_{p,Rd} = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (35)$$

missä  $\gamma_{M2} = 1,25$  (taulukko 4).

Ankkurilevyn päällä olevan mutterin tai karan halkaisijalla on merkittävä vaikutus, ankkurilevyyn kohdistuvasta paineesta. Punokset kiinnittyvät karaan ja punoksilta tulevan kuorman oletetaan jakautuvan tasaisesti koko karan poikkipinta-alalle ankkurilevyä vasten.

### Poskilevy

Vaakatuennan ollessa poskilevyn päällä, mitoitetaan se nurjahdukselle. Mitoitus suoritetaan RIL 271-2019 mukaisilla kaavoilla (36-42), mitkä ovat perusrakenteeltaan samat kuin porapaalun nurjahdusmitoituksessa.

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (36)$$

missä

$N_{b,Rd}$  = Nurjahduksen huomioiva puristuskestävyys [kN]

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad (37)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{lp} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (38)$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (39)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ jossa } \chi \leq 1,0 \quad (40)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{lp} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (41)$$

missä

$$\gamma_{M1} = 1,0 \text{ (taulukko 4).}$$

$A_{lp}$  = poskilevyn poikkileikkauksen pinta-ala vaakapalkin laippaa vasten. [mm<sup>2</sup>]

$L_{cr}$  = poskilevyn keskiöetäisyys porapaalun ulkopinnasta [mm]

$I$  = poskilevyn jäyhyysmomentti [mm<sup>4</sup>]

$$I = b \cdot t_i^3 / 12 \quad (42)$$

missä

$t_i$  = levyn paksuus tukiseinän suunnassa [mm]

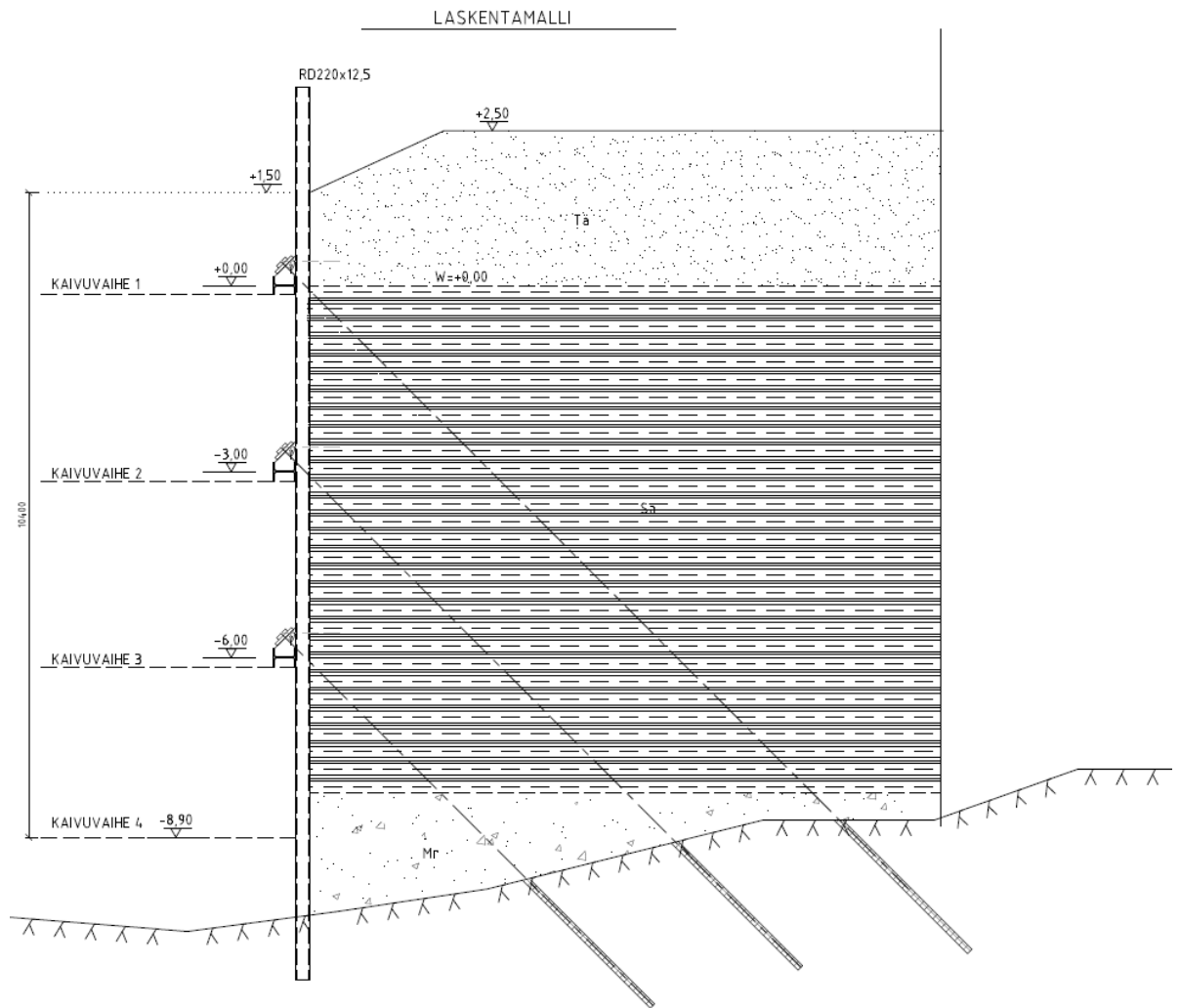
$b$  = nurjahdukselle altis levyn korkeus [mm]

## 6 Laskentaesimerkki ja tulokset

### Lähtötiedot

Työssä tehdään laskentaesimerkki savikolla sijaitsevan kaivannon porapaaluseinästä. Kaivutaso on -8,90 tasolla ja kallionpinta arvioidaan syvyyteen -10,00. Maanpinta on tasossa +2,50 ja maa-aines on +0,00 tasoon asti täyttömaata, jolta arvioidaan mitoituksessa tulevan kuormaa  $30\text{kN/m}^2$ . Maaperä on savea +0,00 tasosta alapäin, jonka tilavuuspainoksi 10% kosteuspitoisuudessa arvioidaan  $18\text{ kN/m}^3$ . Vedenpaineen laskentataso on +0,00. Porapaaluseinän tausta kevennetään tasoon +1,50.

Tukitasoille tulevien kuormitusten määrittämisessä tulee huomioida työnaikainen tilanne ja lopullinen tilanne. Työnaikaisessa tilanteessa määritetään seinärakenteen kestävyys, kun osa tukitasoista on asennettu ja kaivu alemmille tukitasoille suoritetaan. Työnaikaisessa tilanteessa kuormitukset saattavat muodostua huomattavasti suuremmiksi kuin lopullisessa tilanteessa, jolloin kaikki tukitasot on asennettu.



Laskennassa käytettävät paalut ovat RD220x12,5 S460MH. Paalut upotetaan ehjään kallioon noin 1000mm ja injektoidaan betonilla C30/37, joten alapään kiinnitys oletetaan mitoituksessa momenttijäykäksi. Porapaalujen kestävyys tarkastellaan seinän metrin matkalla.

### Maanpaineen määrittäminen

Laskenta suoritetaan leppopaineelle. Laskennassa vedenpaine huomioidaan pysyvänä kuormana. Määräväksi kuormitusyhdistelmäksi muodostui 6.10b, jossa pysyviin kuormiin kohdistettiin osavarmuuskerroin 1,35. Vedenpaine huomioidaan esimerkiksi yksinkertaistuksena täysimääräisenä veden hydrostaattisen paineen mukaisesti ja vesi huomioidaan laskennassa pysyvänä kuormana.

<b>Lepopaine:</b>							
$p_0 = K_0 (\gamma_{SAT} * h + q - u) + u$							
$K_0 = 1 - \sin \varphi'$							
$K_0$	1		lepopainekerroin				
$\varphi'$	0 °		Savella $\varphi=0$ -menetelmä, jolloin $K_0 = 1,0$				
$q_k$	20	kN/m <sup>2</sup>	pintakuorma				
$\gamma_{SAT}$	20,2	kN/m <sup>3</sup>	vedellä kyllästynyt tilavuuspaino				
$h$	8,9	m	yläpuoleisen maanpinnan korkeus tarkasteltavasta pinnasta				
<b>KRT</b>			käyttörajatila (ei varmuuskertoimia)				
$p_k$	199,78	kN/m <sup>2</sup>					
<b>MRT</b>			Murtorajatila				
$p_{0,d}$	250,097	kN/m <sup>2</sup>	Kuormitusyhdistelmä 6.10a				
$p_{1,d}$	273,853	kN/m <sup>2</sup>	Kuormitusyhdistelmä 6.10b				
<b>Huokosvedenpaine u:</b>							
$z$	8,9	m	Pohjaveden korkeus tarkastelupinnasta				
$\gamma_w$	10	kN/m <sup>3</sup>	veden tilavuuspaino yleisesti				
$u$	89	kN/m <sup>2</sup>	Huokosvedenpaine				
<b>Karkearakeiselta täyttömaalta arvioidaan alustavasti kuormaksi 30kN/m<sup>2</sup></b>							
$p_d$	303,853	kN/m <sup>2</sup>					

Kokonaisjännityksen mitoitusarvoksi saadaan  $p_d = 304 \text{ kN/m}^2$  lopullisessa kaivutassossa -8,90. Kuorma otaksutaan maanpinnasta alaspäin suurenevana kolmiokuormana.

## Porapaalun mitoitus taivutukselle ja leikkaukselle

Lähde: RIL 271-2019, Ruukki rakenneputket käsikirja 2012				Kestävyden käyttöaste	
RD220x12,5 S460MH				TÄYTÄ/TARKISTA	
<b>Profiilin lujuusominaisuudet</b>				<b>Kertoimet</b>	
$f_y$	460	N/mm <sup>2</sup>	teräksen myötölujuus	$V_{M0}$	1
$W$	396600	mm <sup>3</sup>	Teräspoikkileikkauksen taivutusvastus	$V_{M1}$	1
$I$	43446000	mm <sup>4</sup>	jäyhyysmomentti	$V_{M2}$	1,25
$E$	210000	N/mm <sup>2</sup>	kimmokerroin	$V_{MK}$	1,15
$A$	8113	mm <sup>2</sup>	teräspoikkileikkauksen nettopinta-ala		
$A_v$	5164,89621	mm <sup>2</sup>	Leikkauspinta-ala	<b>Rasitukset MRT</b>	
				$M_{ed}$	173 kNm
<b>Poikkileikkaus</b>				$V_{ed}$	591,2 kN
$D$	219	mm	profiilin kokonaishalkaisija	$N_{ed}$	kN
$t$	12,5	mm	ainevahvuus		
$k$	283	mm	porapaalujako, huomioi lukon		
<b>Poikkileikkausluokka</b>					
$\epsilon$	0,7147514				
$\epsilon^2$	0,51086957				
$D/t$	17,52			<b>Valitaan ylin hyväksyttävä</b>	
PLL1	25,5434783	$50 \cdot \epsilon^2$	$\geq D/t$	OK	
PLL2	35,7608696	$70 \cdot \epsilon^2$	$\geq D/t$	OK	
PLL3	45,9782609	$90 \cdot \epsilon^2$	$\geq D/t$	OK	
<b>Poikkileikkaus kuuluu luokkaan 1</b>					
<b>Taivutuskestävyys</b>					
$M_{c,Rd}$	182,436	kNm/jm	taivutuskestävyys jatkosmetrille (k-jako)		
$M_{c,Rd}$	644,650177	kNm/m	taivutuskestävyys seinän metrille		
$M_{ed} \leq M_{c,Rd}$		Mitoitusehto taivutukselle			
KA	30,8616994	%	käyttöaste, huomioitu mallikerroin $V_{MK}$		
<b>Leikkauskestävyys</b>					
$V_{pl,Rd}$	1371,69894	kN	yksittäisen paalun leikkauskestävyys		
$V_{pl,Rd}$	4846,99272	kN/m	leikkauskestävyys seinän metrille		
$V_{ed} \leq V_{pl,Rd}$		Mitoitusehto leikkaukselle			
KA	12,1972537	%	käyttöaste		
$KA < 50\%$		<b>TAIVUTUSKAPASITEETTIÄ EI TARVITSE PIENENTÄÄ</b>			

Lepopaineen arvoista muodostuu porapaalulle leikkausrasitusta  $V_{Ed} = 591,2\text{kN}$  ja taivutusrasitusta  $M_{Ed} = 173\text{kNm}$ . Laskelmissa mallikerroimella  $\gamma_{MK}$  on korotettu leikkaus- ja taivutusrasituksia käyttöasteen määrittämisessä. Kun porapaaluseinän kestävyttä tarkastellaan seinän metrille, huomioidaan paalun todellinen etenemä lukko-profiilin kanssa, jolloin  $k=283\text{mm}$ .

## Kallioankkureiden mitoitus

Kallioankkurit mitoitetaan tarkasteltavan tukitason tukireaktiolle  $F$ , huomioiden ankkurijako ja punosten asennuskulma  $\alpha$ . Asennuskulman ollessa 45 astetta, saadaan punoksen suuntainen vetorasitus yksinkertaisesti kaavalla  $F \cdot \sqrt{2}$ . Muussa tapauksessa vetorasitus saadaan kaavalla  $\frac{F}{\cos\alpha}$ . Ankkuripunosten mitoituksessa mallikerroin  $\gamma_{MK}$  korvataan ankkuripunosten varmuuskertoimella  $\gamma_{a,t}$ .

### Tukitaso A (+0,00)

<b>Punokset 15,2mm</b>							
k	3	m	ankkurijako = tukiväli				
$\alpha$	45	°	punosten asennuskulma				
<b>Tukitaso A (+0,0)</b>							
$F_{k,A,tukireakt.}$	182	kN/m					
$F_{k,A,ank.}$	546	kN/ankkuri					
<b>Varmuuskertoimella 1,25:</b>							
$\gamma_{a,t}$	1,25		varmuuskeroain väliaikaisille ankkureille				
$F_{d,A,tukireakt.}$	227,5	kN/m					
$F_{d,A,ank.}$	682,5	kN/ankkuri					
$F_{d,A,punos}$	965,200756	kN/ankkuripunokset. Huomioi punosten asennuskulman!					

<b>Määritetään vaadittu punosmäärä <math>n_{vaad}</math></b>							
<b>St 1570/1770</b>							
$A_{pp}$	150	mm <sup>2</sup>	yhden punoksen poikkileikkauspinta-ala				
$f_{t,0,2,k}$	1500	N/mm <sup>2</sup>	myötöraja 0,2% venymäpituudella				
$f_{t,k}$	1770	N/mm <sup>2</sup>	vetomurtokestävyys				
$F_{koe,vaad}$	965,200756	kN	vaadittu koevetovoima ankkurille				
$n_{vaad}$	4,54425968	kpl	$F_{koe,vaad} / F_{koe,max}$				
<b>Määritetään yhden punoksen maksimi koevetovoima</b>							
$F_{koe,max=min}$	212,4	kN/punos	0,8 * $f_{t,k}$ * $A_{pp}$				
	213,75	kN/punos	0,95 * $f_{t,0,2,k}$ * $A_{pp}$				
$F_{koe,max}$	212,4	kN	suurin sallittu vetovoima yhdelle punokselle				

Tukitasolla +0,00 oltava vähintään 5kpl St 1570/1770 punoksia kun käytetään 3 metrin ankkurijakoa.

### Tukitaso -3,00

Punokset 15,2mm								
k	3	m	ankkurijako = tukiväli					
$\alpha$	45	°	punosten asennuskulma					
<b>Tukitaso B (-3,0)</b>								
$F_{k,A,tukireakt.}$	397	kN/m						
$F_{k,A,ank.}$	1191	kN/ankkuri						
<b>Varmuuskertoimella 1,25:</b>								
$\gamma_{a,t}$	1,25		varmuuskeroin väliaikaisille ankkureille					
$F_{d,A,tukireakt.}$	496,25	kN/m						
$F_{d,A,ank.}$	1488,75	kN/ankkuri						
$F_{d,A,punos}$	2105,410441	kN/ankkuripunokset. Huomioi punosten asennuskulman!						

Määritetään vaadittu punosmäärä $n_{vaad}$								
<b>St 1570/1770</b>								
$A_{pp}$	150	mm <sup>2</sup>	yhden punoksen poikkileikkauspinta-ala					
$f_{t,0,2,k}$	1500	N/mm <sup>2</sup>	myötöraja 0,2% venymäpituudella					
$f_{t,k}$	1770	N/mm <sup>2</sup>	vetomurtokestävyys					
$F_{koe,vaad}$	2105,410441	kN	vaadittu koevetovoima ankkurille					
$n_{vaad}$	9,912478536	kpl	$F_{koe,vaad} / F_{koe,max}$					
<b>Määritetään yhden punoksen maksimi koevetovoima</b>								
$F_{koe,max = min}$	212,4	kN/punos				$0,8 * f_{t,k} * A_{pp}$		
	213,75	kN/punos				$0,95 * f_{t,0,2,k} * A_{pp}$		
$F_{koe,max}$	212,4	kN	suurin sallittu vetovoima yhdelle punokselle					

Tukitasolla -3,00 oltava vähintään 10kpl St 1570/1770 punoksia kun käytetään 3 metrin ankkurijakoa.

## Tukitaso -6,00

<b>Punokset 15,2mm</b>			
k	3	m	ankkurijako = tukiväli
$\alpha$	45	°	punosten asennuskulma
<b>Tukitaso C (-6,0)</b>			
$F_{k,A,tukireakt.}$	592	kN/m	
$F_{k,A,ank.}$	1776	kN/ankkuri	
<b>Varmuuskertoimella 1,25:</b>			
$\gamma_{a,t}$	1,25		varmuuskeroain väliaikaisille ankkureille
$F_{d,A,tukireakt.}$	740	kN/m	
$F_{d,A,ank.}$	2220	kN/ankkuri	
$F_{d,A,punos}$	3139,5541	kN/ankkuripunokset.	Huomioi punosten asennuskulman!

<b>Määritetään vaadittu punosmäärä <math>n_{vaad}</math></b>			
<b>St 1570/1770</b>			
$A_{pp}$	150	mm <sup>2</sup>	yhden punoksen poikkileikkauspinta-ala
$f_{t,0,2,k}$	1500	N/mm <sup>2</sup>	myötöraja 0,2% venymäpituudella
$f_{t,k}$	1770	N/mm <sup>2</sup>	vetomurtokestävyys
$F_{koe,vaad}$	3139,5541	kN	vaadittu koevervoima ankkurille
$n_{vaad}$	14,781328	kpl	$F_{koe,vaad} / F_{koe,max}$
<b>Määritetään yhden punoksen maksimi koevervoima</b>			
$F_{koe,max = min}$	212,4	kN/punos	$0,8 * f_{t,k} * A_{pp}$
	213,75	kN/punos	$0,95 * f_{t,0,2,k} * A_{pp}$
$F_{koe,max}$	212,4	kN	suurin sallittu vetovoima yhdelle punokselle

Tukitasolla -6,00 oltava vähintään 15kpl St 1570/1770 punoksia kun käytetään 3 metrin ankkurijakoa.

## 7 Pohdinta

Laskentaesimerkissä mitoitus suoritettiin käsinlaskentana, mutta on erittäin suositeltavaa todentaa tietokoneavusteisen ohjelman avulla laskemien luotettavuus ja tarkkuus. Erityisesti haastavien ja pinta-alaltaan suurten kaivantojen mitoituksessa laskentaohjelmien käytön tärkeys korostuu, sillä käsinlaskennassa esiintyy yleisesti suurempaa rakenteiden ylimitoitusta, millä voi olla merkittäviä vaikutuksia projektin kokonaiskustannuksiin. Mikäli rakenne suunniteltaisiin myötäväksi, olisi käsinlaskennalla myös haastavaa tarkastella rakenteen siirtymää ja sen vaikutusta kuormien uudelleenjakautumiseen.

Vesitiiveys on tukiseinärakenteissa riippuvainen useista yksittäisistä asioista. Työssä ilmeni, että porapaalupatoseinän vesitiiveyteen vaikutti huomattavasti ympäröivät maakerrokset ja niiden ominaisuudet, sekä paalun erilaiset epäjatkuvuus- ja liitospohdat. Tämän lisäksi huomattava painoarvo vesitiiveyden saavuttamisessa on työn toteutuksen tarkkuudella ja asennuksen mittatarkkuudella. Porapaalujen yhteydessä käytetään usein suihkuinjektointia, jonka onnistuminen yhdellä kertaa on usein vaihtelevaa. Vesitiiveyden saavuttamisessa joudutaan yleensä varautumaan jälki-injektointeihin yksittäisten vuotoalueiden tukkimiseksi.

Työssä tarkasteltiin pääasiallisesti kaivannon ulkopuolisilla vetoankkureilla tuettua porapaaluseinää, mutta toisinaan voidaan joutua tekemään vaakatuenta myös kaivannon sisäpuolelta. Kallioankkurien toteutuksen esteenä voi olla esimerkiksi olemassa olevat rakenteet tai niiden paaluperustukset, joten vaihtoehtoisia tuentaratkaisuja saatetaan joutua hyödyntämään. Työ kuitenkin tarjoaa kattavan suunnittelukokonaisuuden porapaaluihin, sekä vesitiiveyteen liittyen, joten sitä voidaan soveltaa varsin laaja-alaisesti myös erilaisille tuentaratkaisuille.

Laskentaesimerkissä huomattiin, että porapaalujen kestävyiden käyttöasteet jäivät hyvin pieniksi. Porapaalujen sijasta esimerkiksi teräsponttiseinän käyttö voisi olla perusteltua, mikäli ympäristön vaatimukset (tärinä, painuma...) sen sallivat. Porapaalujen käyttö on taloudellisempaa kohteissa, joissa rakenne tulee osaksi pysyvää pysty-

kuormia kantavaa rakennetta, jolloin käyttöasteita saataisiin hyväksikäytettyä tehokkaammin. Porapaaluja voidaan hyödyntää myös teräsponttiseinän kanssa combi-rakenteena, jolloin perinteisen teräsponttiseinärakenteen kestävyyttä saadaan tarvittaessa kasvatettua.

## Liitteet

Liite 1. RD-pienporapaalujen mitat ja poikkileikkaussuureet standardilujuudessa (SSAB suunnittelu- ja asennusohje).

A = Teräspoikkileikkauksen pinta-ala A <sub>v</sub> = Paalun vaipan pinta-ala A <sub>b</sub> = Paalun kärjen pinta-ala						W <sub>el</sub> = Kimmoinen taivutusvastus I = Jätyhyysmomentti Z = Paalun impedanssi				Korroosiovahennetyt poikkileikkaussuureet 1,2 mm ja 2,0 mm korroosiovahennyksillä.					
D [mm]	t [mm]	M [kg/m]	A [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>v</sub> [m <sup>2</sup> /m]	A <sub>b</sub> [mm <sup>2</sup> ]	W <sub>el</sub> [cm <sup>3</sup> ]	I [cm <sup>4</sup> ]	EI [kNm <sup>2</sup> ]	Z [kNs/m]	A <sub>1,2</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>2,0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	I <sub>1,2</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>2,0</sub> [cm <sup>4</sup> ]	EI <sub>1,2</sub> [kNm <sup>2</sup> ]	EI <sub>2,0</sub> [kNm <sup>2</sup> ]
76,1	6,3	10,8	1381	0,24	4548	22,3	84,8	178	56,1	1099	916	65,0	52,8	137	111
88,9	6,3	12,8	1635	0,28	6207	31,5	140,2	294	66,4	1304	1089	108,4	88,7	228	186
114,3	6,3	16,8	2138	0,36	10261	54,7	312,7	657	86,8	1711	1432	244,5	201,4	514	423
114,3	8,0	21,0	2672	0,36	10261	66,4	379,5	797	108,5	2245	1966	311,3	268,2	654	563
127,0	6,3	18,8	2389	0,40	12668	68,7	436,2	916	97,0	1915	1604	342,4	282,8	719	594
139,7	8,0	26,0	3310	0,44	15328	103,1	720,3	1513	134,4	2788	2445	595,1	515,2	1250	1082
139,7	10,0	32,0	4075	0,44	15328	123,4	861,9	1810	165,4	3553	3209	736,7	656,8	1547	1379
168,3	10,0	39,0	4973	0,53	22246	185,9	1564,0	3284	201,9	4343	3928	1344,1	1202,7	2823	2526
168,3	12,5	48,0	6118	0,53	22246	222,0	1868,4	3924	248,4	5488	5073	1648,5	1507,1	3462	3165
219,1	10,0	51,6	6569	0,69	37703	328,5	3598,4	7557	266,7	5748	5205	3110,9	2794,7	6533	5869
219,1	12,5	63,7	8113	0,69	37703	396,6	4344,6	9124	329,4	7292	6749	3857,0	3540,9	8100	7436
244,7	10,0	57,9	7373	0,77	47028	415,7	5086,1	10681	299,4	6455	5848	4405,7	3963,3	9252	8323
244,7	12,5	71,6	9118	0,77	47028	503,7	6163,3	12943	370,2	8200	7594	5482,9	5040,4	11514	10585
273,0	10,0	64,9	8262	0,86	58535	524,1	7154,1	15024	335,5	7238	6560	6207,9	5590,9	13037	11741
273,0	12,5	80,3	10230	0,86	58535	637,2	8697,4	18265	415,3	9205	8527	7751,2	7134,2	16278	14982
323,9	10,0	77,4	9861	1,02	82397	750,7	12158,3	25533	400,4	8645	7839	10574,7	9538,5	22207	20031
323,9	12,5	96,0	12229	1,02	82397	916,7	14846,5	31178	496,5	11012	10206	13262,9	12226,7	27852	25676

## Lähteet

Bond. A & Harris. A. Decoding Eurocode 7. 2008. Lontoo. Taylor & Francis.

Liikennevirasto 13/2017. 2017. Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Helsinki. <http://urn.fi/URN:978-952-317-387-3>

Liikennevirasto 16/2018. 2018. Suihkuinjektointiohje. Helsinki. <http://urn.fi/URN:978-952-317-541-9>

RIL 263-2014. 2014. Kaivanto-ohje. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 271-2019. 2019. Teräsrakenteisten tukiseinien mitoitus. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Ruukki. 2010, Hitsatut profiilit käsikirja 2010. Rautaruukki Oyj.

Ruukki. 2012. Rakenneputket EN 1993 -käsikirja. Rautaruukki Oyj.

SFS-EN 1993-1-1. 2006. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS. <https://janet.finna.fi>, SFS-Online.

SFS-EN 1997-1 + A1 + AC. 2015. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS. <https://janet.finna.fi>, SFS-Online.

SSAB. RD paaluseinä - suunnittelu- ja asennusopas. Viitattu 18.9.2020.

<https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/infrastrukturi/infrastructure-downloads>

SSAB. RR- ja RD-paalut: Suunnittelu- ja asennusohje RR ja RD-paaluille. 2018. Viitattu 18.9.2020. <https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/infrastrukturi/tuotteet/steel-piles-micropiles>

Tirkkonen E. 2016. Vesitiivis kaivanto porapaaluseinärakenteella, Diplomityö, Tampereen Teknillinen yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201604203855>

