OÜ Inseneribüroo STEIGER

Paldiski 500 MW pumphüdroelektrijaama rajamisel teostatavate lõhketööde seismika hinnang

Töö nr 20/3161

Tallinn 2020

Kinnitas:

Aadu Niidas . . . . . .
Juhatuse liige

Aruande koostas:

Priit Kallaste . . . . . .
Keskkonnaspetsialist

Arvi Toomik . . . . . .
Konsultant

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS 4
2. ASUKOHA KIRJELDUS JA LÄHIMATE HOONETE KAARDISTUS 5
3. MAAVÕNKED JA PIIRNORMID 9
3.1 Maavõngete levimine keskkonnas 9
3.2 Eestis kehtivad piirnormid 10
4. KAUGUSTE JA OHUTUTE LAENGUTE ANALÜÜS 12
4.1 Suurimad lubatud võnkekiirused ja ohutud laengud 12
4.2 PAL-1 puuraugu seismiline profileerimine 15
4.3 Lõhketööde seire 16
5. KOKKUVÕTE 17
6. KASUTATUD INFOALLIKAD 18

LISAD

1. Hoonete kaardistuse koondtabel PHEJ hõlmataval maa-alal Paldiskis
2. Tartu Ülikooli maapõueressursside arenduskeskuse töö „Maavõngete sumbuvuse uuring Paldiski puuraugus PAL-1“

1. SISSEJUHATUS

Energiasalv Pakri OÜ (aadress: Rae tn 38, Paldiski, Harju maakond, 76806, registrikood: 14107173) (edaspidi ka *arendaja*) kavandab pumphüdroelekrijaama (edaspidi ka *PHEJ*) ehitamist Paldiski linna territooriumile. Planeeritav kompleks koosneb maapealsetest ja -alustest rajatistest, ulatudes Paldiski poolsaare lääneservast (Paldiski Põhjasadama alalt) kuni ~3 km kaugusele kagu suunas. Vee sissevõtt on planeeritud rajatavale tehissaarele Põhjasadamast vahetult põhjas. Vee pealejuhtimiskanal läbib Paldiski linna territooriumi ning rajatakse tehissaarelt kagu suunas kuni Pallase 16, 18 piirkonda, kuhu on kavandatud PHEJ peamine infrastruktuur ning maa-alused šahtid ja reservuaarid.

Planeeritav kompleks tervikuna hõlmab läbivalt Paldiski linna territooriumi. Maa-alused šahtid, reservuaarid ka kavernid on kavas rajada kombineeritult puurimise ja lõhkamise teel. Lõhketöödega kaasneb maavõngete levik keskkonda. Maavõngetega leviv energia, sõltuvalt impulsi tugevusest, võnkesagedusest ja kaugusest, võib kahjustada maapealseid hooneid ja rajatisi. Lõhketööd tuleb läbi viia selliselt, et ei avalduks negatiivseid mõjusid ehitistele ning säiliks nende eesmärk, kasutus- ja töövõime.

Selleks, et hinnata kavandatava PHEJ rajamiseks kasutatavate lõhketöödega kaasnevate maavõngete võimalikku mõju kompleksiga hõlmatud maapealsetele hoonetele ja rajatistele, tellis arendaja OÜ-lt Inseneribüroo STEIGER (aadress: Männiku tee 104, 11216 Tallinn, registrikood: 11206437) vastavasisulise seismilise uuringu. Uuring teostati vastavalt kokkulepitud lähteülesandele, mille raames teostati järgmised peamised tööd:

- PAL-1 puuraugu (750 m) seismiline profileerimine maavõngete sumbumise hindamiseks: Tartu Ülikooli maapõueressursside arenduskeskus (lisa 1);
- kavandatava PHEJ-ga hõlmatud maa-alal paiknevate hoonete ja rajatiste kaardistamine;
- ohutute laengute ja kauguste hinnang lähtuvalt lähimatele hoonetele ja rajatistele kehtestatud piirnormidest.

2. ASUKOHA KIRJELDUS JA LÄHIMATE HOONETE KAARDISTUS

Lähtuvalt käesoleva töö eesmärgist, on kavandatava Paldiski PHEJ / 1 / tarbeks rajatav terviklik infrastruktuur sõltuvalt selle paiknemisest jagatud kolme piirkonda:

- I piirkond - rajataval tehissaarel paiknev vee sissevõtt koos ülemise vertikaalse rõhušahtiga - Paldiski Põhjasadamast põhja pool;
- II piirkond - kagu-loodesuunaline horisontaalne maa-alune vee pealejuhtimiskanali tunnel tehissaarelt kuni PHEJ alale - Paldiski linna alune ala ~2,5 km ulatuses;
- III piirkond: PHEJ peamine infrastruktuur koos maa-aluste šahtide ja reservuaaridega - Pallase piirkond 16, 18.

Eeltoodud piirkonnad on toodud joonisel 1.

Rajatav tehissaar paikneb Paldiski Põhjasadama territooriumist ~150 m põhjas ning paarikümne meetri kaugusel kaldast. Sadama territooriumi põhjaosas paikneb sadamakai koos muuliga ja tööstuslikud kraanad kauba laadimiseks. Samuti paikneb alal kaubaveoks mõeldud raudteeliin. Tehissaarest ~380 m kaugusel põhjas paikneb Pakri maastikukaitseala (KLO1000113), mille üheks kaitse-eesmärgiks on Põhja-Eesti klindi, sh Pakri poolsaare aluspõhjakivimite paljandite kaitse ning maastikuilme mitmekesisuse säilitamine / 2 /. Samuti asub Paldiski Põhjasadama piirkonnas ehitismälestis „Paldiski kindluse bastionid, muulid, vallikraav, 1718“ (KPO tunnus: 2760), millele rakendub muinsuskaitseala kaitsevöönd / 2 /.

Vee pealejuhtimiskanali tunnel (edaspidi ka *veetunnel*) ühendab omavahel tehissaarel paiknevast vee sissevõtu ülemist vertikaalset rõhušahti Pallase piirkonnas paikneva alumise rõhušahti ja maa-aluste rajatistega. Veetunnel läbib Paldiski linna loode-kagusuunaliselt, mille planeeritava trassi kohal maapinnal jäävad nii era- kui ka kortermajad, ühiskondlikud hooned (poed, lasteaed, vallvalitsuse hoone) ning tootmis- ja tööstushooned (sh Riigiressursside Keskuse hallatav Paldiski logistikapark).

PHEJ peamine infrastruktuur Pallase piirkonnas koosneb maapealsetest- ja -alustest hoonetest ja rajatistest. Pallase piirkonna maapealne territoorium piirneb läänest raudteega ning loodest Paldiski logistikapargi territooriumiga. Põhjas ja idas asub eraomandis suvilate ja aiamajade (endised aiandusühistud) piirkond. Lõunast piirneb ala Tallinn - Paldiski põhimaantee ja Kaitseväe suletud territooriumiga (Paldiski põhjalinnak ja Paldiski lõunalinnak) / 2 /.

Välitöö käigus kaardistati 12.07.2020 ja 06.10.2020 peamised hooned ja nende tüübid PHEJ kompleksiga hõlmataval maa-alal (Lisa 1 tabel 5). Kaardistuse eesmärk oli fikseerida lõhketööde võimalikku mõjualasse jäävad hooned ning nende ehituslikud näitajad, millega arvestada ohutute laengute arvutamisel. Alusandmetena kasutati Ehitusregistris / 3 / registreeritud hoonete andmeid vundamentide ja kandvate konstruktsioonimaterjalide osas.

Arendaja esitas lõhketööde eeldatavasse mõjualasse jäävate ohtlikele ettevõtetele - AS-le Alexela Terminal, OÜ-le Palsteve ning Riigiressursside Keskus OÜ-le päringu, et välja selgitada, kas nende ettevõtete ning seal kasutatavate seadmete tõrgeteta tööks on kehtestatud Eestis kehtivatest normidest rangemad nõuded vibratsioonile naabruses

asuvate käitistega seonduvalt. AS Alexela Terminal ning OÜ Palsteve teatasid, et nende ettevõtete jaoks rangemaid nõudeid ei ole kehtestatud. Riigiressursside Keskus OÜ teatas, et Paldiski logistikapargis paiknevad ettevõtted kasutavad vibratsiooni suhtes tundlikke seadmeid, mille suhtes ei tohi esineda PHEJ ehituse ega ka hilisema käitamise ajal Eestis kehtivaid norme ületavat vibratsiooni.

N

Kavandatava PHEJ maa-aluste rajatiste piir

Vertikaalne šaht sadama piirkonnas

Vertikaalsed šahtid Pallase piirkonnas

Lõhketööde mõjuala

Muinsukaitseala kaitsevöönd

Paldiski Põhjasadama kai

Kõrval- või tootmishoone

Elu- või ühiskondlik hoone

Vundament, vare

Märkused:
1. Plaani koostamisel on kasutatud Maa-ameti 2020 alusandmeid ja ETAK andmeid.
3. Joonestamisel kasutatud tarkvara Mapinfo 9.0 (litsents: MINWES0900922272).

Objekti nimetus ja aadress Paldiski PHEJ Paldiski linn Lääne-Harju vald	Joonise sisu Rajatava PHEJ kompleks ja lähimad hooned	Joonis nr 1 Mõõtkava 1 : 7 500
OÜ Inseneribüroo STEIGER Männiku tee 104, 11216 Tallinn Tel. 668 1011, Faks 668 1018	Koostas Priit Kallaste Kinnitas Aadu Niidas	Kuupäev 30.09.2020 Töö nr 20/3161

Allpool on näidetena toodud fotod peamistest kaardistatud hoonetüüpidest:

Paldiski Põhjasadama kai (vaade põhjast)

Silikaattellistest eluhoone (Peetri tn 32)

Raudbetoon paneelidest korterelamu (Muuli tn 1)

Kergbetoonplokkidest korterelamu (Rae tn 38)

Tellisest, raud- ja kergbetoonist büroo- ja tootmishoone (Lõuna tn 6b)

Metallkonstruktsiooniga kõrvalhooned (Tallinna mnt 9)

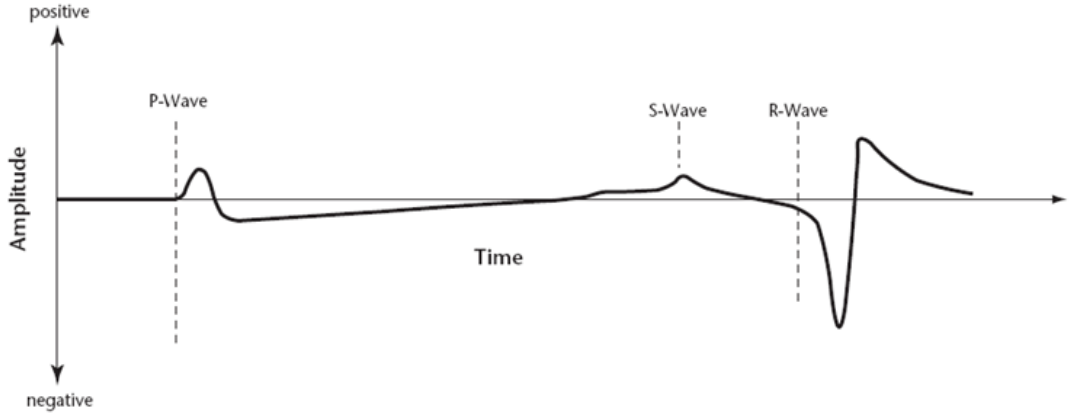
Päevalille tn, aia- ja suvilate rajoon (vaade lõunast)

Vaade ülalt aia- ja suvilate rajoonile (objekt nr 24)

3. MAAVÕNKED JA PIIRNORMID

3.1 Maavõngete levimine keskkonnas

Maavõngete tugevust hinnatakse osakeste võnkekiirusega (ühikuks mm/s või cm/s). Impulsi tagajärjel võnguvad osakesed oma asukoha suhtes kolmes eri suunas. Seetõttu eristatakse pikisuunalist, ristisuunalist ja vertikaalsuunalist võnkumist. Erinevad võnkelained levivad erineva kiirusega, jõudes võnkeallikast objektini erineval ajal. Mida suurem on vahemaa, seda enam eristuvad võnkekomponendid ning nende levik keskkonnas (joonis 2). Maksimaalseks võnkekiiruseks ehk vektorsummaks loetakse maksimaalseid väärtusi nendes kolmes suunas.



Joonis 2 Võnkelainete ajaline ja amplituudiline iseloomustus / 5 /

Pikilained levivad maapinnas üldjuhul kõige kiiremini ning jõuavad allikast vastuvõtjani esimesena. Seetõttu loetakse pikilainete levimise kiirust maapinnas võrdseks maksimaalse komponendiväärtusega. Pikilaines võnguvad osakesed laine levimise suunas edasi-tagasi. Ristilainete levimise kiirus on umbes 50 - 60 % pikilainete levimise kiirusest ning osakesed võnguvad vertikaalsuunas risti laine levimise suunaga. Pinnalained on eelnimetatud võnkekomponentide kõige aeglasema levikuga, mistõttu on ka nende lainete kustumine keskkonnas suurim. Pinnalaines võnguvad osakesed horisontaalselt elliptilisel trajektooril laine levimise suunas / 5, 6 /. Sõltuvalt pinnase või aluskivimite omadustest varieeruvad maavõngete leviku kiirused suurel määral. Eesti tingimustes on kvaternaarisetete kihis üldine leviku kiirus 1 000 - 1 500 m/s, paekivikihtides (lubja-dolokivi) 1 600 - 2 500 m/s / 7 /. Erinevate kiiruste tõttu toimub võnkelainete kustumine ja liitumine ajas, mis vastavalt kas tugevdavad või nõrgestavad maavõngete levikut keskkonnas. Võnkelained kannavad endas ka erineval hulgal energiat. Maavõngete koguenergiast kandub kuni 2/3 edasi pinnalainetega, 1/4 ristilainetega ning ainult kuni 1/10 pikilainetega. Seetõttu omavad pinnalained kõige suuremat kahjustavat efekti hoonetele ja rajatistele / 5 /, kuid pikilained on kõige kiiremini ning kaugemale levivad.

Osakeste võnkumine ja vibratsioon on keerulised füüsikalised nähtused, mille iseloom ja levik (sellest tulenevalt ka mõju) sõltub kolmest suuremast parameetrite grupist:

1. Allikas – määrab ära võnkumise tekkimise, mis levib ümbritsevasse keskkonda (allika asukoht ja kontakt ümbritsevaga, võnkumise tekkimise iseloom, võnkumise tugevus, sagedus ja kestus, ülekandumine keskkonda);

2. Levimise keskkond – määrab ära võnkumiste leviku ulatuse (maapinna-materjalide omadused, kaugus allika ja vastuvõtja vahel, sumbumise iseärasused);
3. Vastuvõtja (tundlik objekt) – määrab ära võnkumise mõju avaldumise (asukoht ja kontakt vibratsiooni edastava keskkonna suhtes, avalduva vibratsiooni tugevus, sagedus ja kestus).

Maavõngete levimine keskkonnas ning selle ülekandumine vibratsiooniks sõltub eelkõige võnkeallika tekitatud impulsi tugevusest, võnkumise sagedusest, kaugusest ning levimise keskkonna iseärasustest. Maapinnas ning aluskivimites levivad maavõnked erineva kiirusega, millest sõltub ka võngete sumbumine keskkonnas.

3.2 Eestis kehtivad piirnormid

Lõhketöödest põhjustatud kahjustuste uurimiseks on erinevates riikides kehtestatud erinevad standardid, mis määravad ehitisele maksimaalse ohutu võnkekiiruse. Eestis puudub taoline eraldiseisev standard, mistõttu on piirnormide väljatöötamisel toetutud teiste riikide standarditele (Soome normatiividele). Eestis kasutatakse ehitistele ja hoonetele võimaliku kahjustava mõju hindamise peamise kriteeriumina maksimaalset võnkekiirust, mis leitakse arvutuslikult. Seejuures on suurimaks puuduseks võnkesagedustest lähtuvate piirnormide puudumine.

Ehitistele lubatavad suurimad võnkekiiruse väärtused on kehtestatud majandus- ja taristuministri määrusega nr 49 / 8 /. Lubatud võnkekiirused sõltuvad võnkeallika ja mõõdetava objekti vahelisest kaugusest, keskkonna aluspinnasest ja ehitise liigist. Maavõnked levivad hooneni aluskivimite ja kvaternaarisetete kihtide kaudu. Maapinnast ülekanduv ja hoonele avalduv vibratsioon sõltub ehitise aluspinnasest. Kui ehitis asub pehmes aluspinnases (savi, liiv, kruus), on lubatavad võnkekiiruse väärtused madalamad. Võnkesagedus on teataval määral seotud distantsiga, kus suurematele kaugustele levivate madalamatele võnkesagedustele lehtivad väiksemad lubatud väärtused (tabel 1).

Tabel 1 Ehitistele lubatud suurimad võnkekiiruse väärtused / 8 /

Kaugus ehitiseni, m	Maksimaalne lubatud võnkekiirus v_{maks}, mm/s		
	Savi, liiv, kruus, pehme moreen	Tugev moreen, kildad, pehme lubja- ja liivakivi	Graniit, gneiss, tugev lubja- ja liivakivi
5	18	35	85
10	18	35	70
20	15	28	55
30	14	25	45
50	12	21	38
100	10	17	28
200	9	14	22
500	7	11	15
1000	6	9	12

Analoogne seos kehtib ka ehitise liigi kohta: kergbetoonist ja silikaattellistest hooned on vibratsioonitundlikumad kui puidust ja raudbetoonist hooned.

Tabel 2 Ehitise liigist sõltuv parandustegur / 8 /

Ehitise liik	Parandustegur, F_k
Rasked ehitised (sillad, sadamakaid)	2,00
Betoon-, raudbetoon- ja teraskonstruktsioonidega tööstushooned ja pritsbetooniga kaetud allmaarajatised	1,50
Tellistest ja betoonist büroo- ja ühiskondlikud hooned, betoonvundamendile või kaljupinnasele ehitatud puuhooned	1,20
Betoonist või tellistest elumajad (ehitises ei tohi olla kasutatud kergbetooni ega silikaattelliseid), allmaakaablid. Kivistuv valubetoon eaga üle ühe nädala.	1,00
Kergbetoonehitised (kõik ehitised, milles on kasutatud kergbetooni). Kivistuv valubetoon eaga 3 - 7 ööpäeva.	0,75
Eriti vibratsioonitundlikud ehitised (muuseumid, kirikud, kõrgete võlvidega ja suurte pindväljadega hooned, silikaattellistest hooned. Kivistuv valubetoon eaga kuni 3 ööpäeva.	0,65
Varinguohtlikud ajaloo- ja arhitektuurimälestised, varemed	0,50

Maksimaalne seismiliselt ohutu viite või viitegrupi laeng leitakse järgmise valemi abil:

$$Q_{maks} = \frac{v_{maks}^2 \cdot F_K \cdot r^{2,7}}{K^2}, \text{ kg} \qquad [1]$$

kus:
v_{maks}^2 - ehitisele lubatud suurim võnkekiirus, mm/s (tabel 1);
F_k - ehitise parandustegur (tabel 2);
r - kaugus lõhkekohast objektini, m;
K - pinnase seismilisuse tegur.

Seismilise teguri K puhul arvestatakse objekti aluspinnase omadusi järgmiselt:

	K_{min}	K_{max}
Veevaene kaljupinnas paksusega kuni 15 m	200	300
Keskmise paksusega üle 15 m paks liiva- või savipinnas	300	450
Veega küllastunud kobe pinnas (vesiliiv)	450	600

Seejuures maksimaalväärtust kasutatakse vihmasel ja suurvee perioodil, samuti aasta läbi töötamisel ning minimaalväärtust suvisel kuival perioodil.

Lisaks hoonetele ja rajatistele on majandus- ja taristuministri määruses nr 49 välja toodud muude vibratsioonitundlike seadmete paiknemine lõhketööde mõjupiirkonnas. Sellisel juhul tuleb ohutute laengusuuruste määramisel lähtuda iga kord konkreetsest olukorrast: vibratsioonitundliku seadme paiknemisest hoones, tehnilisest seisukorrast ja valmistajajuhendist. Lõhketöödega alustamisel või nende jõudmisel taoliste vibratsioonitundlike seadmete mõjupiirkonda tuleb lõhketööde teostajal konkreetsete lõhkelaengute välja töötamisel arvestada määruses toodud nõuetega.

4. KAUGUSTE JA OHUTUTE LAENGUTE ANALÜÜS

Geoloogilise uuringu / 9 / teostati aluspõhjakivimite geoloogiline kaardistamine PAL-1 puuraugus. Litoloogilise kirjelduse kohaselt on Kvaternaarisetete kiht küllaltki õhuke - kuni ~1,4 - 1,6 meetrit (savi, liiv, moreen), millele järgneb ~18 meetri paksune lubjakivikiht. Maa-ameti geoloogia rakenduse / 2 / andmetel esineb ka Paldiski linna alal suhteliselt õhuke Kvaternaarisetete kiht (pinnakatte samapaksusjoon valdavalt 1 m, Põhjasadama piirkonnas kuni 2 m). Seetõttu võib eeldada, et geoloogilistele andmetele tuginedes, toetuvad maapealsed hooned PHEJ kompleksiga hõlmatud maa-alal kaljusele aluspinnasele. Seda näitab ka kaardistatud hoonete vundamendi tüüp - madalvundament - mida kasutatakse olukorras, kus piisava kandevõimega pinnas asub otse ehitise all ning rajatakse umbes ühe meetri sügavusele. Seetõttu on edaspidistes arvutuses arvestatud määruses nr 49 esitatud pinnase seismilisuse teguriga K_{max} = 300 (kaljupinnas paksusega kuni 15 m), mis arvestab ka kõrgest põhjavee tasemest tingitud võngete soodustatud levikut. Ehitise aluspinnaseks on valitud keskmise tugevusomadustega pinnas (tugev moreen, kildad, pehme lubjakivi, liivakivi).

4.1 Suurimad lubatud võnkekiirused ja ohutud laengud

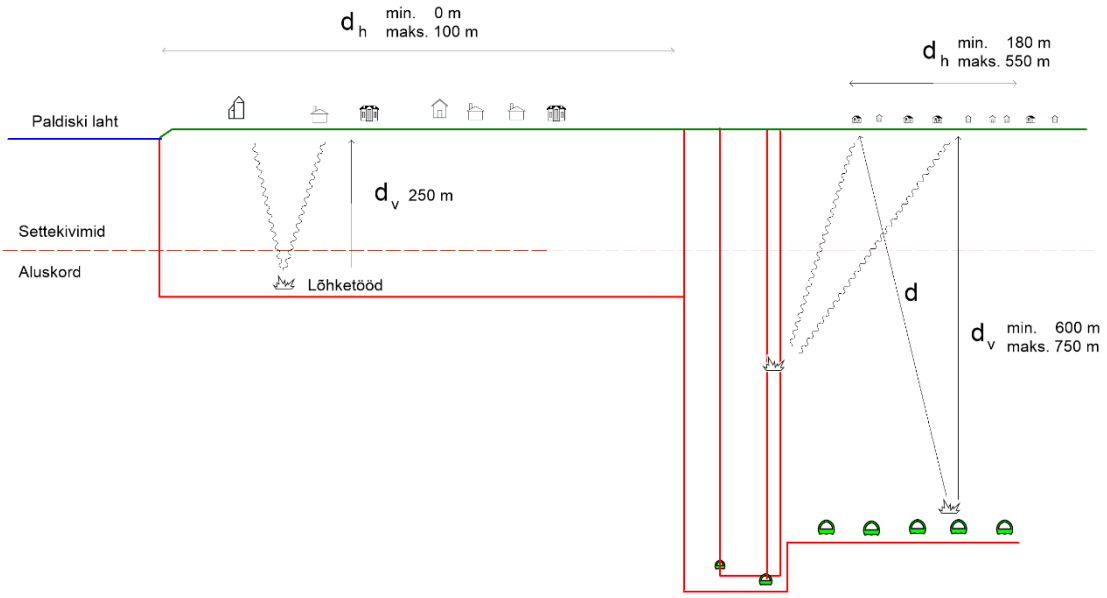
Lõhketöid on plaanis teostada rajatava maa-aluse infrastruktuuri erinevates osades:
1. Sadama piirkonnas ülemise vertikaalse šahti alumises osas, kus geoloogilise uuringu kohaselt algavad tugevamad aluskorrakivimid (gneiss), sügavusel ~180 - 250 m.
2. Veetunnel rajamisel, mis paikneb ~250 - 260 m sügavusel sõltuvalt maapinna kõrgusandmetest, kogupikkuses 2 350 m.
3. Pallase piirkonnas vertikaalsete šahtide (5), kavernide ning reservuaaride (10) rajamiseks erinevatel sügavustel alates aluskorrakivimite kihist ~180 - 190 m (sõltuvalt maapinna kõrgusandmetest) kuni ~750 m sügavuseni.

Maa-aluste rajatiste paiknemisest tulenevalt muudab pidevalt tundliku objekti (hoone) ja maavõngete impulsi tekkekoha (lõhkekoha) vahelist kaugust. Kuna rajatavad šahtid ja kavernid paiknevad kuni 750 m sügavusel, tuleb tegeliku kauguse ehk diagonaalse kauguse d leidmisel arvestada horisontaalset ja vertikaalset kaugust:

$$d = \sqrt{(d_h)^2 + (d_v)^2}, \text{ m} \qquad [2]$$

kus:
d_h - horisontaalne kaugus lõhkekoha ja ehitise vahel, m;
d_v - vertikaalne kaugus lõhkekoha ja ehitise vahel, m.

Hoonete ja lõhketööde omavahelist põhimõttelist paiknemist on kujutatud skeemil 1.



Skeem 1 Maapealsete hoonete skemaatiline paiknemine lõhketööde suhtes

Skeemilt 1 on näha, et lõhketööde edenemine ja paiknemine ajas on nii horisontaalses kui ka vertikaalses tasandis lähimate hoonete suhtes pidevas muutumises - lähenemine ühtele objektidele toimub samaaegselt kaugenemisega teistest objektidest.

Lähtuvalt tabelis 4 (lisa 1) toodud PHEJ kompleksiga hõlmataval maa-alal paiknevate hoonete ehituslikest ja aluspinnase omadustest, on nende suhtes leitud suurimad lubatavad võnkekiirused v_{maks} (tabel 1) ja ohutud lõhkelaengud Q_{maks} (valem 1 ja 2, tabel 2). Lubatud võnkekiiruste leidmiseks vahepealsetel kaugustel on kasutatud interpoleerimist. Arvestatud on ainult lähimate hoonete kaugusi, kuid arvutatud väärtused on üle kantavad ka teiste hoonetele. Arvutatud väärtuse on toodud tabelis 3.

Tabel 3 Kaardistatud hoonete ja rajatistele lubatavad suurimad võnkekiirused ja ohutud laengud sõltuvalt lõhkekoha kaugusest

I Sadama piirkond							
Ehitise liik (konstruktsioon)	Hoone nr	Parandus-tegur	d_h, m	d_v, m	d, m	v_{maks}, mm/s	Q_{maks}, kg*
Sadamakai (Paldiski Põhjasadam)	1	2,00	200	180 - 250	270 - 320	25,6 - 26,6	288 - 423
Arhitektuuri-mälestis (Paldiski kindlus)	1.1	0,5	0 - 100	180 - 250	205 - 270	6,7 - 7,0	9 - 18
II Veetoru piirkond							
Ehitise liik (konstruktsioon)	Hoone nr	Parandus-tegur	d_h, m**	d_v, m	d, m	v_{maks}, mm/s	Q_{maks}, kg*
Silikaattellis	2,5,10,17	0,65	0 - 100	250	250 - 270	8,6 - 8,8	25 - 35
Kergbetoon	12,13,14,20	0,75	0 - 100	250	250 - 270	9,9 - 10,1	34 - 41
(Raud)betoon - eluhoone	6-9	1,00	0 - 100	250	250 - 270	13,3 -13,5	60 - 72
(Raud)betoon, metall ja tellis - mitteeluhoone, puithoone	3,4,11,15, 16,18,19, 21-22	1,20	0 - 100	250	250 - 270	16,0 - 16,2	87 - 104
III Pallase piirkond							
Vertikaalsete šahtide rajamisel							
Ehitise liik (konstruktsioon)	Hoone nr	Parandus-tegur	d_h, m	d_v, m	d, m***	v_{maks}, mm/s	Q_{maks}, kg*
Kergbetoon, silikaattellis, puit - elu- ja abihooned	24-25	0,65	80 - 100	180	195 - 210	9,0 - 9,2	14 - 17
				200	215 - 230	8,9 - 9,0	18 - 21
				300	315	8,3	45
				400	410	7,7	75
				500	510	7,1	115
				600	605	6,9	174
				700	705	6,6	240
				750	755	6,6	272
Metall - mitteeluhoone	23,26-29	1,5	110	Lubatud väärtused on ~5x suuremad, kuid lähtuda tuleb tundlikumale hoonele kehtestatud rangemast parandustegurist 0,65.			
Horisontaalsete tunnelite ja kavernide rajamisel							
Ehitise liik	Hoone nr	Parandus-tegur	d_h, m	d_v, m	d, m	v_{maks}, mm/s	Q_{maks}, kg*
Kergbetoon, silikaattellis, puit - elu- ja abihooned	24-25,34-36	0,65	180 - 430	600-750	625 - 865	6,2 - 6,8	183 - 360
Metall - mitteeluhoone	23,26-29	1,5	180 - 550	600-750	625 - 930	13,9 - 15,8	975 - 2 228

* Arvestatud on pinnase seismilisuse maksimaaltegurit K = 300

** Horisontaalse kaugusena on arvestatud kuni 100 meetrist vööndit veetoru tsentrist. Suurematel d_h kaugustel tuleb arvestada juba järgmise hoone paiknemisega.

*** Vertikaalsel sügavusel >300 meetrit muutub horisontaalse kauguse komponent minimaalseks (5 - 10 m), mistõttu on edaspidi diagonaalse kauguse leidmisel arvestatud vahemiku keskmisega.

Tabelis 4 esitatud lõhkelaengute Q väärtused on indikatiivsed, sest need põhinevad hoonetele kehtestatud piirväärtustele. Samas on konservatiivsusest lähtudes arvestatud ehitiste aluse keskmise tugevusega pinnase ning maksimaalse seismilisuse teguriga. Juhul kui arvestada K-teguri minimaalväärtustega, suureneksid ohutute laengute väärtused ~2,3 korda, ehitise aluse tugeva aluspinna korral 1,8 - 3 korda ning mõlema komponendi

suurenemisel vastavalt 4 - 6,7 korda. Seejuures tuleb silmas pidada, et tegemist on arvutuslike (teoreetiliste) väärtustega, mille järgi on hinnata ligikaudselt laengusuurusi. Täpsed laengute suurused fikseeritakse lõhketööde passis.

I sadama piirkonnas on lõhketööde suhtes kõige tundlikum Paldiski kindlus (nr 1.1), mille puhul on lähtutud arhitektuurimälestise (muinsuskaitseobjekt) tingimusest. Objekt piirneb rannajoonega ning ulatub planeeritaval veetoru trassil kagusse kuni ~500 m ulatuses. Seetõttu tuleks objekti säilimise huvides teostada lõhkamised aluskorra kivimites küllaltki väikeste viitelaengutega (9 - 18 kg), et mitte ületada kehtestatud võnkekiiruse väärtusi. Tehissaarest põhjas paiknev Pakri maastikukaitsealaga kaitstav klint asub piisaval kaugusel võrreldes Pakri kindluse objektiga, et kahjustav mõju ei avaldu.

III Pallase piirkonnas paiknevad lähimad elu- ja aiamajad on lõhketööde suhtes kõige tundlikumad vertikaalsete šahtide rajamisel aluskorrakivimite kihi alguses (~180 m sügavusel maapinnast), kus väikseim diagonaalne kaugus lähima hooneni on 195 m. Välivaatluse käigus oli antud piirkonnas näha silikaattellistest, kergebetoonist ja puidust ehitisi ning nende kombinatsioone. Seetõttu on keeruline igale hoonele eraldi väärtust omistada ning arvutustes lähtuti kõige rangemast tingimusest (silikaattellisest hoone). Määruse nr 49 kohaselt on lõhkamisel arvestada ka 200 meetrise ohualaga kildude laialipaiskumise järgi, kuid arvestades tööde paiknemist vertikaalses šahtis, varjestavad šahti seinad kildude võimalikku laialipaiskumist ning otsest ohtu ei esine.

Lõhketööd viiakse läbi litsentseeritud lõhkaja poolt ning iga lõhkamise kohta koostatakse lõhkepass. Lõhkepassiga pannakse paika konkreetsete lõhkelaengute asetus, suurused ja viited vajaliku lõhketöö teostamiseks. Sõltuvalt reaalsetest vajalikest ja optimaalsetest laengusuurustest võib ilmneda, et lõhketööd tuleb asendada teise alternatiiviga (puurimine, piikamine hüdrovasaraga). Probleemsete asukohtades lõhkamisel tuleks läbi viia ka hoonete passistamine, mis võimaldab täpsustada lubatavaid piirväärtusi ning jälgida hoone seisundit ja vastupidavust avalduvate mõjude suhtes.

4.2 PAL-1 puuraugu seismiline profileerimine

Uuringu raames viis TÜ maapõueressursside arenduskeskuse läbi PAL-1 puuraugu vertikaalne seismiline profileerimine (edaspidi ka *VSP*) (lisa 2). Maapinnal spetsiaalse vasaralöökidega tekitatud võnkeid fikseeriti puuraugus asetseva geofooniga erinevatel sügavustel.

Kõige kiiremini levisid allika ja geofooni vahel pikilained (P-lained), mille kiirus settekivimites (kuni 180 m sügavuseni) oli vahemikus 1 700 - 2 700 m/s ning aluskorrakivimites keskmiselt 6 000 m/s. Seetõttu kasutati võnkeamplituudide kahanemisel just P-lainete signaale. Lõhkamisel levivad võnkelained sfääriliselt kõikides suundades laiali ning lainetega edasi kantav energia hulk väheneb kauguse ruuduga. Energia hulk on lineaarselt seotud võnkeamplituudi ruuduga, mis omakorda kahaneb proportsionaalselt kauguse pöördväärtusega järgmiselt:

$$A_0 \cdot x_0 = A_1 \cdot x_1 \qquad [3]$$

kus:
A_0 ja x_0 - referents amplituud ja referentskaugus;

A_1 ja x_1 - arvutatav amplituud ja otsitav kaugus.

Profileerimise tulemuste kohaselt vähenevad amplituudid aluskorra kivimites 4 - 5 korda. Samasugune vähenemine esineb ka settekivimite ja aluskorra kontaktpiirkonnas. Settekivimites, kus erinevate kivimite omadused varieeruvad suuresti on amplituudiline kahanemine peaaegu ühe suurusjärgu võrra. Samas ei pruugi settekivimite sügavusel teostatud mõõtmised olla usaldusväärsed olemasoleva mantelduse tõttu. Aluskorrakivimite kiht on omadustelt seevastu küllaltki ühtlane ning monoliitne, mistõttu on amplituudiline vähemeine antud sügavusvahemikus (180 - 750 m) usaldusväärsemad. Jättes välja mõõtetulemuse kuni ~30 m sügavusel paikneva põhjaveetasemeni, oleks antud geoloogilistes tingimustes amplituudiline vähenemine 2 suurusjärku.

Teades amplituudilist kahanemist, on võimalik esimeste lõhkamiste maavõngete mõõtmisel hinnata kahanemist teistel kaugustel paiknevate tundlike objektide suhtes.

4.3 Lõhketööde seire

Kõige kindlam ning vahetum viis veendumaks, et lõhketöödega ei avaldu hoonetele kahjustavat mõju, on kohapealsed otsesed mõõtmised. Mõõtmised tuleb läbi viia lõhketöödega alustamisel ning mõõtmised peavad olema läbi viidud akrediteeritud mõõtja poolt, et oleks tagatud mõõtetulemuste jälgitavuse tõendamine vastavalt mõõteseadusele / 10 /.

Arvestades lõhketöödega kaasnevate maavõngete kompleksset levimist keskkonnas, üle kandumist hoonete aluskonstruktsioonidele ning vibratsioonina avaldumist, on mõjude täpsemaks ennustamiseks vajalik mõõtetulemuste andmeanalüüs (regressioonanalüüs). Praktika karjääri- ja kaevanduste lõhketööde mõõtmisel on näidanud, et süsteemse ning usaldusväärse hinnangu andmiseks on vajalik minimaalselt 20 lõhkamise andmeid, mistõttu on soovituslik lõhketööde mõõtmistel teostada seeriamõõtmised. Regressioonanalüüs võimaldab hinnata arvutuslike ohutute laengute ja lubatud võnkekiiruste väärtusi mõõtmistega fikseeritud väärtustega ning täpsemini (üldjuhul kuni 95 % usalduspiiriga) ennustada ka edaspidi teostatavate lõhketöödega kaasnevate maavõngete levimist ja mõju hoonetele antud asukohas ning keskkonnatingimustel. Mida rohkem andmeid on võimalik regressioonanalüüsis kasutada, seda usaldusväärsememaks ning täielikumaks kujuneb ka edasine hinnang. Praktilisele andmeanalüüsile tuginedes on võimalik ka lõhketööde läbiviimist optimeerida.

Arvestades kavandatava PHEJ maa-aluste rajatiste rajamise keerukust ning paiknemist Paldiski linna territooriumil, tuleks seire täpsed asukohad välja töötada lähtuvalt lõhketööde teostamise plaanist ning koostöös lõhkajaga.

5. KOKKUVÕTE

Energiasalv Pakri OÜ kavandab pumphüdroelekrijaama ehitamist Paldiski linna territooriumile Paldiski poolsaarel. Kompleks koosneb maapealsetest ja maa-alustest rajatistest, hõlmates tervikuna Paldiski linna territooriumi loode-kagusuunaliselt. Vajalikud maa-alused šahtid, tunnelid, kavernid ja reservuaarid plaanitakse rajada lõhketöödega. Seejuures tuleb lõhketööd läbi viia selliselt, et lõhkamistega kaasnevad maavõnked ei avaldaks kahjustavat mõju maapinnal paiknevatele hoonetele ja rajatistele ning nende funktsioneerimisele.

Käesoleva töö raames kaardistati Paldiski linna territooriumil paiknevad maapealsed hooned ja rajatised (lisa 1), mis jäävad kavandatava kompleksi lähedusse. Kompleks hõlmab ka maa-aluseid šahte, tunneleid ja kaverne (reservuaarid), mida aluskorrakivimite kihtidesse plaanitakse rajada lõhketöödega. Tulenevalt kompleksi paiknemisest toimuvad lõhketööd Paldiski Põhjasadama piirkonnas, läbivalt Paldiski linna territooriumil ning selle idaosas Pallase 16,18 piirkonnas.

Tuginedes Eestis kehtivale seadusandlusele on leitud lähimatele hoonetele suurimad lubatud võnkekiiruste väärtused hoonete tüübist ja nende aluspinnasest lähtuvalt ning ohutud laengud erinevatel kaugustel. Lõhketööde teostamine on võimalik kõikides planeeritud asukohtades, kuid ohutute (viite)laengute puhul tuleb alati arvestada kõige tundlikumale hoonele kehtestatud piirnormidega. Uuringu käigus teostati ka PAL-1 puuraugu vertikaalne seismiline profileerimine (lisa 2). Tulemuste kohaselt toimub võngete sumbumine aluskorrakivimites 4 - 5 korda ning settekivimites kuni ühe suurusjärgu võrra. Sõltuvalt lõhketööde asukohast on sumbumisega võimalik arvestada lõhketööde planeerimisel.

Arvutuslikud lubatud suurimad võnkekiirused ning ohutud laengud tuginevad teoreetilistele seostele ning eeldustele, mistõttu tuleb lõhketöödega alustamisel teostada seiret. Kohapealsete mõõtetulemustele tuginedes on võimalik analüüsida arvutuslike väärtuste sobivust ning ennustada edaspidi teostatavate lõhketöödega tõenäoliselt avalduvaid mõjusid.

6. KASUTATUD INFOALLIKAD

1. Paldiski 500MW PHES Feasibility Study, Technical Feasibility: Consultancy Services for Geological Investigations & Design Works (Task 1 & Task 2) for the Paldiski 500 MW Pumped Hydro-Energy Storage Project (PHES) in the Republic of Estonia, FICHTNER, September 2020.

2. Maa-ameti geoportaali kaardirakendused (https://geoportaal.maaamet.ee/est/Kaardirakendused-p2.html).

3. Ehitusregister (https://www.ehr.ee/app/esileht?0).

4. Hydrogeological studies and groundwater modeling for the Paldiski 500 MW Pumped Hydro Energy Storage Project in the Republic of Estonia, OÜ Inseneribüroo STEIGER, Tallinn 2020.

5. Richart, F. E. Vibrations of soil and foundations. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1970.

6. Blast vibration course: Measurement - Assessment - Control. TERROCK Consulting Engineers, 2005.

7. Toomik, A., Tomberg, T., Blast vibrations in oil shale surface mining, Oil Shale, 14, 2, 1997.

8. Majandus- ja taristuministri 08.09.2017. a määrus nr 49 „Lõhkematerjali kasutamise ja hävitamise nõuded“ (RT I, 12.09.2017, 4).

9. Geological investigations & Design works for the Paldiski 500MW Pumped Hydro Energy Storage Project in the Republic of Estonia, OÜ Inseneribüroo STEIGER, Tallinn 2020.

10. Mõõteseadus (RT I, 12.12.2018, 57).

Lisa 1

Tabel 4 PHEJ kompleksiga hõlmatavate peamiste maapealsete hoonete ja rajatiste andmed

I Sadama piirkond					
Aadress	**Hoone nr**	**Kirjeldus**	**Liik ja tüüp***	**Vundamendi tüüp**	**Kandekonstruktsiooni materjal**
Sadama tn 3, 3a	1	Sadamakai	Rajatis	Pole teada	Raudbetoon
Paldiski kindlus	1.1	Paldiski kindluse bastionid, muulid, vallikraav	Rajatis (muinsuskaitseobjekt)	-	-

II Veetoru alune piirkond (Paldiski linn)					
Aadress	**Hoone nr**	**Kirjeldus**	**Liik ja tüüp***	**Vundamendi tüüp**	**Kandekonstruktsiooni materjal**
Peetri tn 45/45a	2	Garaažiboksid	K/T, M	Madalvundament	Silikaattellis
Peetri tn 36a/36b	3	1-kordne elumaja	E/Ü, E	Madalvundament	Puit
Peetri tn 34	4	2-kordne elumaja	E/Ü, E	Madalvundament	Puit
Peetri tn 32	5	2-kordne elumaja	E/Ü, E	Madalvundament	Silikaattellis
Peetri tn 30	6	5-kordne korterelamu	E/Ü, E	Madalvundament	Monteeritav raudbetoon
Muuli tn 3	7	5-kordne paneelmaja korterelamu	E/Ü, E	Madalvundament	Monteeritav raudbetoon
Peetri tn 28	8	5-kordne paneelmaja korterelamu	E/Ü, E	Madalvundament	Monteeritav raudbetoon
Muuli tn 1	9	5-kordne paneelmaja korterelamu	E/Ü, E	Madalvundament	Monteeritav raudbetoon
Rae tn 21	10	5-kordne korterelamu	E/Ü, E	Madalvundament	Silikaattellis
Rae tn 23	11	2-kordne kaubamaja hoone	E/Ü, M	Madalvundament	Monteeritav raudbetoon
Rae tn 38	12	1-5-kordne korterelamu/büroohoone/pood	E/Ü, E	Madalvundament, lintvundament	Metall, tellis, monoliitne raudbetoon, monteeritav raudbetoon, väikeplokk
Rae tn 36	13	5-kordne paneelmaja korterelamu	E/Ü, E	Madalvundament	Tellis, väikeplokk (kergbetoon)
Rae tn 34	14	2-kordne hoone	E/Ü, E/Ü	Madalvundament	Tellis, väikeplokk (kergbetoon)
Pakri tn 14	15	2-kordne hoone	E/Ü, M	Madalvundament	Tellis
Lääne tn 14 58001:002:0254	16	Garaaž/ladu	K/T, M	Madalvundament	Puit
		Garaaž/ladu	K/T, M	Madalvundament	Puit
	17	Töökoda	K/T, M	Madalvundament	Silikaattellis
Lõuna tn 6a 58001:001:0256	18	Tootmishoone	K/T, M	Postvundament	Metall
Lõuna tn 6b 58001:001:0255	19	Katlamaja, boilerijaam	K/T, M	Postvundament	Metall
	20	Tootmishoone	K/T, M	Postvundament	Metall, tehisplaat (kergbetoon)
	21	Olmehoone (büroohoone)	E/Ü, M	Madalvundament	Tellis, monoliitne raudbetoon
	22	Tootmishoone	K/T, M	Postvundament	Metall

III Pallase piirkond					
Aadress	**Hoone nr**	**Kirjeldus**	**Liik ja tüüp***	**Vundamendi tüüp**	**Kandekonstruktsiooni materjal**
Saialille tn 24	23		K/T, M	Madalvundament	Metall, tellis, monoliitne raudbetoon
Päevalille tee	24	Aiamajade ja suvilate piirkond	E, K/T	Pole teada	Tellis, kergbetoonplokk, puit
Mooniõie tn					
Oblika tn	25				
Tallinna mnt 9 58001:005:0040	26	Remondihall	E/Ü, M	Madalvundament	Metall
	27	Masinate tankla	K/T, M	Pole teada	Metall
	28	Garaažid (pikk rida)	K/T, M	Postvundament	Metall
	29	Katlamaja, boilerijaam	K/T, M	Madalvundament	Metall
Tallinna mnt 7 58001:005:0030	30	-	K/T, M	Puudub	Metall
	31	Renoveeritud kasarmu, 4-kordne	E/Ü, M	Pole teada	Pole teada
	32	Mahajäetud telliskivi hoone	Muu hoone	Madalvundament	Tellis, monteeritav raudbetoon
	33	1-kordne kõrvalhoone	K/T, M	Puudub	Metall
Rae põik 1 58001:005:0020	34	Kasarmu, uus, 3-kordne	E/Ü, E	Pole teada	Pole teada
	35	Renoveeritud kasarmu, 3-kordne	E/Ü, E	Pole teada	Pole teada
	36	Kasarmu, 3-kordne	E/Ü, E	Pole teada	Pole teada

* E/Ü: elu- või ühiskondlik hoone, E: eluhoone, K/T: kõrval- või tootmishoone, M: mitteeluhoone