

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2023

Heidi Kaipainen

Teräsrakenteisen settiseinän suunnitteluperiaatteet

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2023 | 52 sivua, 1 liitesivu

Heidi Kaipainen

Teräsrakenteisen settiseinän suunnitteluperiaatteet

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on esitellä teräsrakenteisen settiseinän mitoitus yksinkertaistetulla periaatetasolla sekä tutkia porapaalusettiseinän toiminnallisuutta todellisissa hankkeissa. Työssä käsitellään porapaalusettiseinän Eurokoodien mukaista mitoitus sekä suunnittelukuormien ja suunnittelukestävyysien määrittämistä.

Työssä esitellään maanpaineen holvaantumislmiö, joka aiheutuu maamassan holvaantumisesta settilankun takana. Maanpaineen holvaantumislmiö mahdollistaa settilankun mitoittamisen pienemmille maanpaineekuormille.

Työssä käsitellään kolmea erilaista hanketta, joissa porapaalusettiseinää on käytetty kaivannon tuennassa. Tutkimuksen kohteena ovat Vaasassa, Turussa ja Tukholmassa toteutetut työnaikaiset porapaalusettiseinät. Työssä keskitytään erityisesti näiden kohteiden maaperän ja porapaalusettiseinän yhteistoimintaan.

Työn tuloksena syntyi yksinkertaistettu ohjeistus teräsrakenteisen settiseinän mitoituksen vaiheista sekä tutkimus porapaalusettiseinän käytöstä todellisissa hankkeissa.

Asiasanat:

geotekniikka, teräsrakenteet, pohjarakennus, kaivannot, tuenta, settiseinä, porapaalu, tukiseinä

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Civil Engineering

2023 | number of pages: 52, number of pages in appendices: 1

Heidi Kaipainen

The structural design principles of a steel-constructed soldier wall

The purpose of this thesis is to present the design of a steel-constructed soldier pile wall on a simplified level of principle and to investigate the functionality of a drilled pile soldier wall. This thesis covers not only the drilled pile soldier wall but also the design according to Eurocodes, determination of design loads and design resistances.

This thesis presents the silo pressure phenomenon of lateral earth pressure caused by arching of the soil behind the soldier pile wall. This phenomenon enables designing the lagging between the soldier pile wall for smaller loads.

This thesis examines three different projects where the drilled pile soldier wall was used for excavation support. The focus of the study is on temporary soldier walls constructed in Vaasa, Turku, and Stockholm. This work particularly concentrates on the interaction between soil conditions and the drilled pile soldier wall in these cases.

As a result of this thesis, simplified instructions for the process of designing a steel -constructed soldier wall were established, along with exploration of the application of a drilled pile soldier wall in real life projects.

Keywords:

geotechnical engineering, steel constructions, foundation engineering, excavations, excavation support, soldier wall, drilled pile, retaining wall

Sisältö

Käytetty sanasto	7
1 Johdanto	8
2 Porapaalusetteisinä	9
2.1 Yleistä settiseinistä	9
2.2 Soveltuvuus eri pohjaolosuhteissa	10
2.3 Ominaisuudet	13
2.4 Rakentamisen työvaiheet	14
3 Tukiseinän suunnitteluperiaatteet	17
3.1 Eurokoodin mukainen mitoitus	17
3.2 Murtorajatilamitoitus	18
3.2.1 Murtorajatilatarkastelun kuormien määrittäminen	18
3.2.2 Maaparametrien osavarmuusluvut	19
3.2.3 Kestävyyksien ja materiaalien osavarmuusluvut	20
3.2.4 Kuorman mallikerroin γ_{MK}	20
3.2.5 Kuormakerroin K_{FI}	21
3.3 Käyttöraajatilamitoitus	22
3.4 Onnettomuusrajatilamitoitus	22
4 Settiseinään kohdistuvat kuormat	24
4.1 Pystytukiin vaikuttava maanpaine	24
4.2 Pystytukien välissä vaikuttava maanpaine	26
5 Rakenneosien mitoitus ja suunnittelu	30
5.1 Settiseinän pystyputken mitoitus	30
5.2 Settilankkuna toimivan teräslevyn mitoitus	32
5.3 Settilankun hitsaus	33
5.4 Settiseinän vaakatuenta	34
5.4.1 Juoksupalkki	34
5.4.2 Poikkituki	35

5.4.3 Ankkurointi	36
6 Kaivantoesimerkit	37
6.1 Vaskiluodon voimalaitos, Vaasa	37
6.1.1 Pohjaolosuhteet	38
6.1.2 Työn toteutus	38
6.2 Högdalen, Tukholma	41
6.2.1 Pohjaolosuhteet	41
6.2.2 Työn toteutus	43
6.3 Rakennettu ympäristö, Turku	45
6.3.1 Pohjaolosuhteet	46
6.3.2 Työn toteutus	47
7 Pohdinta	49
Lähteet	51

Liitteet

Liite 1. Mitoituksen kulku käytännössä

Kuvat

Kuva 1. Perinteinen settiseinä.	10
Kuva 2. Tyhjiöpumppausmenetelmä.	15
Kuva 3. Maanpaine on riippuvainen tukiseinän liikkeistä.	24
Kuva 4. Maamassan holvaantumisen seurauksena tapahtuva siilopaineilmiö.	27
Kuva 5. Esimerkki maamassan holvaantumisesta settiseinän takana.	28
Kuva 6. Pienahitsin a-mitta.	33
Kuva 7. Tukiseinän vastakkaintuenta ja tuenta kaivannon sisäpuoliseen rakenteeseen.	35
Kuva 8. Ankkurityypit ankkurointitavan mukaan.	36
Kuva 9. Rakennusalueen pohjaolosuhteet Vaasan kaivannosta.	38

Kuva 10. Porapaalusetettiseinän tukikehikko.	39
Kuva 11. Vaskiluodon voimalaitokselle rakennettu porapaalusetettiseinä vuonna 2023.	40
Kuva 12. Työnaikaisen kaivannon tuennassa käytetty porapaalusetettiseinä vuonna 2021.	41
Kuva 13. Tukholman kaivannon pohjaolosuhteet.	42
Kuva 14. Suuri lohkarie porapaalujen välissä.	43
Kuva 15. Porapaalusetettiseinän porapaalut asennettuna.	44
Kuva 16. Lohkareita, jotka on ohitettu porapaalujen ja teräslevyjen avulla.	45
Kuva 17. Turussa toteutettu porapaalusetettiseinä.	46
Kuva 18. Rakennusalueen pohjaolosuhteet Turussa.	47
Kuva 19. Porapaalu ei ole tarttunut kallioon, jonka vuoksi se on jouduttu pulittaamaan kallioon kiinni.	48

Taulukot

Taulukko 1. Hiekan maaparametrien määrittäminen kairausvastuksen perusteella.	12
Taulukko 2. Soran ja moreenin maaparametrien määrittäminen kairausvastuksen perusteella.	12
Taulukko 3. Kuormien osavarmuusluvut tukiseinämitoituksessa.	19
Taulukko 4. Maaparametrien osavarmuusluvut.	20
Taulukko 5. Teräsosien osavarmuusluvut.	20
Taulukko 6. Seuraamusluokkien määrittely standardin SFS-EN-1990-1 mukaan.	21

Käytetty sanasto

kestävyys	rakenteen tai osan kyky ottaa vastaan kuormia tai sietää muodonmuutoksia; kestävyys on ääriarvo, jota mitoituskuormien aiheuttamat rasitukset eivät saa ylittää (SFS-EN 1990+A1+AC)
kuormitus	kuormien yhdistelmä tai prosessi, jonka mukaan kuormat syntyvät (SFS-EN 1990+A1+AC)
käyttörajatila	rajatila, jonka ylittyessä rakenne ei enää tavallisessa käytössä täytä sen käyttökelpoisuuden ehdoiksi asetettuja vaatimuksia (SFS-EN 1990+A1+AC)
murtorajatila	rajatila, jonka ylittäessä rakenne menettää kantokykynsä (SFS-EN 1990+A1+AC)
porapaalu	poraamalla asennettava maata syrjäyttävä tai syrjäyttämätön paalu (RIL 254-2016)
perinteinen settiseinä	tukiseinä, jonka pystytukina on käytetty HEB-palkkeja ja settilankkuina on käytetty puulankkuja (RIL 271-2019)
siilopaine	maamassan holvaantumisesta aiheutuva maanpaineen holvaantumisilmiö (Perko 2008)
terasponttiseinä	terasposteista muodostuva jatkuva seinämä, joka muodostuu, kun pontit pujotetaan toisiinsa kiinni (RIL 271-2019)
tukiseinä	kaivannon tuennassa käytettävä väliaikainen tukirakenne (Jääskeläinen 2012)

1 Johdanto

Tuetut kaivannot toteutetaan Suomessa tyypillisesti teräsponsittiseinien avulla. Perinteisiä settiseiniä on aikoinaan käytetty kaivannon tuennassa, kun teräksen saatavuus on ollut heikkoa. Nykyään settiseiniä rakennetaan myös vain teräksestä, porapaalusettiseinänä. Porapaalusettiseiniä käytetään tyypillisesti kohteissa, joissa maaperä on kivistä kitkamaata ja kallionpinta sijaitsee lähellä maanpintaa.

Opinnäytetyön tavoitteena on esitellä teräsrakenteisen settiseinän suunnittelua ja toteutusta erilaisten esimerkkikaivantojen avulla. Mitoituksen pääasiallisena ohjeena käytettiin Rakennusinsinööriliiton julkaisua RIL 271-2019 Teräsrakenteisten tukiseinien rakenteellinen mitoitus, ympäristöministeriön kansallista liitettä eurokoodiin SFS-EN-1997 -1 sekä kansainvälisiä julkaisuja.

Tämä opinnäytetyö käsittelee teräsrakenteisen settiseinän mitoituksen periaatteet sekä porapaalusettiseinän käyttöä tukiseinärakenteena. Lisäksi tarkastellaan, millaisia hyötyjä ja haasteita porapaalusettiseinän käytössä oli esimerkkikaivannoissa.

Settiseinän mitoitus aloitetaan ottamalla huomioon kaivannon maaperän ominaisuudet sekä mahdolliset työkonekuormat ja työmaan varastointialueet. Oikeiden pohjatutkimusten avulla selvitetään mitoituksessa tarvittavat parametrit. Teräsrakenteisten tukiseinien mitoituksessa on tärkeää varmistaa, että seinärakenteen kestävyys, vakaus ja turvallisuus ovat optimaalisella tasolla.

Opinnäytetyö tarjoaa tietoa tukiseinän mitoituksesta yksinkertaistetulla periaatetasolla insinööreille, rakennusalan ammattilaisille ja kaikille niille, jotka ovat kiinnostuneita geotekniikasta ja maanrakennuksesta.

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Ramboll Finland Oy.

2 Porapaalusetseinä

Ajan saatossa perinteinen settiseinä on toiminut ratkaisuna monenlaisille eri rakennushankkeille. Historiallisesti katsottuna settiseinät ovat tiedettävästi perustaneet juurensa Suomeen 1950-luvun lopussa, ja ne ovat kehittyneet huomattavasti siitä lähtien. Alun perin ne olivat melko yksinkertaisia rakenteita, mutta nykypäivän versioissa voidaan hyödyntää muita materiaaleja, kuten terästä. Tämä kehitys on mahdollistanut settiseinien käytön myös erilaisissa pohjaolosuhteissa.

2.1 Yleistä settiseinistä

Kaivannon tukeminen on tarpeellista silloin, kun viereisten rakenteiden tai pohjaolosuhteiden vuoksi kaivantoa ei ole mahdollista luiskata. Settiseinä on kaivannon työnaikainen tukirakenne, joka yleensä osittain poistetaan ja jätetään maan alle rakentamisen valmistuttua. (Jääskeläinen 2012, 180–181.)

Settiseiniä käytettiin tiedettävästi Suomessa ensimmäistä kertaa vuonna 1958 Hotelli Marskin kaivannon tukemiseen. Pohjavedenpintaa alennettiin 4–5 metriä samalla kun kaivanto oli paikoittain yli 20 metriä syvä. Settilankkuina käytettiin purettujen talojen hirsiiä ja vanhoja ratapölkkyjä. Myöhemmissä kaivannoissa settiseinän puiset settilankut korvattiin teräs- ja betonielementeillä. (RIL 166-1986, 35.)

Settiseinän runkona toimivat yleensä maahan asennettavat pystypalkit, jotka asennetaan 1–4 metrin välein. Pystytukina käytetään yleensä H-profiilin teräspalkkeja tai porapaaluja. Vaakasuorat settilankut, jotka ovat yleensä teräspalkkeja tai puulankkuja, tukeutuvat pystypalkkeihin ja muodostavat seinärakenteen. Seinärakenteena on mahdollista käyttää myös pystypalkkeihin hitsattavia teräslevyjä tai betonisia välitukia. (RIL 263-2014, 50.)

Vaikka settiseinän käyttäminen kaivannon tuennassa ei ole tyypillistä, se voi toimia hyvänä korvaavana ratkaisuna teräsponttiseinälle, porapaaluseinälle ja

muille tuentaelementeille. Settiseinän suunnittelussa tulee ottaa huomioon pohjaolosuhteiden lisäksi myös rakentamiskustannukset ja rakentamisaika. (RIL 263-2014, 45, 51.) Kuvassa 1 on esitetty perinteinen settiseinä, jonka pystytukina on käytetty teräksisiä H-palkkeja ja pystytukien välissä settilankkuina on käytetty puuta.



Kuva 1. Perinteinen settiseinä (Hannele Kulmala).

2.2 Soveltuvuus eri pohjaolosuhteissa

Pohjatutkimukset tulee suunnitella siten, että niiden tulokset tarjoavat luotettavan käsityksen rakennusalueen pohjaolosuhteista. Näiden tutkimusten avulla tulee pystyä arvioimaan maaparametrien ominaisarvoja suunnittelua varten luotettavasti. (SFS-EN 1997-1, 38.) Tukiseinälinjalla porakonekairaukset tehdään aina kun tukiseinän tavoitetaso on kallio. Tukiseinälinjan porakonekairaukset tehdään painokairausten jälkeen samoista tutkimuspisteistä. (RIL 263-2014, 23, 27.)

Settiseinä ei sovellu pehmeään ja vetelään pohjamaahan. Settilankkujen asennusvaiheessa kaivantoa on pystyttävä kaivamaan minimissään 0,5–1,0 metrin korkuisina kerroksina pystysuorina luiskina. (RIL 263-2014, 50.)

Settiseinä rakenne ei ole vesitiivis, minkä vuoksi pohjaveden pinnan sijainti on otettava huomioon suunnittelun aikana. Tämän lisäksi kaivamista pohjaveden pinnan alapuolella on vältettävä, sillä näin tehtäessä syntyy hydraulisen murtuman mahdollisuus. (Jääskeläinen 2012, 189.) Hydraulisen murtumisen mahdollisuus voidaan sulkea ulkopuolelle alentamalla pohjaveden pintaa kaivannon alueella. Pohjaveden alentumista seurataan havaintoputkista ennen kaivuutyön aloittamista. Alennusta on jatkettava siihen asti kuin hydraulisen murtumisen riski on olemassa. (RIL 263-2014, 139.)

Settiseinä soveltuu pääsääntöisesti käytettäväksi kitkamaissa. Maapohjan ollessa tiivis ja lohkareinen teräsponttiseinän pontteja ei välttämättä ole mahdollista upottaa tukiseinän tavoitetasoon. Settiseinä rakenne, jossa on käytetty pystyrakenteena porapaaluja, soveltuu lohkareiseen kitkamaahan ja uppoaa helposti kallioon. (RIL 263-2014, 51.)

Kitkamaalajien ominaisuuksia voidaan arvioida maakerrosten paino- tai heijarikairausvastukseen perustuen. Kairausvastukseen ja in-situ-kokeisiin perustuvat menetelmät kitkamaalajien lujuusominaisuuksien määrittämiseksi ovat yleisimmin käytettyjä menetelmiä, sillä näytteenotto laboratoriokokeita varten karkearakeisista maalajeista on hankalaa. (SGY ry 2023, 7–8.)

Suomessa on käytössä mm. Väyläviraston julkaisemat likimääräiset taulukot, joiden avulla voidaan arvioida maakerroksen tilavuuspainoa, kitkakulmaa, sekä Janbun yhtälön muodonmuutos parametreja m ja β kairausvastuksen perusteella. Maan parametrien ja ominaisuuksien arvioimisessa pohjatutkimuksien antamia arvoja verrataan taulukoihin. Maan parametrien arvioimisessa on etuna olla myös kokemuseräistä tietoa maaperän ominaisuuksista. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty Väyläviraston julkaisemat likimääräiset taulukot, jotka edustavat maan parametrien ja ominaisuuksien varovaisia arvoja. (NCCI7, liite 6.)

Taulukko 1. Hiekan maaparametrien määrittäminen kairausvastuksen perusteella (NCCI 7, liite 6).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohjavedenpinnan		Kitkakulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduulilukum	Jännityksen eksponentti β	Puristuskairaus q _c (MPa)	Painokairaus P _k /0,2 m	Heijarikairaus L/0,2 m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keskitiivis			30	70 ... 150	0,3	7 ... 15	40 ... 100	8 ... 25
	Tiivis	16 ... 18	11	32	100 ... 300	0,3	> 15	> 100	> 25
Hieno hiekka d ₁₀ <0,06	Löyhä	15 ... 17	9 ...	30	50 ... 150	0,5	< 10	20 ... 50	5 ... 15
	Keskitiivis			33	100 ... 200	0,5	10 ... 20	50 ... 100	15 ... 30
	Tiivis	16 ... 18	11	36	150 ... 300	0,5	> 20	> 100	> 30
Hiekka d ₁₀ >0,06	Löyhä	16 ... 18	10 ...	32	150 ... 300	0,5	< 6	10 ... 30	5 ... 12
	Keskitiivis			35	200 ... 400	0,5	6 ... 14	30 ... 60	12 ... 25
	Tiivis	18 ... 20	12	38	300 ... 600	0,5	> 14	> 60	> 25

Taulukko 2. Soran ja moreenin maaparametrien määrittäminen kairausvastuksen perusteella (NCCI 7, liite 6).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohjavedenpinnan		Kitkakulma a (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduulilukum	Jännityksen eksponentti β	Puristuskairaus q _c (MPa)	Painokairaus P _k /0,2 m	Heijarikairaus L/0,2 m
Sora	Löyhä	17 ... 19	10 ...	34	300 ... 600	0,5	< 5,5	10 ... 25	5 ... 10
	Keskitiivis			37	400 ... 800	0,5	5,5 ... 12	25 ... 50	10 ... 20
	Tiivis	18 ... 20	12	40	600 ... 1200	0,5	> 12	> 50	> 20
Moreeni	Hyvin löyhä	16 ... 19	10 ... 12	... 34	(≤100) * 300 ... 600	0,5	< 10	< 40	< 20
	Löyhä	17 ... 20	10 ... 12	... 36	(100...250)* 600 ...	0,5	> 10	40 ... 100	20 ... 60
	Keskitiivis	18 ... 21	11 ... 13	... 38	800 ...	0,5	-	> 100	60 ... 140
	Tiivis	19 ... 23	11 ... 14	... 40	1200 ...	0,5	-	Lyömällä	> 140

2.3 Ominaisuudet

Settiseinän rakentamista yleisesti ottaen pidetään hitaana ja kalliina. Porapaalusettiseinän etuna on kuitenkin se, että maaperän ollessa lohkarainen erilliset paalut saadaan asennettua maahan ja kallioon helpommin kuin yhtenäinen teräsponttiseinä. Teräsponttiseinän alapään sijoittaminen lähelle kallionpintaa voi olla haastavaa ja teräsponttiseinä vaatii yleensä myös juuritapin käyttöä kallionpinnalla, joka on erikseen mitoitettava. Suunnittelussa on tärkeää huomioida olosuhteet, johon tilapäistä tukiseinää tarvitaan. Suunnittelun aikana voi ilmetä, että settiseinä on kustannustehokkaampi ratkaisu muihin vaihtoehtoihin verrattuna. (RIL 263-2014, 51.)

Täryttämällä ja lyömällä tapahtuva pystypalkkien asennus aiheuttaa maapohjaan tärinää, jolla on tiivistävä vaikutus erityisesti löyhässä tilassa oleviin kitkamaakerroksiin. Tiivistyminen ja painuma on voimakkainta tukiseinän välittömässä läheisyydessä. Kun pystypalkkeina käytetään porapaaluja, voidaan välttyä ympäristölle aiheutuvalta haitalliselta tärinältä. (RIL 263-2014, 50.)

Porapaalusettiseinän etuna on, että porapaalut saadaan asennettua lähes suunnitelmien mukaisesti. Erityisesti epäkeskistä porausmenetelmää käytettäessä porattavilla teräspaaluilla päästään suhteellisen helposti tarkkoihin toteutuksiin. Paaluissa ei myöskään esiinny epätarkoituksenmukaista vinoutumista samalla tavalla kuin esimerkiksi lyömällä asennettavissa paaluissa. (RIL 254-2016, 184.)

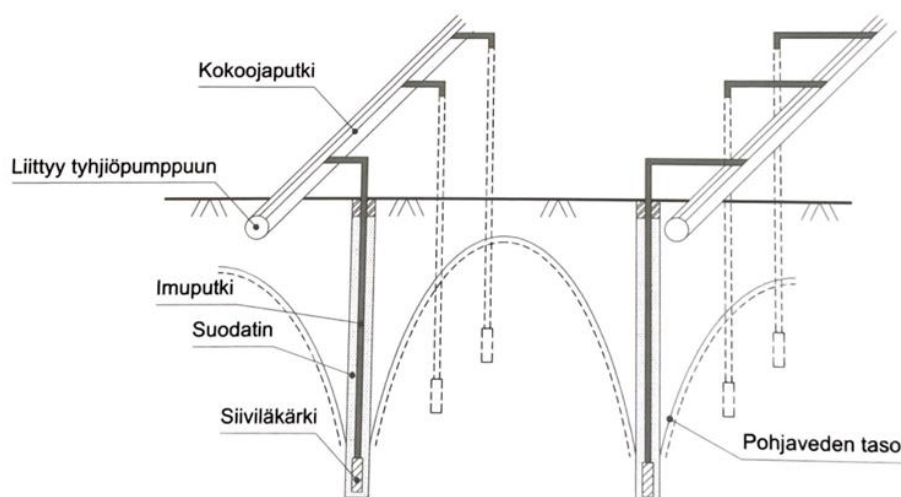
Teräsponttiseinää voidaan yleensä käyttää uudelleen, mutta porapaalusettiseinän uudelleenkäytettävyys ei ole mahdollista. Porapaaluja on lähes mahdotonta irrottaa kallioista ehjänä ja porapaalujen pakonomaista irrottamista ei yleisesti ottaen pidetä järkevänä.

2.4 Rakentamisen työvaiheet

Tukiseinän asentaminen aloitetaan aina valmistelevilla töillä. Ennen rakennustöiden aloittamista työmaa-alueella pidetään tarvittavat katselmukset. Katselmuksissa todetaan rakennusten, laitteiden, putkijohtojen, ja alueiden pintarakenteiden kunto ja sovitaan työnaikaisista tarkkailutoimenpiteistä. Toteuma- ja tarkemittausten avulla varmistutaan suunnitelmissa osoitetuista tukiseinän paikasta ja tukitasoista. (RIL 263-2014, 158–159.) Mikäli rakennustyötä tehdään kylmänä vuodenaikana, on työstä laadittava erillinen työsuunnitelma, joka sisältää mm. selvityksen käytettävästä työnaikaisesta routasuojauksesta sekä tehtävistä täyttö- ja juotostöistä (RIL 261-2013, 244).

Mikäli kaivannon pohja ulottuu pohjaveden pinnan alapuolelle, on alueella suoritettava pohjaveden pinnan alennus. Pohjaveden pinnan alennus on aloitettava hyvissä ajoin ennen kaivutöiden aloittamista. Pohjaveden pinnan tasoa seurataan viikoittain erillisistä pohjavedenseurantaputkista. Pohjaveden alennus voidaan lopettaa, kun kaivannon täyttö on yhden metrin lopullisen pohjaveden pinnan yläpuolella. (RIL 263-2014, 159.)

Pohjaveden alennusmenetelmiä on useita, kuten esim. syvät pumppauskaivannot ja tyhjiöpumppausmenetelmä. Tyhjiöpumppaus on yleensä tehokkain pohjavedenalennusmenetelmä hienoainesta sisältävissä maalajeissa. Menetelmälle otollisia maalajeja ovat lähinnä hieno hiekka, karkea siltti, soramoreeni ja hiekkamoreeni. (RIL 263-2014, 72.) Kuvassa 2 on esitetty havainnollistava kuva tyhjiöpumppausmenetelmästä.



Kuva 2. Tyhjiöpumpausmenetelmä (RIL 263-2014, 72).

Porapaalusetteisien pystytukina käytettävät porapaalut porataan suunnitelmissa esitettyihin sijainteihin ja asennustasoihin. Porauksesta pidetään paalutuspöytäkirjaa, johon kirjataan muun muassa paalujen poraussyvyys, kallionpinnan taso ja kallionlaatu. (RIL 263-2014, 167.)

Paalut tyhjennetään tarvittaessa huuhtelemalla maa-aineksesta. Paaluputket sekä paalun ja kallion välinen rako voidaan täyttää betonilla. Paalun betonointi lisää paalun puristuslujuutta ja jäykkyyttä. Lisäksi paalun betonointi estää paalun nurjahtamista ja lommahtamista. Betonointi myös hidastaa pohjaveden aiheuttamaa korroosiota paalun sisäpuolella. Paalun sisään voidaan asentaa myös HEB-palkki, jonka jälkeen paalu betonoidaan. Tällöin paalun kestävyys kasvaa huomattavasti. (RIL 263-2014, 224.)

Porapaalutuksen jälkeen maamassaa kaivetaan noin yksi metri kerrallaan. Yhden metrin kaivun jälkeen teräslevy hitsataan porapaaluihin. Teräslevyn ja taustamaan välinen rako täytetään karkealla hiekalla tai murskeella. Teräslevyn ja taustamaan välinen hiekkatäyttö mahdollistaa maamassan holvaantumisen pystytukien välillä. Maamassan holvaantuminen mahdollistaa maanpaineen holvaantumisilmion, jota käsitellään tarkemmin luvussa 4.2.

Vaiheittaista maankaivua, teräslevyjen asentamista ja taustatäyttöä jatketaan tukiseinän tukitasoon asti. On suositeltavaa tehdä kaivanto hieman ylisyväksi,

jotta tarvittavat ankkurit, juoksupalkit ja poikkivetimet saadaan asennettua.

Tukitason asennuksen jälkeen vaiheittaista kaivua, teräslevyjen asennusta ja taustatäyttöä jatketaan suunniteltuun kaivutasoon tai kallionpintaan asti. (RIL 263-2014, 178.)

Kun kaivannon täyttö on yltänyt tukitasoon asti, mahdollisten ankkureiden jännitykset poistetaan. Täytön yltäessä lähelle maanpintaa, paaluputket ja levyt poistetaan noin yhden metrin maanpinnan alapuolelta. Porapaalusetettien muut rakenteet jätetään maanpinnan alapuolelle.

3 Tukiseinän suunnitteluperiaatteet

Tukiseinän oikeaoppisella suunnittelulla on merkittävä rooli projektin onnistumisessa. Tukiseinät tarjoavat vakautta erilaisille maaperäolosuhteille, ja niiden suunnittelussa on noudatettava tiettyjä suunnitteluperiaatteita.

Tässä osiossa käsitellään tukiseinän mitoitusta eurokoodien mukaisesti. Näiden periaatteiden noudattaminen on tärkeää varmistamassa, että tukiseinä suoriutuu tehtävästään tehokkaasti ja turvallisesti.

3.1 Eurokoodin mukainen mitoitus

Kaivanto- ja maanrakennustöissä noudatetaan eurokoodin mukaista mitoitusmenettelyä. Talonrakennustyöhön liittyvissä rakennusluvanvaraisissa kaivannoissa noudatetaan ympäristöministeriön vahvistamia kansallisia liitteitä. (RIL 263-2014, 18.)

Liikenne- ja viestintäministeriön hallintoalaan kuuluvien teiden, ratojen ja siltojen kaivantojen suunnittelussa sovelletaan liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjetta NCCI 7 sekä liikenne- ja viestintäministeriön kansallista liitettä. Ympäristöministeriön ja liikenne- ja viestintäministeriön eurokoodin kansallisissa liitteissä ja soveltamisohjeissa on eroja kuormituksissa ja osavarmuusluvuissa. (RIL 263-2014, 18.)

Kaivannon tukirakenteet mitoitetaan eurokoodin mukaisesti mitoitustavalla 2. Mitoitustavalla osoitetaan, että liiallisia muodonmuutoksia ei synny ominaiskuormilla lasketussa käyttörajatilassa ja murtorajatilassa suunnittelukuormat eivät ylitä suunnittelukestävyyksiä. Mitoitustavassa 2 osavarmuuslukujen yhdistelmä on $A1 + M1 + R2$ (RIL 263-2014, 99.), jossa

A1 = kuormien vaikutuksen osavarmuusluvut

M1 = maaparametrien osavarmuusluvut

R2 = tukirakenteiden kestävyysden osavarmuusluvut.

3.2 Murtorajatilamitoitus

Murtorajatilaksi katsotaan tilanne, jossa rakenteen sortuminen tai sitä edeltävä tila aiheuttaa vaaraa ihmisen turvallisuudelle tai omaisuudelle. Standardin SFS-EN 1990+A1+AC mukaan murtorajatilat ovat seuraavat:

- EQU (staattinen tasapaino): jäykkänä kappaleena tarkasteltavan rakenteen tai sen osan staattisen tasapainon menetys
- STR (kestävyys): rakenteen tai rakenneosien sisäisen vaurioituminen tai liian suuri siirtymätila; kun rakenteen rakennusmateriaalien lujuus on määräävä
- GEO (geotekninen): maan pettäminen tai liian suuri siirtymätila, kun maakerroksen tai kallion lujuus on merkittävä kestävyuden kannalta.

Kaivannon tukirakenteiden mitoituksessa tarkastellaan rakenteen kestävyys murtorajatilassa STR/GEO. Murtorajatilamitoituksessa STR/GEO tulee tarkastaa, että poikkileikkauksen, rakenneosan tai liitoksen murtumisen rajatilan mitoitusehto täyttyy kaavan 1 mukaisesti seuraavasti:

$$E_d \leq R_d \quad (1),$$

jossa

E_d	kuormien mitoitusarvo
R_d	kestävyyden mitoitusarvo

3.2.1 Murtorajatilatarkastelun kuormien määrittäminen

Murtorajatilassa STR/GEO kaivannon tukirakenteiden mitoituksessa kuormien yhdistelmänä käytetään epäedullisempaa yhtälöistä SFS-EN 1990 6.10a ja 6.10b. Kuormien yhdistelmä EN 1990 6.10a lasketaan kaavalla 2 seuraavasti:

$$1,35 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} \quad (2),$$

Kuormien yhdistelmä EN 1990 6.10b lasketaan kaavalla 3 seuraavasti:

$$1,15 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj,sup} + 0,9 \cdot G_{kj,inf} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot \sum \psi_{0,1} \cdot Q_{k,i} \quad (3),$$

Kaavoissa ovat

$G_{kj,sup}$	kaatavien pysyvien kuormien ominaisarvo
$G_{kj,inf}$	vakauttavien pysyvien kuormien ominaisarvo
$Q_{k,i}$	kaatavan muuttuvan kuorman ominaisarvo
K_{FI}	kuormakerroin
$\psi_{0,1}$	pienennyskerroin

Taulukossa 3 on esitetty kuormien tai kuorman vaikutusten osavarmuusluvut Ympäristöministeriön sarjan A1 mukaisesti.

Taulukko 3. Kuormien osavarmuusluvut tukiseinämitoituksessa (Ympäristöministeriö 2016, 37).

Pysyvä kuorma		
Epäedullinen		
	Yhtälö EN 1990 6.10a	1,35 K_{FI}
	Yhtälö EN 1990 6.10b	1,15 K_{FI}
Edullinen		0,9 K_{FI}
Muuttuva kuorma		
Epäedullinen		1,5 K_{FI}
Edullinen		0

3.2.2 Maaparametrien osavarmuusluvut

Eurokoodin mukaisessa tukiseinämitoituksessa maaparametreille käytetään sarjan M1 osavarmuuslukuja. Sarjassa M1 maaparametrien osavarmuusluvut ovat kaikki suuruudeltaan 1,0. (RIL 271-2019, 101.) Taulukossa 4 on esitetty eurokoodin mukaiset maaparametrien osavarmuusluvut sarjan M1 mukaisesti.

Taulukko 4. Maaparametrien osavarmuusluvut (SFS-EN 1997-1, 51).

Leikkauskestävyyskulma	$\gamma_{\varnothing} = 1,0$
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'} = 1,0$
Suljettu leikkauslujuus	$\gamma_{cu} = 1,0$
Yksiakseliallinen puristuskoee	$\gamma_{qu} = 1,0$
Tilavuuspaino	$\gamma_{\gamma} = 1,0$

3.2.3 Kestävyyksien ja materiaalien osavarmuusluvut

Kaivannon teräsrakenteisten tukirakenteiden mitoituksessa käytetään standardin SFS-EN 1993 mukaisia teräksen osavarmuuslukuja. Taulukossa 5 on esitetty teräksen osavarmuusluvut standardin SFS-EN 1993 mukaan.

Taulukko 5. Teräsosien osavarmuusluvut (Teräsrakenneyhdistys 2014, 36).

γ_{M0}	1,0
γ_{M1}	1,0
γ_{M2}	1,25
γ_{M5}	1,00

Maa- ja kallioankkuroiden osavarmuusluku on työnaikaiselle ankkurille $\gamma_{a,t} = 1,25$ ja pysyvälle ankkurille $\gamma_{a,p} = 1,5$ (RIL 271-2019, 12).

3.2.4 Kuorman mallikerroin γ_{MK}

Laskettaessa ankkuroidun tai vapaasti seisovan tukiseinän maanpainekuormia rajatilassa STR/GEO ja mitoitustavalla DA2 tai DA2* käytetään kaatavalle maan- ja vedenpaineelle kuorman mallikerrointa, joka on pysyville rakenteille $\gamma_{MK}=1,35$ ja työnaikaisille rakenteille $\gamma_{MK}=1,15$ (RIL 263-2014, 102).

Tukiseinää voidaan pitää työnaikaisena, mikäli sen suunniteltu käyttöikä on alle tai yhtä suuri kuin 2 vuotta. Käyttöältään pidempiaikaiset tukiseinät luokitellaan pysyviksi rakenteiksi. (RIL 271-2019, 13.)

3.2.5 Kuormakerroin K_{FI}

Rakenteen vaurion tai vian seuraamusten luotettavuus määritetään Eurokoodin mukaisesti seuraamusluokkien (CC) avulla. Kaivannot luokitellaan kolmeen seuraamusluokkaan (CC1-CC3), jotka vastaavat luotettavuusluokituksen (RC1-RC3) vastaavia luokkia. Kuormakerroin määräytyy luotettavuusluokituksen perusteella. Kaivantosuunnittelussa kaivannot luokitellaan aina vähintään luotettavuusluokkaan RC2, jossa $K_{FI} = 1,0$, ja luokkaan RC3, jossa $K_{FI} = 1,1$. (RIL 263-2014, 100.)

Taulukko 6. Seuraamusluokkien määrittely standardin SFS-EN-1990-1 mukaan.

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.

3.3 Käyttörajatilamitoitus

Käyttörajatiloina katsotaan tilanteet, joissa rakenteen tai rakenneosien normaali toiminta häiriintyy. Tilanteet haittaavat ihmisten mukavuutta tai heikentävät rakenteen ulkonäköä, mutta niistä ei ole haittaa rakenteen välittömälle turvallisuudelle. Standardin SFS-EN 1990 A1+AC mukaan tällaisia käyttörajatiloina ovat

- siirtymät, jotka vaikuttavat rakenteen ulkonäköön tai toimivuuteen
- värähtely, joka saa tuntemaan ihmisten olon epämukavaksi
- vauriot, jotka vaikuttavat rakenteen säilyvyyteen.

Tavanomaisten teräsrakenteiden käyttörajatiloina tulevat kyseeseen lähinnä taipumien ja siirtymien rajatilat. Teräsrakenteet ja niiden osat tulee mitoittaa siten, että taipumat ovat niissä tarkoituksenmukaisissa rajoissa.

(Teräsrakenneyhdistys 2014, 34.)

Teräsrakenteiden käytännön suunnittelussa tulee yleensä kysymykseen vain taipumarajatila. Taipumat lasketaan ottaen huomioon kaikki toisen kertaluvun vaikutukset, osittain jäykkien liitosten kiertymisjäykkyys sekä plastisten muodonmuutosten esiintymisen mahdollisuus käyttörajatilassa.

(Teräsrakenneyhdistys 2014, 34.)

Tukiseinän siirtymää aiheuttaa maanpaineesta johtuva teräksen taipuma ja esim. ankkurien venymä. Nämä voivat aiheuttaa tukiseinässä liikkeitä ja ne voivat näkyä tukiseinän taustan painumana.

3.4 Onnettomuusrajatilamitoitus

Onnettomuusmitoitustilanteeksi katsotaan tilanne, jossa rakenteeseen kohdistuu poikkeuksellinen olosuhde. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi tulipalo, räjähdys, törmäys tai paikallisen vaurion seuraus. (SFS-EN 1990-1, 52.)

Tukisevien rakenteellisessa mitoituksessa tulee varmistaa, että yhden tukirakenteen pettäessä ei synny ketjureaktiota, jossa muut tukirakenteet pettäisivät vuorollaan kuormituksen siirtyessä viereisille tukirakenteille. Yhden tukirakenteen pettäminen lisää muille tukirakenteille kohdistuvaa kuormitusta. (RIL 271-2019, 14.)

Kuormitustilanteessa, jossa yksi ankkuri tai tukirakenne pettää tulee ominaiskuormilla laskettu varmuus myötäämistä vasten olla vähintään 1,1. Jatkuvan sortuman tarkastelu tulee tehdä jokaisen rakenneosan kriittisessä kohdassa tai mitoitustapauksessa. (RIL 271-2019, 14.)

4 Settiseinään kohdistuvat kuormat

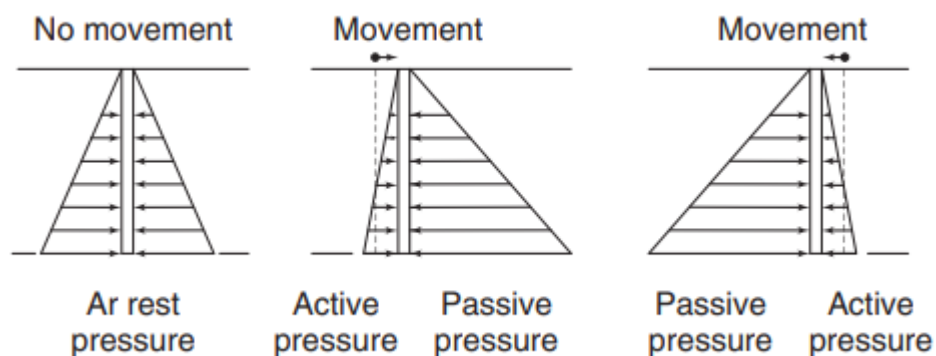
Tukiseinän mitoituksessa on otettava huomioon kaikki kaivantoon ja tukiseiniin vaikuttavat kuormat, joita ovat pääsääntöisesti maanpaine, vedenpaine ja maanpinnalla vaikuttavat pintakuormat. (RIL 263-2014, 79.)

Pintakuormia ovat yleensä liikenne- ja työkonekuormat. Näiden lisäksi on huomioitava myös mahdolliset kaivannon reunalle läjitetyt kaivumaat. (RIL 263-2014, 91.) Laskennoissa käytetään yleensä laajaa 10 kPa:n pintakuormaa tai rajatulla alueella vaikuttavaa 20 kPa:n suuruista kuormaa.

Settiseinän mitoituksessa ei yleensä tarvitse huomioida vedenpaineen aiheuttamaa kuormaa, sillä settiseinä ei ole vedenpitävä ja sitä ei tulisi toteuttaa pohjaveden pinnan alapuolella. Pohjaveden pinnan taso on alennettava ennen kaivuutyön aloitusta, kun tukiseinäksi on valittu settiseinä.

4.1 Pystytukiin vaikuttava maanpaine

Maanpaineella tarkoitetaan maamassasta tai ulkoisesta kuormituksesta aiheutuvaa kosketuspainetta, joka kohdistuu pystysuoriin tai kalteviin seinämiin ja rakenteisiin. Maanpaineen suuruus on riippuvainen tukiseinän liikkeistä. Tukiseinän liikkuvuuden tai liikkumattomuuden perusteella maanpaine jaetaan lepo-, aktiivi- ja passiivipaineeseen. (Jääskeläinen 2012, 172.) Kuvassa 3 on esitetty maanpaineen suuruuden vaihtelu tukiseinän liikkeiden mukaan.



Kuva 3. Maanpaine on riippuvainen tukiseinän liikkeistä (Briaud 2013, 716).

Tukiseinän takana olevassa maamassassa ei tapahdu liikkeitä seinän ollessa täysin liikkumaton. Maan laadusta ja lujuudesta riippuen maassa vallitsee jokin tietty vaakajännitys. Tukiseinään kohdistuvaa jännitystä kutsutaan lepopaineeksi, kun tukiseinä on täysin liikkumaton. (Jääskeläinen 2012, 172.)

Lepopainetta laskettaessa ensin on määritettävä maanpinnan alapuolella tietyllä syvyydellä vaikuttava pystyjännitys. Samassa syvyydessä vaikuttava vaakajännitys lasketaan kertomalla pystyjännitys lepopainekertoimella K_0 . Maanpinnan alapuolella tietyllä syvyydellä vallitseva lepopaine lasketaan kaavalla 4 seuraavasti:

$$P_0 = K_0 \cdot (\gamma \cdot z + q) \quad (4),$$

jossa

K_0	lepopainekerroin
γ	maan tilavuuspaino
z	maakerroksen paksuus
q	pintakuorma

Lepopainekertoimen K_0 suuruus lasketaan kaavalla 5 seuraavasti:

$$K_0 = 1 - \sin\varphi \quad (5),$$

jossa

φ	maan leikkauskestävyyskulma
-----------	-----------------------------

On huomioitava, että saven leikkauskestävyyskulman φ arvona käytetään tyypillisesti arvoa 0° , jolloin lepopainekerroin K_0 saa arvon 1.

Pitkäaikaistilanteissa saven oletetaan nojaavan seinään kuin neste ja samassa syvyydessä vallitsevien pysty- ja vaakajännityksen oletetaan olevan samansuuruiset. (Jääskeläinen 2012, 174.)

Tukiseinän siirtymä on edellytys aktiivi- ja passiivipaineen muodostumiselle. Seinän siirtymän seurauksena maan leikkauslujuus tai kitka pyrkii vastustamaan maamassan muodonmuutosta. Seinän myötäessä seinään

kohdistuvan paineen suuruus pienenee ja myötäämisen jatkuessa maa joutuu murtotilaan, jonka seurauksena paine muuttuu vakioksi. Tätä painetta kutsutaan aktiivipaineeksi. Seinän työntyminen maata vastaan taas kasvattaa painetta. Kun paine nousee lepopainetta suuremmaksi, maamassa joutuu murtoon ja alkaa kohota seinämän takana. Tätä painetta kutsutaan passiivipaineeksi. (Jääskeläinen 2012, 174.)

Aktiivisen ja passiivisen paineen määrittäminen perustuu maan murtotilaan. Aktiivi- ja passiivipaine ovat murtotilapaineita ja ne lasketaan murtotilatarkastelujen avulla eli ts. Rankine'n menetelmällä. Aktiivinen maapaine lasketaan kaavalla 6 seuraavasti:

$$P_a = K_a \cdot (\gamma \cdot z + q) \quad (6),$$

Passiivinen maapaine lasketaan kaavalla 7 seuraavasti:

$$P_p = K_p \cdot (\gamma \cdot h + q) \quad (7),$$

Kaavoissa ovat

γ	maan tilavuuspaino
h	maakerroksen paksuus
K_a	aktiivipainekerroin
K_p	passiivipainekerroin

Standardin SFS-EN 1997-1 liitteessä C on esitetty suositeltavat maapainekertoimet K_a ja K_p . Eurokoodin maapainekertoimet poikkeavat Coulombin teorian mukaisista arvoista. Eurokoodin arvoja voidaan pitää todenmukaisempina, sillä ne eivät liioittele passiivipainetta suurilla kitkakulman ja seinäkitkan arvoilla, kuten Coulombin teoria tekee. (RIL 263-2014, 81.)

4.2 Pystytukien välissä vaikuttava maapaine

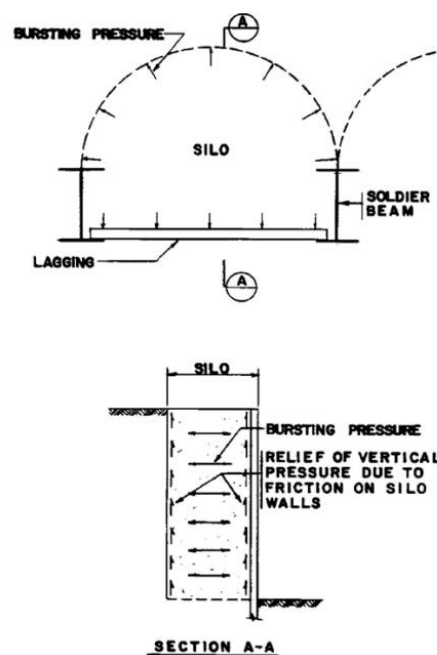
Settiseinään kohdistuvan maapaineen määrittämiseksi on kehitetty aikojen saatossa useita menetelmiä. Lepopaine määritetään kimmoteorian pohjalta tai

kokeellisesti. Aktiivi- ja passiivipaine määritetään maan murtotilatarkastelujen avulla.

Yhdysvaltalainen tekniikan tohtori Howard Perko on kirjoittanut tutkimuksen settiseinän pystytukien välissä vaikuttavasta maanpaineesta. Tutkimuksessa hän esittää yksinkertaisen teoreettisen mallin vaakasuuntaisten maanpaineiden määrittämiseksi. Malli perustuu kolmiulotteiseen ”siilo” muotoiseen liukupinta-analyysiin.

Jäykissä tukiseinissä maanpaineen oletetaan yleensä olevan vakio koko seinän pituudelta. Settiseinissä pystytukien väliin asennettava settilankku on yleensä merkittävästi taipuisampi kuin teräksiset pystytuet. Settilankun taipuessa maamassalla on taipumus holvaantua jäykempien rakenneosien kanssa. Tämän niin kutsutun holvaantumislmiön seurauksena teräslevylle kohdistuu vähemmän maanpainetta.

Paalujen välissä tapahtuvan maan holvaantumisen vuoksi kitka ja koheesio ns. siilon sivuilla vastustavat maamassan liukumista ja vähentävät siten settilankkuun kohdistuvaa maanpainetta. (Perko 2008, 46.) Kuvassa 4 on esitetty maamassan holvaantumisen seurauksena tapahtuva siilopaineilmiö.



Kuva 4. Maamassan holvaantumisen seurauksena tapahtuva siilopaineilmiö (Perko 2008, 46).

Kuvassa 5 on esitetty maamassan holvaantumisen settiseinän pystytuille.



Kuva 5. Esimerkki maamassan holvaantumisesta settiseinän takana (Perko 2008, 53).

Käytännön kokemus on osoittanut, että maanpaine lähestyy vakiota tietyssä syvyydessä useimmissa maaperäolosuhteissa. Syvemmissä kaivannoissa ei yleensä käytetä paksumpaa settilankkua vaan pikemminkin suurempia pystytukia kestämään suurempaa maanpainetta. (Perko 2008, 51.)

Perkon esittämän matemaattisen mallin avulla voidaan määrittää syvyys, jossa maanpaine muuttuu vakioksi. Tukiseinään kohdistuvan maksimiaktiivimaanpaineen syvyys voidaan laskea kaavalla 8 seuraavasti:

$$D_{max} = 1,4 \cdot l \quad (8),$$

jossa

l settilankun leveys

Settilankkuun kohdistuvan maksimiaktiivimaanpaineen suuruus pintakuorma huomioiden voidaan laskea kaavalla 9 seuraavasti:

$$P_{max} = K_a \cdot (w + 1,2 \cdot l \cdot \gamma) \quad (9),$$

Maksimiaktiivimaanpaineen suuruus voidaan laskea ilman pintakuormaa kaavalla 10 seuraavasti:

$$P_{max} = 1,2 \cdot K_a \cdot l \cdot \gamma \quad (10),$$

Kaavoissa ovat

w	tasaisesti jakautunut pintakuorma
γ	maan tilavuuspaino
l	settilankun leveys
K_a	aktiivipainekerroin

Mallia voidaan käyttää tarvittavan levypaksuuden määrittämiseen monille maaperäsuhteille ja kuormitustapauksille. On huomioitava, että malli on tarkoitettu sille oletukselle, että settilankku on taipuisampaa kuin pystypalkit. Tämän vuoksi settilankkujen tai pellin taipuma tulee tarkastaa. Rakenne on todennäköisesti mitoitettava kestämään maanpaineen aiheuttama kuormitus kokonaisuudessaan, kun settilankkuina käytetään esimerkiksi jäykkiä betonielementtejä. (Perko 2008, 51, 52.)

5 Rakenneosien mitoitus ja suunnittelu

Porapaalusetteisien rakenne koostuu pystytukina käytettävistä porapaaluista ja pystytukien väliin hitsattavista teräslevyistä. Porapaalusetteisien vaakatuennassa voidaan käyttää poikkitukia, juoksupalkkia sekä ankkurointia.

Settiseinään kohdistuvien voimien ominaiskuormat saadaan mallintamalla vastaavanlainen tukiseinä esim. GeoCalc-laskentaohjelmalla. Kuormien ominaisarvot käsitellään murtorajatilamitoituksen mukaisilla osavarmuuksilla (RIL 271-2019, 10).

5.1 Settiseinän pystyputken mitoitus

Settiseinän pystyrakenne mitoitetaan tuettuina palkkeina, joita kuormittaa maanpaine ja mahdolliset ankkurivoimat. Mitoituksessa tulee tarkastella myös muilta rakenneosilta tulevat kuormitukset. Tukiseinän pystyrakenne mitoitetaan palkkirakenteena, johon kohdistuu taivutus-, leikkaus- ja puristusrasitusta. Mitoituksessa on myös tarkistettava yhdistetyn taivutuksen ja leikkauksen vaikutus. (RIL 271-2019, 69.)

Teräksisten rakenneosien mitoitus aloitetaan määrittämällä poikkileikkauksen poikkileikkausluokka. Poikkileikkausluokituksen tarkoituksena on tunnistaa, kuinka poikkileikkauksen paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkauksen kiertymiskykyä ja kestävyyttä. Poikkileikkausluokat jaetaan ominaisuuksiltaan neljään ryhmään seuraavasti: PLL1, PPL2, PLL3 ja PLL4. (RIL 271-2019, 20–21.)

Putken taivutuskestävyys on tyypillisesti mitoitusehdoista määräävin ja sen leikkauskestävyys tulee harvoin mitoitusehdoista määrääväksi. Tässä työssä käsitellään teräsrakenteisen settiseinän mitoitusta yksinkertaistetulla periaatetasolla, jonka vuoksi seuraavaksi on käsitelty putken mitoitusta vain sen taivutuskestävyyden kannalta. Käytännön suunnittelussa putken kestävyys on

kuitenkin tarkistettava kaikille vaadituille mitoitus ehdoille ja kuormien yhdistelmille.

Mitoituksessa on huomioitava, että jos leikkausvoiman mitoitusarvon V_{Ed} on vähemmän kuin 50 % plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyyden mitoitusarvosta $V_{pl,Rd}$, ei taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutusta tarvitse tarkastaa. (RIL 271-2019, 33–34.)

Putkeen kohdistuva maanpaineesta aiheutuva taivutusmomentti on yleensä mitoitus ehdoista määräävin. Putken mitoituksessa on tarkistettava, että maanpaineesta aiheutuva taivutusmomentti ei ylitä putken taivutusmomenttikestävyyttä. Putken taivutusmomenttikestävyys tarkistetaan kaavan 11 mukaisella mitoitus ehdolla:

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \quad (11),$$

jossa

M_{Ed}	taivutusmomentin mitoitusarvo
$M_{c,Rd}$	taivutuskestävyyden mitoitusarvo

Putken poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvon $M_{c,Rd}$ määrittäminen riippuu sen poikkileikkausluokasta. Poikkileikkausluokkien 1 ja 2 taivutuskestävyys lasketaan kaavalla 12 seuraavasti:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (12),$$

Poikkileikkausluokan 3 taivutuskestävyys lasketaan kaavalla 13 seuraavasti:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (13),$$

Kaavoissa ovat

W_{pl}	putken plastinen taivutusvastus
W_{el}	putken elastinen taivutusvastus
f_y	teräksen myötöraja

γ_{M0} teräksen osavarmuusluku $\gamma_{M0} = 1,0$

Mitoituksessa on otettava huomioon täyttääkö poikkileikkaus plastisen nivelen ja/tai kierron ehtoja. Plastista taivutusvastusta voidaan käyttää vain, jos plastinen nivel voi muodostua ja tehdään plastisuusteorian mukaiset kokonaistarkastelut. (RIL 271-2019, 21.)

Jos plastinen taivutusvastus haluttaisiin ottaa huomioon, tulisi plastisuus huomioida myös mm. Geocalc-laskelmassa, joka ei tällä hetkellä ole laskentaohjelmassa mahdollista. Tämän vuoksi laskennassa on perustellumpaa käyttää elastista taivutusvastusta poikkileikkausluokille 1, 2 ja 3.

5.2 Settilankkuna toimivan teräslevyn mitoitus

Settilankut mitoitetaan pääosin taivutus- ja leikkausrasitettuna yksittäisinä palkkeina (RIL 271-2019, 70).

Teräslevyn taivutuskestävyys lasketaan samalla kaavalla kuin putken taivutuskestävyys ja tarkistetaan samalla mitoitusehdolla kuin putken taivutuskestävyys. Levyn taivutusvastus lasketaan kaavalla 14 seuraavasti (Pennala 1998, 61.):

$$W_{plate} = \frac{h \cdot t^2}{6} \quad (14),$$

jossa

h levyn korkeus

t levyn paksuus

Settilankkuihin kohdistuu luvussa 4.2 käsitellyn maanpaineen aiheuttama kuormitus edellyttäen sitä, että settilankku on taipuisampaa kuin settiseinän pystytuet. Teräslevyyn kohdistuva taivutusmomentti lasketaan kaavalla 15 seuraavasti (Pennala 1998, 107.):

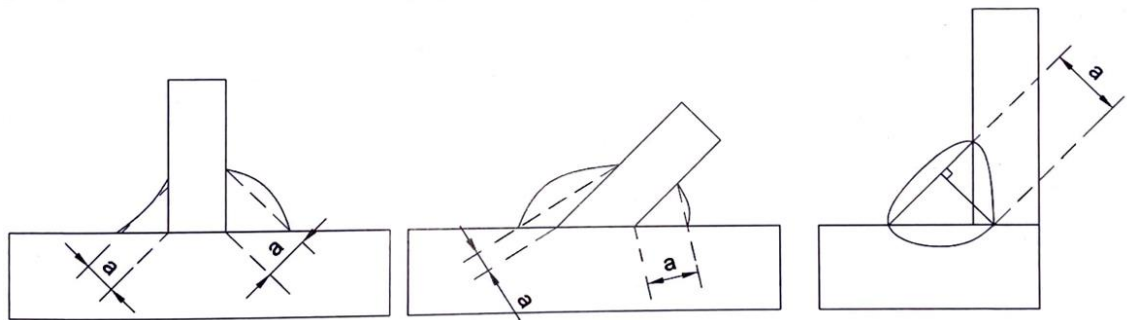
$$M_{Ed} = \frac{q \cdot b^2}{8} \quad (15),$$

jossa

q	maanpaineen mitoitusarvo
b	levyn leveys

5.3 Settilankun hitsaus

Paaluputken ja settilankun hitsisaumaan kohdistuu luvussa 4.2 esitetyn maanpaineen aiheuttama leikkausvoima. Hitsausliitoksissa käytetään yleisesti SFS-EN 1993-1-8 mukaisia hitsilajeja. Yleisimmin käytössä on pienahitsi, jossa liitoksen kannalta oleellinen on pienahitsin a -mitta.



Kuva 6. Pienahitsin a -mitta (RIL 271-2019, 29).

Pienahitsin efektiiviseksi a -mitta on aina vähintään 3 mm. Pienahitsiä ei voida pitää voimia siirtävänä, mikäli pienahitsin pituus on alle 30 mm tai alle 6 kertaa a -mitta. (RIL 271-2019, 29.) Hitsin kestävyys tarkastetaan kaavan 16 mukaisella mitoitus ehdolla seuraavasti (RIL 271-2019, 30):

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (16),$$

jossa

$F_{w,Rd}$	hitsin kestävyuden mitoitusarvo pituusyksikköä kohden
$F_{w,Ed}$	hitsiin vaikuttavan voiman mitoitusarvo

Pienahitsin kestävyys voidaan määrittää yksinkertaistetulla menetelmällä kaavan 17 mukaisesti (RIL 271-2019, 29):

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \quad (17),$$

jossa

$f_{vw,d}$	hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo
f_u	heikomman lujuusluokan teräksen vetomurtokestävyys
β_w	korrelaatiokerroin teräslajin perusteella
γ_{M2}	teräksen osavarmuusluku $\gamma_{M2} = 1,25$

Hitsin kestävyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohden lasketaan kaavalla 18 seuraavasti (RIL 271-2019, 30):

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \cdot L \quad (18),$$

jossa

a	hitsin a-mitta
L	hitsin pituus

5.4 Settiseinän vaakatuenta

Settiseinä voidaan tukea vaakakuormia vastaan kaivannon ulkopuolisin vetoankkurein tai kaivannon sisäpuolisin puristusrakentein tai näiden yhdistelmällä. Tukiseinän sisäpuolisessa tuennassa voidaan käyttää monia periaateratkaisuja. (RIL 263-2014, 59.)

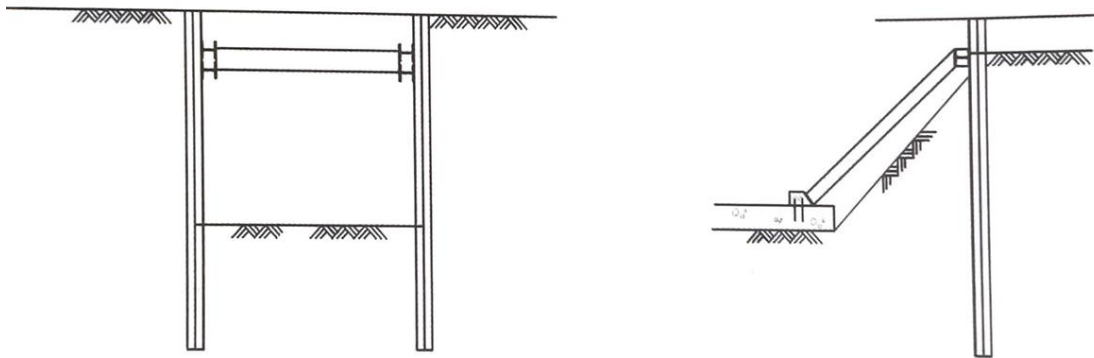
5.4.1 Juoksupalkki

Ulkopuolisessa tuennassa käytetään juoksupalkkia. Juoksupalkit asennetaan yleensä kohtisuoraan tukiseinää vasten siten, että palkin vahvempi suunta on kohtisuoraan vaikuttavaa maanpainetta vasten. Tukiseinän juoksupalkkirakenteina käytetään yleensä HEB-palkkeja, mutta rakenteessa voidaan käyttää myös I-teräspalkkeja ja U-profiileja. (RIL 271-2019, 75.)

Juoksupalkki mitoitetaan palkkirakenteena, johon kohdistuu maanpaineen vaikutuksesta aiheutuvaa taivutusmomenttia ja leikkausvoimaa (RIL 271-2019, 75). Juoksupalkin mitoitusehdot tulee tarkistaa taivutukselle, leikkaukselle, yhdistetylle taivutukselle ja leikkaukselle sekä nurjahdukselle.

5.4.2 Poikkituki

Tukiseinät voidaan tukea vastakkain tai kaivannon sisäpuoliseen rakenteeseen puristussauvoin. Poikkitukia käytetään yleensä HEB-teräspalkkia, mutta leveämmissä kaivannoissa voidaan käyttää teräsputkea. (RIL 263-2014, 62–63.) Kuvassa 7 on esitetty esimerkkejä tukiseinän vastakkaintuennasta ja tuennasta kaivannon sisäpuoliseen rakenteeseen.



A) vastakkaintuenta

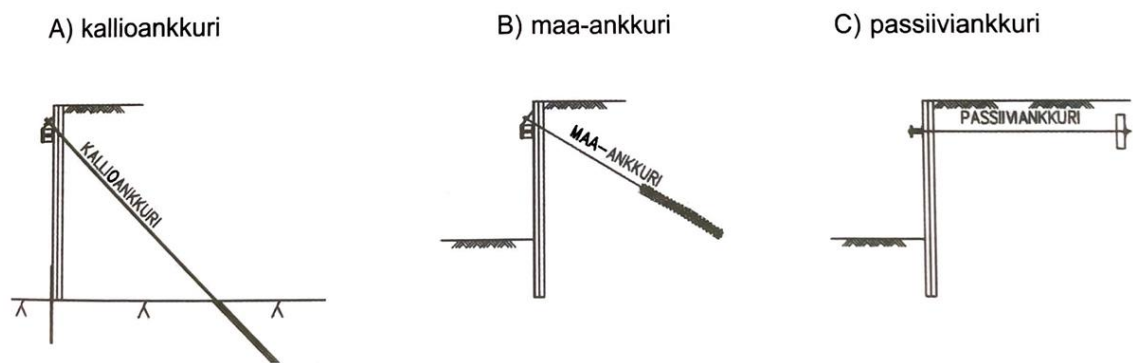
B) tuenta kaivannon sisäpuoliseen rakenteeseen

Kuva 7. Tukiseinän vastakkaintuenta ja tuenta kaivannon sisäpuoliseen rakenteeseen (RIL 263-2014, 60).

Poikkituki tulee mitoitaa puristettuna ja taivutettuna rakenteena. Poikkituen mitoitusehdot tulee tarkistaa taivutukselle, nurjahdukselle ja yhdistetyssä taivutuksessa ja puristuksessa. (RIL 271-2019, 83.)

5.4.3 Ankkurointi

Tukiseinä voidaan ankkuroida ulkopuolisin vetoankkurein. Ankkurityypit voidaan erotella ankkurointitavan mukaan. Kallioankkuri ankkuroidaan kallioon ja maa-ankkuri ankkuroidaan tiiviiseen kitkamaakerrokseen. Ankkuroinnissa voidaan käyttää myös passiiviankkuria, joka ankkuroidaan ankkuripontteihin tai ankkurilaattaan. (RIL 263-2014, 61.) Kuvassa 8 on esitetty ankkurityypit niiden ankkurointitavan mukaan.



Kuva 8. Ankkurityypit ankkurointitavan mukaan (RIL 263-2014, 59).

Kallioankkuri ankkuroidaan yleensä kaltevuuskulmassa 45° . Ankkurin alapää injektoidaan sementtillaastilla tartuntapituuden verran kiinni kallioreikään. Maa-ankkurin kaltevuuskulma voi olla 45° tai loivempi edellyttäen sitä, että ankkuri saavuttaa ankkuroitumiseen soveltuvan tiiviin kitkamaakerroksen. (RIL 263-2014, 61.)

Ankkurit tulee mitoittaa siten, että ankkuri kestää siihen kohdistuvan kuormituksen rakentamisen aikana ja itse ankkurin testaamisen. Ankkurilta vaadittu koevetovoima lasketaan käsittelemällä tukiseinälaskennasta saatu ankkurin mitoitusarvo ankkureiden osavarmuusluvulla. Maa- ja kallioankkurille osavarmuusluku on työnaikaiselle ankkurille $\gamma_{a,t} = 1,25$ ja pysyväälle ankkurille $\gamma_{a,p} = 1,5$.

6 Kaivantoesimerkit

Porapaalusettiseinä on osoittautunut tehokkaaksi ratkaisuksi monissa erilaissa kaivannoissa. Porapaalusettiseinän käytössä saattaa kuitenkin kohdata haasteita esim. porapaalujen ja kallioankkureiden asentamisessa. Tässä osiossa tarkastellaan kolmea erilaista rakennuskohdetta, joissa porapaalusettiseinää on käytetty kaivannon tuennassa.

6.1 Vaskiluodon voimalaitos, Vaasa

Porapaalusettiseinät toteutettiin vuonna 2019 ja vuonna 2023 Vaasan Vaskiluodon voimalaitoksella toteutettujen kaivantojen yhteydessä.

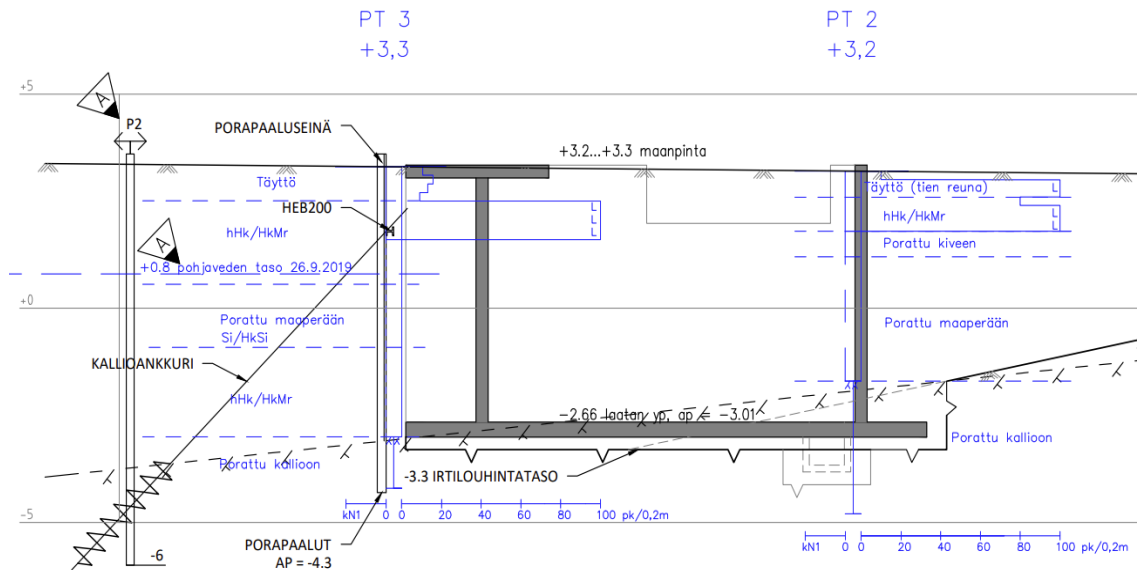
Vuoden 2019 kaivanto tehtiin rakennuksen pumppaamotilan kellaritilan rakentamista varten. Tuolloin n. kuusi metriä syvä kaivanto tuettiin porapaalusettiseinällä, jonka vaakatuennassa käytettiin juoksupalkkia ja kallioankkureita. Rakentamisen valmistuttua porapaalusettiseinä jätettiin osittain maahan.

Vuonna 2023 alueelle tehtiin n. kuusi metriä syvä putkikaivanto, jossa kaivanto tuettiin myös työnaikaisella porapaalusettiseinällä. Tämän settiseinän vaakatuennassa käytettiin tukikehikkoa, joka koostui juoksupalkeista ja poikkituista.

Putkikaivannon tukiseinäksi valittiin molemmissa tapauksissa porapaalusettiseinä. Tukiseinätyypin valinnassa otettiin huomioon maaperäolosuhteiden lisäksi rakentamiskustannukset. Kaivannon alueella kallionpinta sijaitsee lähellä, jonka vuoksi settiseinän pystyrakenteeksi valittiin porapaalut. Teräsponsittiseinän asentaminen olisi vaatinut juuritapin asentamista, joka olisi aiheuttanut lisäkustannuksia. Maaperä sisältää myös lohkareita, jotka olisi vaikeuttaneet teräsponsittien asentamista ja H-palkkien käyttämistä settiseinän pystytukina.

6.1.1 Pohjaolosuhteet

Pohjatutkimuksina alueella tehtiin painokairauksia, porakonekairauksia sekä näytteenotto. Näytteistä tutkittiin maalaji, vesipitoisuus ja rakeisuus. Kuvassa 9 on esitetty porapaalusetteisinen ja pohjatutkimusten sijainti leikkauksessa, sekä arvioidut maakerrosrajat Vaasan kaivannosta.



Kuva 9. Rakennusalueen pohjaolosuhteet Vaasan kaivannosta.

Pohjatutkimusten perusteella alueella on karkearakeista täyttöä, jonka alapuolella havaittiin karkearakeista hiekkaa ja/tai hiekkamoreenia. Näiden kitkamaakerrosten alla on kallio. Pohjavedenpinta mitattiin noin kolmen metrin syvyydelle nykyisestä maanpinnasta.

6.1.2 Työn toteutus

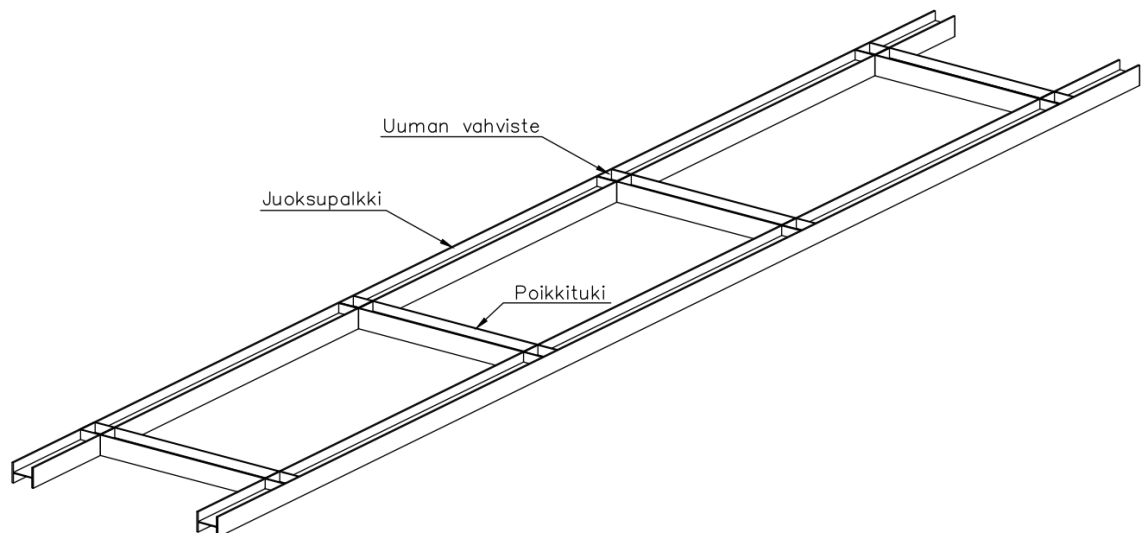
Ennen kaivutöiden aloitusta kaivannon alueella tehtiin työnaikainen pohjavedenpinnan alennus. Pohjavedenpinnan alennus aloitettiin noin 30 päivää ennen kaivutyön aloitusta. Pohjavedenpinta alennettiin kaivutason alapuolelle tyhjiömenetelmällä eli imupillejä käyttäen. Pohjaveden alennusputket sijoitettiin kaivantojen reunoille. Putket porattiin kalliioon ja

putkien siiviläosa sijoitettiin poratun reiän pohjalle kallio- ja maaosaan. Pohjavedenpinnan alenemista seurattiin pohjaveden alennusputkista. Pohjaveden seurannalla varmistutaan pumpun kapasiteetin riittävydestä sekä putken siiviläosan mahdollisesta tukkeutumisesta.

Porapaalusetettiseinien pystytukina käytettiin SSAB:n valmistamia porapaaluja 170/12.5 S550J2H. Porapaalujen asennusväli oli 1,2 metriä. Porapaalutuksesta pidettiin pöytäkirjaa, johon kirjattiin tiedot poraussyvyydestä, kallionpinnan tasosta ja kallion laadusta.

Vuoden 2019 porapaalusetettiseinässä käytettiin settilankkuina 6 mm paksuja teräslevyjä. Vuoden 2023 porapaalusetettiseinässä käytettiin 8 mm ja 11 mm paksuja teräslevyjä. Teräslevyt hitsattiin kiinni porapaaluihin.

Vuoden 2019 porapaalusetettiseinän vaakatuennassa käytettiin juoksupalkkia HEB200 S355J2 ja kallioankkureita. Vuoden 2023 kaivannon porapaalusetettiseinän vaakatuennassa käytettiin tukikehikkoa, joka koostui sisäpuolisista poikkituista ja juoksupalkeista HEB360 S355J2. Kuvassa 10 on esitetty havainnollistava kuva tukikehikosta, joka koostuu poikkituista ja juoksupalkeista.



Kuva 10. Porapaalusetettiseinän tukikehikko.

Tukikehikko rakennettiin maanpinnalle ennen porapaalutuksen ja kaivun aloitusta. Porapaalujen asentamisen jälkeen kaivun edessä tukikehikkoa laskettiin alaspäin, kunnes kehikko saavutti suunnitelmassa osoitetun tukitason. Tämän jälkeen kehikko hitsattiin kiinni porapaaluihin.

Vaiheittaisen kaivun edessä porapaalujen väliin hitsattiin teräslevy ja levyjen taakse jäävä tila täytettiin murskeella. Pohjaveden alennus voitiin lopettaa, kun rakennetun kaivannon täyttö oli tehty tukitasoon saakka.

Kuvassa 11 on esitetty valmis porapaalusetteisinä voimalaitoksen alueella vuonna 2023.



Kuva 11. Vaskiluodon voimalaitokselle rakennettu porapaalusetteisinä vuonna 2023.

6.2 Högdalen, Tukholma

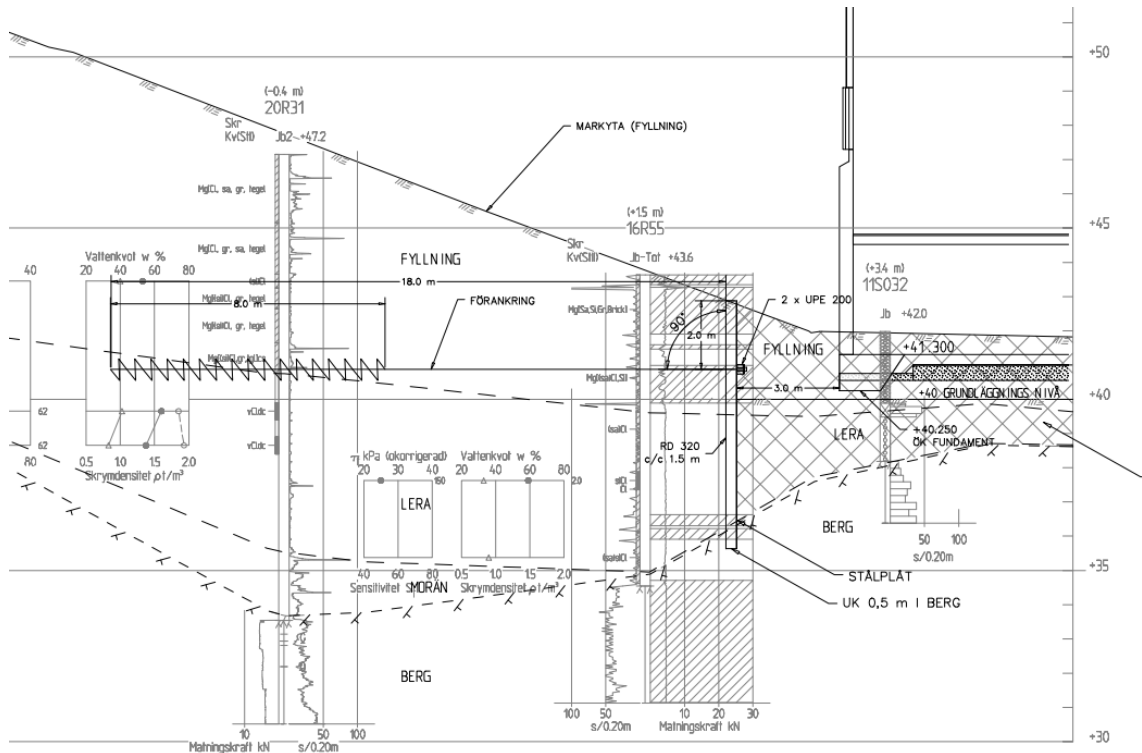
Vuonna 2021 Ruotsissa toteutettiin kaivanto, jossa käytettiin ankkuroitua porapaalusettiseinää työnaikaisen kaivannon tuennassa. Tukiseinäksi valittiin porapaalusettiseinä, sillä alueen maaperä sisälsi suuria lohkkareita ja kiviä. Porapaalusettiseinä oli kustannustehokkaampi vaihtoehto porapaaluseinään verrattuna. Näiden lisäksi kallion ja paalun välinen rako jää erittäin pieneksi porapaalusettiseinän asennuksessa. Kuvassa 12 on esitetty lähes valmis porapaalusettiseinä vuonna 2021.



Kuva 12. Työnaikaisen kaivannon tuennassa käytetty porapaalusettiseinä vuonna 2021.

6.2.1 Pohjaolosuhteet

Alueella tehtiin laajat pohjatutkimukset, jotka koostuivat muun muassa porakonekairauksista, painokairauksista, näytteenotoista ja laboratoriotutkimuksista sekä pohjavedenpinnan mittauksista. Pohjatutkimukset osoittautuivat riittäviksi ja luotettaviksi ja olosuhteet vastasivat oletettuja. Kuvassa 13 on esitetty Tukholman kaivannon porapaalusettiseinän ja pohjatutkimusten sijainti leikkauksessa, sekä arvioidut maakerrosrajat.



Kuva 13. Tukholman kaivannon pohjaolosuhteet.

Alueen maaperän pintakerros oli täyttömaata, jonka alapuolella on lohkaraita sisältävää savea. Aluetta oli käytetty aiemmin sekalaisen murskeen ja louheen läjitykseen. Pohjaveden taso oli alhaalla, joten kaivanto pystyttiin tekemään kuivana ja ilman pohjaveden alennusta.

Kuvassa 14 on esitetty suuri lohkarai, joka pystyttiin ohittamaan porapaalujen väliin asennettujen teräslevyjen avulla. Suuret lohkarait olisivat haitanneet teräsponttiseinän asennusta. Lohkarait olisivat myös haitanneet H-palkkien asennusta, mikäli palkkeja olisi käytetty settiseinän pystytukina.



Kuva 14. Suuri lohkare porapaalujen välissä.

6.2.2 Työn toteutus

Porapaalusetiseinän pystytukina käytettiin SSAB:n valmistamia porapaaluja RD320/12.5 S550J2H. Kohdissa, joissa kaivanto oli yli seitsemän metriä syvä, porapaalujen sisälle asennettiin HEB180 S355J2 -palkki. Porapaalut asennettiin 1,5 metrin välein ja betonoitiin sisältä. Porapaalusetiseinän vaakatuentana käytettiin kahta juoksupalkkia UPE200 S355J2 ja maa-ankkureita. Settilankkuina käytettiin 8 mm paksuja teräslevyjä, jotka hitsattiin kiinni porapaaluihin.

Porapaalusetiseinän pystytuet porattiin kallioon ennen kaivuutyön aloitusta. Porapaalujen avulla pystytettiin läpäisemään louhetta ja porapaalujen alapäät saatiin porattua kallioon. Porapaalujen asentamisessa ei ilmentynyt ongelmia. Kuvassa 15 on esitetty maahan asennetut porapaalut ennen kaivuutyön aloitusta.



Kuva 15. Porapaalusetteisän porapaalut asennettuna.

Kuvassa 16 on esitetty lohkareita, jotka on ohitettu porapaalujen ja teräslevyjen avulla.



Kuva 16. Lohkareita, jotka on ohitettu poropaalujen ja teräslevyjen avulla.

Poropaalusetteisien vaakatuennassa käytettiin maa-ankkureita. Rakentamisen alussa muutaman maa-ankkurin juotosmassan lujittumisnopeudessa ilmeni ongelmia. Juotosmassan lujittuminen todennäköisesti hidastui kylmän vuodenajan vuoksi. Nämä ankkurit korvattiin ankkureilla, joiden juotospituus oli pidempi. Tämä muutos ratkaisi ongelman ja projekti ei viivästynyt aikataulusta.

6.3 Rakennettu ympäristö, Turku

Vuonna 2016 Turussa toteutettiin kaivanto, jossa käytettiin poropaalusetteisiä kaivannon tukemisessa. Luiskatulle kaivannolle ei ollut tilaa tontilla, jonka vuoksi tukiseinän käyttö oli tarpeen. Kaivannon alue on tärinälle herkkää aluetta ja tämä tuli huomioida myös tukiseinän valinnassa.

Poropaalusetteinä osoittautui taloudellisesti kannattavammaksi vaihtoehdoksi verrattuna poropaaluseinään. Se tarjosi myös varmuuden kalliokontaktista

kivisessä maaperässä, toisin kuin teräspontti- tai perinteiset settiseinät, joissa käytettiin pystytukina H-palkkeja. Lisäksi porapaalusetseinän rakentaminen aiheuttaa vähemmän tärinää kuin muut tukiseinätyypit.

Kuvassa 17 on esitetty valmis ankkuroitu porapaalusetseinä, jonka edessä tehtiin louhintaa.

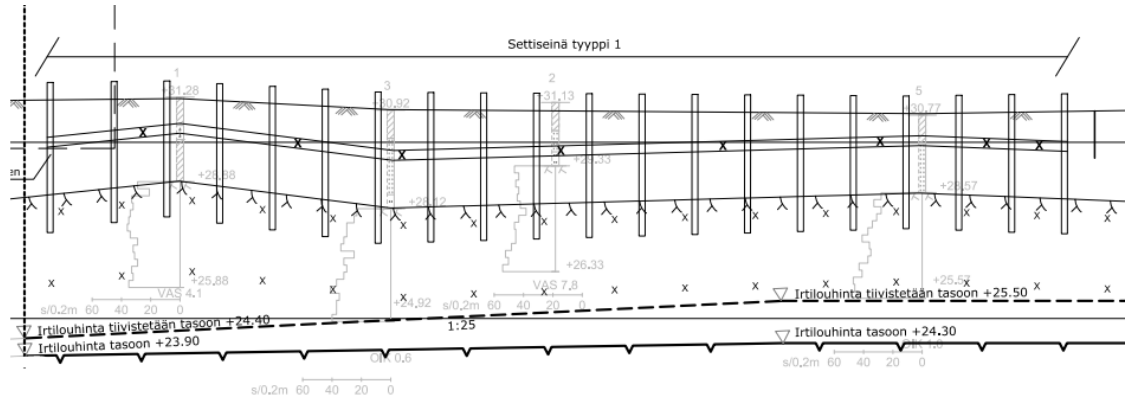


Kuva 17. Turussa toteutettu porapaalusetseinä.

6.3.1 Pohjaolosuhteet

Alueella suoritettiin pohjatutkimuksia, jotka sisälsivät koekuoppia, porakonekairauksia, painokairauksia ja heijarikairauksia. Tutkimusten tulokset olivat luotettavia tutkimuspisteiden osalta, mutta koekuoppien yhteydessä esiintyneet suuret kivet tulkittiin virheellisesti kallionpinnaksi. Lisäksi myöhemmin havaittiin, että maaperä oli kivisempää kuin alkuperäisissä tutkimuksissa oli päätelty. Tämän seurauksena tukiseinälinjaa jouduttiin siirtämään, jolloin aiemmat porakonekairaukset jäivät kauemmas uudesta

tukiseinälinjasta. Lopullinen tukiseinä oli siten paikoin matalampi ja paikoin korkeampi kuin alun perin oletettiin. Kuvassa 18 on esitetty Turun kaivannon porapaalusettiseinän ja pohjatutkimusten sijainti leikkauksessa sekä arvioidut maakerrosrajat.



Kuva 18. Rakennusalueen pohjaolosuhteet Turussa.

Maaperän kivisyys teki teräsponttiseinästä epäsuotuisan vaihtoehdon. Porapaalusettiseinän valintaan vaikutti myös se, että pohjavesi oli syvällä eikä sillä olisi ollut vaikutusta seinän vaatimuksiin. Maaperän kivisyyden vuoksi H-palkkien asentaminen olisi ollut hankalaa, joten settiseinän pystytuiksi valittiin porapaalut.

6.3.2 Työn toteutus

Porapaalusettiseinän pystytukina käytettiin SSAB:n valmistamia porapaaluja RD170/12.5 S440J2H, joiden asennusväli oli 1,5 metriä. Vaakatuentana käytettiin juoksupalkkeja HEB300B S355J2 ja kallioankkureita. Settilankkuina käytettiin teräslevyjä, joiden paksuus oli ankkuritason yläpuolella 5 mm ja alapuolella 7 mm.

Porapaalujen asentamisen jälkeen kävi ilmi, että kallio oli rikkonaisempaa kuin pohjatutkimusten perusteella oli arvioitu. Tämä aiheutti ongelmia porapaalujen kiinnittymisessä kallioon. Louhintatyön edetessä havaittiin, että louhinnan ryöstö oli suurempi, kuin oli oletettu eikä porapaalujen eteen jäänyt riittävästi

ehjää kalliota. Tämä vaikutti porapaalujen alapään vakauden ja tuen tarjoamiseen. Tämän vuoksi porapaalut jouduttiin korjaamaan pulttaamalla ne kiinni kallioon. Kuvassa 19 on esitetty porapaalu, joka vaati pultauksen kiinni kallioon.



Kuva 19. Porapaalu ei ole tarttunut kallioon, jonka vuoksi se on jouduttu pulttaamaan kallioon kiinni.

Vaikka korjaukset olivat tarpeen, porapaalusetteisinä osoittautui hyväksi vaihtoehdoksi kaivannon tukemiseen vuonna 2016. Tukiseinä oli kustannustehokas ja aiheutti vähemmän tärinää muihin tukiseiniin verrattuna. Se tarjosi tarvittavan tuen ahtaalla ja tärinäherkällä alueella.

7 Pohdinta

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella porapaalusettiseinän mitoitusperiaatteita ja niiden merkitystä rakenteen lujuuden ja kestävyuden kannalta. Työssä tarkasteltiin teräsrakenteisen tukiseinän mitoitusprosessia yksinkertaistetulla periaatetasolla. Lisäksi tarkasteltiin porapaalusettiseinän käytön haasteita ja hyötyjä esimerkkikaivantojen avulla.

Mitoitusprosessi aloitetaan määrittämällä suunnittelussa käytettävien maaparametrien ominaisarvot. Käytettävillä maaparametrien arvoilla on merkittävä vaikutus koko mitoitusprosessin osalta, sillä ne vaikuttavat muun muassa tukiseinään vaikuttavan kuorman tai kuormien arvoon. Väyläviraston taulukot antavat varovaiset arviot maaparametreista kairausvastuksen perusteella. Käytännön suunnittelussa luotettavien maaparametrien arvioimisessa on hyvä olla pohjalla myös kokemuseräistä tietoa.

Esimerkkikaivantojen avulla havaittiin, että porapaalusettiseinä soveltuu erilaisiin tilanteisiin, joissa kaivannon tukeminen on tarpeen. Havaittiin myös, että settiseinä kestää erilaisia kuormitustilanteita, kuten painetta, taipumista ja vääntömomenttia.

Toisaalta porapaalusettiseinän käytössä on myös haasteita. Esimerkiksi poraus- ja asennustyön vaatima aika ja kustannukset voivat olla merkittäviä tekijöitä rakennusprojektin kannalta. Lisäksi porapaalujen asentaminen oikeisiin paikkoihin edellyttää tarkkaa suunnittelua ja ammattitaitoista toteutusta. Virheellinen poraus tai asennus voi heikentää seinän lujuutta ja vaikuttaa koko rakenteen suorituskykyyn.

Esimerkkikaivantojen avulla huomattiin, että tukiseinän seurannalla voidaan ennaltaehkäistä mahdollisia onnettomuuksia. Tässä työssä tehdyt havainnot korostavat tukiseinän seurannan ja ylläpidon tärkeyttä.

On ollut mielenkiintoista huomata, että teräsrakenteisen tukiseinän siirtymät ovat tarkoituksenmukaisissa rajoissa myös toivottu ilmiö. Maamassan holvaantumisen ja holvaantumisilmiön seurauksena settiseinän rakenneosat

voidaan mitoittaa pienemmille kuormille. Tämä tarjoaa suunnittelijalle mahdollisuuden hyödyntää teräksisen tukiseinän joustavuutta ja sopeutuvuutta erilaisiin mitoitustilanteisiin.

On tärkeä huomioida paikalliset olosuhteet ja projektikohtaiset vaatimukset porapaalusetteisessä suunniteltaessa ja rakennettaessa. Oikein suunniteltu ja toteutettu porapaalusetteisinä voi tarjota vahvan ja kestävä ratkaisun erilaisiin maaperä- ja kuormitustilanteisiin, edistäen rakenteen turvallisuutta ja kestävyttä.

Lähteet

Briaud, J.L. 2013. Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils. John Wiley & Sons, incorporated.

Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. 3. Painos. Tampere: Tammertekniikka.

Jääskeläinen, R. 2012. Pohjarakennuksen perusteet. 3. Painos. Tampere: Tammertekniikka.

Pennala, E. 1998. Lujuusopin perusteet. 8. Painos. Helsinki: Otatieto.

Perko, H. 2008. Lateral Earth Pressure on Lagging in Soldier Pile Wall Systems. DFI Journal. Researchgate. [Linkki artikkeliin.](#)

Suomen Geoteknillinen Yhdistys SGY ry. 2023. Kairausopas III. Näytteenotto geoteknisiä tutkimuksia varten. Helsinki: SGY ry.

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 1986. RIL166-1986. Pohjarakenteet. Helsinki: RIL ry.

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 2013. RIL 261-2013. Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet. 3. Painos. Helsinki: RIL ry.

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 2014. RIL 263-2014. Kaivanto-ohje. Helsinki: RIL ry.

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 2016. RIL 254-2016. Paalutusohje. Helsinki: RIL ry.

Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 2019. RIL 271-2019. Teräsrakenteiden tukiseinien rakenteellinen mitoitus. Helsinki: RIL ry.

SFS-EN 1990-1+A1+AC. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1993-1. 2007. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1997-1+A1+AC. 2014. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

Teräsrakenneyhdistys TRY ry. 2014. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3- oppikirja. 2. Painos. Helsinki: TRY ry.

Väylävirasto 2023. Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI7. Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. 2023. Helsinki: Väylävirasto.

Ympäristöministeriö 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Pohjarakenteiden suunnittelu. Helsinki: Ympäristöministeriö.

