Euroopa Liit
Euroopa
Regionaalarengu Fond

Eesti
tuleviku heaks

Optimaalse tee konstruktsiooni koostamise metoodika väljatöötamise II etapi võitja väljaselgitamise eksperttööd

Projekt: EU50553

Töö on koostatud Maanteeameti teede arengu osakonna tellimusel
Tallinn 2017

Tellija:
Maanteeamet
Aadress: Pärnu mnt 463a, 10916 Tallinn
Kontaktisik: Taavi Tõnts (e-mail: taavi.tonts@mnt.ee)

Teostaja:
Tallinna Tehnikakõrgkool
Aadress: Pärnu mnt 62, 10135 Tallinn
Vastutav täitja: Sven Sillamäe (e-mail: sven@tktk.ee)

Töös osalesid:
Prof. Leena Korkiala-Tanttu (Aalto ülikool)
Prof. Pauli Kolisoja (Tampere Tehnikaülikool)
Prof. Martti Kiisa (Tallinna Tehnikakõrgkool)
Mait Mets, PhD (Geoengineering OÜ)
Henry Gustavsson, PhD (Aalto ülikool)
Julija Šommet, PhD (Tallinna Tehnikakõrgkool)
Margus Vaino (Tallinna Tehnikakõrgkool)

Töö valmimisele aitasid kaasa:
Veli-Antti Hakala (Aalto ülikool), Eesti Keskkonnauuringute Keskus, ViaCon Eesti AS, West Coast Road Masters Oy.

© Maanteeamet, 2017

Töö tellija on Maanteeamet, kuid töö tulemus ei pea olema kooskõlas Maanteeameti seisukohaga ega väljenda Maanteeameti poolt heaksiidetud arvamusi. Vastutus antud dokumendis toodud informatsiooni ja esitatud arvamuste eest lasub täies mahus töö teostajal. Tööd võib vabalt tervikuna tasuta kasutamiseks välja anda või tsiteerida allikale viidates.

Sisukord

Sissejuhatus 4
1. Tööde vastavus etteantud lähteülesandele 5
1.1. ERC Konsultatsiooni OÜ 5
1.1.1. ERC Konsultatsiooni OÜ töö vastavus lähteülesandele 9
1.2. Škepast&Puhkim OÜ 10
1.2.1. Škepast&Puhkim OÜ töö vastavus lähteülesandele 13
2. Märkused, küsimused ja võrdlused 14
2.1. ERC Konsultatsiooni OÜ 14
2.1.1 Kokkuvõte ERC töö märkustest 29
2.2. Škepast&Puhkim OÜ 30
2.2. Geotehnilise arvutuse võrdlus 34
2.3. Hinnang muldkehale, teekatendile ja soovitused 38
Kokkuvõte 43

SISSEJUHATUS

Käesolevas aruandes käsitletakse kahe meeskonna, ERC Konsultatsiooni OÜ ja Škepast&Puhkim OÜ, tööd, mis jõudsid teadus- ja arendustöö „Optimaalse tee konstruktsiooni koostamise metoodika väljatöötamine“ II etappi.

Meeskondadel tuli koostada töö vastavalt etteantud kirjeldusele ja nõuetele ning peamiseks ülesandeks oli esitada täpsustatud metoodika, mille alusel koostada optimaalne kohalikel ehitusmaterjalidel baseeruv tee konstruktsioon. Teiseks ülesandeks oli teha täismahus tee konstruktiivne lahendus Pärnumaal asuva Are ümbersõidu ehitamiseks.

Tööde hindamiseks kutsus Tallinna Tehnikakõrgkool kokku töörühma, mis pidi kontrollima esitatud kahe töö vastavust lähteülesandele, väljatöötatud metoodikat ja Are ümbersõidu lahendust.

Käesoleva aruande esimeses peatükis vaadeldakse, kas tööd vastasid etteantud lähteülesandele, teises peatükis analüüsitakse mõlemat tööd põhjalikumalt, esitatakse mitmeid küsimusi ja antakse erinevaid soovitusi ning kokkuvõttes esitatakse koondtulemus.

1. TÖÖDE VASTAVUS ETTEANTUD LÄHTEÜLESANDELE

Järgnevalt analüüsitakse, kas mõlemad meeskonnad on koostanud oma tööd Maanteeameti poolt etteantud lähteülesande kohaselt. Iga nõude osas on esitatud küsimus, millele antakse lühivastus, kas nõue on täidetud või mitte ja vajadusel lisatakse kommentaar.

Lähtudes jah/ei vastuste arvust, antakse peatüki lõpus lähteülesande täitmise protsent. Lähteülesande põhjal koostati vastavalt nõuete järjekorrale 2+27 küsimust, kus iga „jah“ annab täispunkti, „pigem jah“ annab 0.5 punkti ja „pigem ei“ ja „ei“ annab null punkti. Esimesed kaks küsimust vastavad sellele, kas lähteülesande kaks peamist ülesannet on täidetud.

Metoodika väljatöötamise lõppülesandeks oli saada optimaalne kohalikel ehitusmaterjalidel (veokaugus objektist kuni 50 km) baseeruv tee konstruktsiooni koostamise metoodika. II etapi ülesandeks oli **optimaalse tee konstruktsiooni koostamise <u>metoodika täpsustamine ja täismahus tee konstruktiivse lahenduse koostamine.</u>** Käesolevas töös arvestatakse, et kuna nimetatud kaks olid töö tuumaks, annavad need 25% lõpphinnangust ja vastused esitatud küsimustele ülejäänud 75% lõpphinnangust.

1.1. ERC Konsultatsiooni OÜ

Küsimused, millele vastata lähtudes tehnilisest kirjeldusest:

1. Kas esitatud töödega on esitatud metoodika, kuidas koostada kohalike ehitusmaterjalidega tee konstruktsiooni [mis oli töö peamiseks eesmärgiks]?

<u>Ei ole.</u> Püstitatud on suur hulk vastamata jäänud küsimusi, enamasti ei ole esitatud lahendusi ega lahenduskäike, kuidas küsimustele vastuseid saada. Töö on väga raskesti jälgitav, hüppab ühelt mõttelt teisele ja alati ei ole võimalik üheselt mõista, millest täpselt räägitakse.

Kuna metoodiline lähenemine püstitatud ülesandele on jäetud esitamata, siis tehtud töö sisu ei ole korratav selle poolt, kes sooviks võtta esitatud metoodika aluseks, et koostada kohalikel ehitusmaterjalidel baseeruvat tee konstruktsiooni.

2. Kas on koostatud täismahus tee konstruktiivne lahendus [mis oli töö teiseks eesmärgiks]?

<u>Ei ole.</u> Töö on sisemiselt vastuoluline, ei ole esitatud üheti mõistetavat (teekatendi ja muldkeha ehk teekonstruktsiooni) lahendust ega konstruktiivseid ristlõikeid.

3. Kas tee konstruktsioon koosneb kohalikest ehitusmaterjalidest (veokaugus kuni 50 km) [töö pealkirja nõue]?

<u>Jah.</u> Kohalikke materjale on püütud kasutada võimalikult suurel määral.

4. Kas lagedal on tuisuohutuse nõue tagatud [p. 2.1]?

<u>Jah</u>. Käsitletud on kõrget muldkeha, mis tagab Projekteerimisnormide kohase tuisuohutu tee kõrguse (olemasolevast maapinnast vähemalt 175 cm).

5. Kas 2+1 lahenduse metoodika on koostatud nii, et neid saaks optimaalsete kulutustega ja tehniliste riskidega laiendada 2+2 peale nõrkade aluspinnaste korral [p.2.2…2.4]?

<u>Pigem jah,</u> kuigi töö sisu on selles osas vastuoluline. Kõige selgem vastus tuleb peatükis 9, milles järeldatakse, et hilisem laiendamine on võimalik teha ilma, et ületatakse etteantud

vajumierinevused. Antud järeldus on tehtud võrreldes 2+1 ja 2+2 ristlõike laiusele tehtud muldkeha vajumiarvutusi arvestades seejuures ka aluspinnase omadusi selles osas, et vajum toimub ehituse käigus. Arvutuste ülesehitus ei ole siiski selline, millega kontrollitakse olukorda, kus 2+1 teele lisatakse juurde laiendatav osa, mis oli lähteülesande eelduseks, vaid lihtsalt on võrreldud eri laiusega muldkehade vajumeid. Tuleb märkida, et lõpptulemust see antud juhul siiski mõjutanud ei ole.

6. Kas koostatud lahendus on pikaajalise elukaareanalüüsi (30+ a.) põhjal optimaalseim [p. 2.3]?

Ei ole (pigem ei saa küsimusele vastata). Analüüsitud on vaid ühte katendivarianti (kõrge ja madala muldkehaga teekonstruktsioon), mida on võrreldud betoonteega, kuid mitte millegi muuga. Lisaks on andmed katendikihtide pikaajalise vastupidavuse ja eluea osas võrdleva elukaareanalüüsi tegemiseks puudulikud.

7. Kas konstruktsioonilahendused on kantud joonistele arvestades etteantud mõõteahelaid 2+2 ja 2+1 ristlõigetele [p. 2.5]?

Ei ole.

8. Kas esitatud on karjääride ja materjalide ülevaade 50 km raadiuses [p. 2.6.1]?

Jah, kuid osad karjäärid on vaid teoreetilised (kirjas on kaevandamise varu, kuid pole kontrollitud, kas seal toimub kaevandustegevust) ega oleks lähiajal Are ümbersõidu osas kasutatavad juhul, kui neid Rail Balticu ehitust silmas pidades ei ole avatud.

9. Kas koostatud konstruktsioonides on kasutatud pehmeid paekivi kihte, sõelmeid jms karjäärides ülejäävat materjali [p. 2.6.2]?

Pigem jah. Paekivisõelmete kasutamist on ette nähtud kasutada muldkehas, kuid selles osas ollakse kohati ebalevad ning esitatud lahendused ei ole töös läbivalt ühtsed. Näiteks käsitletakse nii kapillaartõusu katkestava kihi vajadust kui seda, et kogu kiht, mis sisaldab paekivisõelmeid, tuleks ümbritseda materjaliga, mis takistab täielikult vee juurdepääsu.

Kohati mainitakse ka tsementstabiliseeritud kihte (seda siiski pole esitatud kui väljavalitud konstruktsioonikihti), kus võiks kasutada paekivisõelmeid ja mille alla võiks paigutada nõrgemat paekivi (LA 40).

10. Kas koostatud lahenduse maksumust on võrreldud nii projekteerimisnormide järgse kui betoonkatendiga konstruktsiooni maksumusega arvutades elukaarekulud 30. aastale [p.2.6.3]?

Pigem ei. Projekteerimisnormide järgse lahendiga ei ole võrreldud, kuid betoonkatendiga on. Koostatud lahenduse maksumuse analüüsist on välja jäetud geosünteetide maksumused. Lisaks esitatakse töös vastuolulisi lahendusi. Näiteks mainitakse kokkuvõttes geosünteedi kasutamist sellises mahus, mis muudab konstruktsiooni hinda märgatavalt suuremaks, mis tõenäoliselt muudab paekivisõelmete kasutamise majanduslikult ebaotstarbekaks.

11. Kas on koostatud Are ümbersõidu 2+1 mulde ja konstruktsiooni põhiprojekt väljatöötatud optimaalse lahendusmetoodika alusel [p.2.7]?

Ei ole.

Määrus „Nõuded ehitusprojektile“ ütleb: „*Põhiprojekt on ehitusprojekti staadium, milles esitatakse ehitise arhitektuurilahenduste ja insener-tehniliste lahenduste ning kvaliteedi kirjeldus täpsusega, mis võimaldab määrata ehitise eelarvelist maksumust, korraldada ehitushanget ja koostada ehitamiseks hinnapakkumust.*“ ja „*Põhiprojektis esitatakse*

arhitektuurilahendused ja insener-tehnilised lahendused ning kõik olulised tehnilised nõuded ehitustootele, -materjalile ja -seadmele, ehitisele ja selle osadele. Esitatud lahendused peavad olema kontrollitud ja omavahel kooskõlas."

Kuna töö sisus on püstitatud välja pakutud lahenduste osas mitmeid küsitavusi ja kahtlusi, ei saa seda nimetada põhiprojektiks. Lisaks ei ole esitatud üheselt mõistetavat ja arusaadavat lahendust.

12. Kas väljatöötatud optimaalse lahendusmetoodika ja Are ümbersõidu 2+1 mulde ja konstruktsiooni põhiprojekti alusel on tehtud ettepanekud *Muldkeha ja dreenkihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhise* täiendamiseks projekteeritavate jätkusuutlike 2+1 lahenduste mullete peatüki osas [p.2.7]?

Pigem ei. Mõningaid ettepanekuid on võimalik töö erinevatest kohtadest välja lugeda, kuid need ei ole koondatud ühte kohta ja lugeja peab ettepanekud tekstist ise tuletama.

13. Kas projekteerimisel on kasutatud Teemaaplaneeringu trassi telge [p.2.8]?

Jah.

14. Kas projekteeritud on minimaalselt 2 mulde- ja katendikonstruktsiooni – üks lagedal alal ja teine väljaspool lagedaid alasid [p.2.9]?
    a. Lagedal alal, kus teekatte kõrgus vähemalt 1.75 m, tuleb välja tuua vajumi- ja stabiilsusarvutustele tuginevad riskid ja suurused, kui mullet tulevikus laiendatakse 2+2 peale.
    b. Väljaspool lagedaid alasid sõltub kõrgus katendiarvutusest. Välja tuua vajumi- ja stabiilsusarvutustele tuginevad riskid ja suurused, kui mullet tulevikus laiendatakse 2+2 peale.

Jah, kuigi lahendused ei ole üheselt välja toodud ja mõistetavad.

15. Kas on tõestatud järgmised suurused: vajum projektjoone suhtes, pikikalde muutuse %, põikkalde muutuse % 30 aasta jooksul [2.11]?

Jah, kuid see põhineb töövõtja enda koostatud uuel pinnaste arvutusmudelil, mille leidmist ei ole käsitletud, vaid välja on toodud ainult lõppresultaat. Ühelt poolt on tegemist veaga, kuna ei ole võimalik kontrollida, kas tehtud eeldused on õiged, teiselt poolt on tegemist ainuõige lähenemisega, kuna geotehniliste uuringute aruanne ei ole piisavalt põhjalik, mis võimaldaks esitada vajalikud arvutused nõutud täpsusega.

16. Kas aruande lõpus on toodud välja tehnilis-majanduslike elukaare põhjendustega, kui palju 2+2 valmidus tõstab maksumust ja kas see on mõistlik 30+ aastat silmas pidades.

Ei ole. Lk 4 on siiski mainitud, et liiklussageduse prognoosi kohaselt oleks mõistlik ehitada välja kohe 2+2 tee.

17. Kas töövõtjal oli min 3 liikmeline meeskond, kus min 1 geotehnik [p. 2.13]?

Jah.

18. Kas Are ümbersõidu teekonstruktsiooni lahendus on projekteeritud nii, et seda oleks võimalik hiljem optimaalsete kulutustega laiendada 2+2 peale [p. 3.6]?

Pigem jah. Lahendus ei ole üheselt mõistetavalt välja kirjutatud. Geotehniliste arvutuste põhjal saab järeldada, et looduslik olukord iseenesest võimaldab teed laiendada optimaalsete kulutustega ja see ei sõltu projekteeritud lahendusest.

19. Kas katendiarvutus on tehtud KAP 2.0-iga arvestades E_{vaj} = 309 MPa [p.3.7]? Märkus: p.2.10 lubas kasutada ka analoogse kliimavöötme juhiseid ja norme.

Jah. Kahele katendivariandile on katendiarvutus tehtud kasutades KAP 2.0 (kuigi E_{vaj} = 299.4 MPa), kuid määravaks on saanud katendiarvutus PMS Object´iga.

20. Kas väljatöötetud muldkeha on pikaajaliselt stabiilne ja tugev ning kas tagab järgmised nõuded [p. 3.9]:
    a. esimese 5 aasta jooksul vajum punase joone suhtes kuni 12 cm, pikikalde muutus kuni 0.24% ja põikkalde muutus kuni 0.6%;
    b. 30 aasta jooksul vajum punase joone suhtes kuni 30 cm, pikikalde muutus kuni 0.6% ja põikkalde muutus kuni 1.5%.

Jah. Vajumise kriteeriumid on tagatud. Stabiilsusarvutuste kohaselt ei ole tagatud PA 30 ja 40 ristlõike stabiilsus (kõrge muldkeha korral), kuid see väljendub pigem kohe, kui on pikaajaline probleem. Töös mainitakse, et stabiilsus tagatakse, kui kasutatakse nõlvust 1:2, kuid vastavat kontrollarvutust ei ole esitatud.

21. Kas mulle on projekteeritud lähtudes EVS-EN 1997, kas muldkeha ja dreenkihi eluiga on vähemalt 50 aastat ja kas aluspinnase tugevdamise eluiga 100 aastat [p. 3.9]?

Pigem jah. Juhul, kui kasutatakse aluspinnase stabiliseerimist, siis selles osas teave puudub. Samuti ollakse töös kahtleval seisukohal paekivisõelmete osas.

22. Kas on esitatud mulde tehnilised alternatiivid koos kirjeldustega [p. 3.10]?

Pigem jah, kuigi töö ülesehitus ja alternatiivide esitamine on kaootiline. Lugeja peab nägema palju vaeva mõistmaks, mis lahendusi ja alternatiive täpsemalt käsitletakse.

23. Kas kõikide variantide kohta on olemas minimaalselt 1 mulde stabiilsuse ja vajumi arvutus tee kilomeetri kohta ja kas sama on olemas 400 m tagant nõrkade aluspinnaste osas [p. 3.11]?

Jah, kuigi teised arvutustulemused puuduvad PA 30 ja PA 40 osas (v.t küsimuse 20 vastus).

24. Kas aruande kokkuvõttes on esitatud selgelt põhjendatud (tehniliselt, majanduslikult, keskkonna jm osas) ettepanek parima lahenduse osas, reastades eelistuse järjekorras ka ülejäänud variandid [p. 3.11]?

Ei ole.

25. Kas geotehniliste arvutuste lähteandmed on esitatud tabelite näol [p.3.12]?

Jah.

26. Kas arvutused on tehtud geotehnilisi arvutusi võimaldava tarkvaraga ja kas välja on toodud kõik kontrollväärtused [p. 3.12]?

Jah, kuigi vajumiarvutuste puhul ei ole välja toodud kihipaksusi ja stabiilsusarvutuste puhul on kihipaksuste kontroll tülikas.

27. Kas stabiilsus on tagatud arvestades EVS-EN 1997 nõudeid, kui liikluskoormus on 25 kN/m^2 [p. 3.12]?

Jah, kuigi kohtades, kus stabiilsusega leiti olevat probleeme (PA 30 ja 40), ei esitatud sellekohaseid täiendavaid arvutusi, kinnitamaks, et esitatud soovitusega teha nõlvad laugemaks (1.1.5 → 1:2), on stabiilsus tagatud.

28. Kas on arvestatud projekteerimisnormide järgsete nõlvustega [p. 3.12]?

Ei ole. Töös on käsitletud nõlvusi 1:1.5 ja 1:2. Projekteerimisnorm nõuab nõlvuse 1:1.5 korral põrkepiiret (kõrge muldkeha korral), mille kasutamist ei ole mainitud ega põhjendatud. Projekteerimisnormide paragrahv 3.5 p.8 ütleb, et kuni 3 m kõrguse muldkeha valitud nõlvust tuleb põhjendada, kui nõlvus ületab (on järsem): I – III klassi maanteel 1:3.

29. Kas maksumuste võrdluseks on kasutatud 2017. a maksumusi aruandest Teetööde ühikhinnad ja nende prognoos aastani 2022, TTÜ 2013a. [p. 3.13]?

Pigem jah, kuigi kõik ühikhinnad ja ühikud ei vasta nimetatud aruandele (kommentaariga on silmas peetud neid ühikhindu, mis aruandes sisalduvad; ERC töös on ka lahendusi, mille ühikhinnad aruandest puuduvad).

1.1.1. ERC Konsultatsiooni OÜ töö vastavus lähteülesandele

Töö ei vasta lähteülesande peamistele eesmärkidele ehk üheselt mõistetavat ja järgitavat metoodikat ei olnud esitatud. Koostatud ei olnud korrektset ja arusaadavat teekonstruktsiooni lahendust. Esitatud töö liigitub pigem I etapi, kui II etapi tööks, kui geotehnilised arvutused välja arvata.

Vastused esitatud küsimustele:

- jah – 13;
- pigem jah – 6;
- pigem ei või ei – 8.

27 küsimuse osas saadi seega kokku 16 punkti võimalikust 27-st. Esimesed kaks küsimust pidid moodustama 25% ja ülejäänud 27 küsimust 75% töö täitmise mahust. Kuna töö peamine eesmärk oli täitmata, siis 25% 100-st ei saa arvestada, mis tähendab, et töö oli kokkuvõttes tehtud vaid 0% + 45% = 45% ulatuses.

Tuleb rõhutada, et töö täitmise protsendi arvutamise näol on tegemist käesoleva ekspertiisi autori hinnanguga vastavuses tema etteantud (suhteliselt lihtsale) hindamiskriteeriumile. Täpsemaks hinnanguks tuleks eri küsimustele anda eri kaaluprotsendid (näiteks väga erinevad on küsimused, kas elukaareanalüüsist saadi vajalikud andmed või kas meeskond koosnes vähemalt kolmest liikmest), kuid lihtsustamise huvides lähtuti eelnevast.

Kokkuvõtteks tuleb ERC Konsultatsiooni OÜ töö osas öelda järgmist:

- töö on väga segase ülesehitusega;
- töö ei ole sisemiselt kooskõlaline;
- töös pole esitatud üheselt mõistetavat lahendust; pakutud lahendusi on mitmeid, mis erinevad üksteisest märkimisväärselt;
- töös on esitatud palju vastamata jäänud küsimusi;
- pigem on tegemist esimese etapi tööga, kui geotehnilised arvutused välja arvata.

Hoolimata kõigest on töö suur pluss püüdlus innovaatiliste lahenduste poole – aluspinnase stabiliseerimine, et vähendada transporditavate materjalide hulka, paekivisõelmete kasutamine ja arutlemine selles osas, et sõelmeid ja nõrka paekivikillustkku saaks kasutada seoses tsementstabiliseerimisega. Lahendused on siiski poolikud.

1.2. Škepast&Puhkim OÜ

Küsimused millele vastata:

1. Kas esitatud töödega on esitatud metoodika, kuidas koostada kohalike ehitusmaterjalidega tee konstruktsiooni [töö peamine eesmärk]?

Pigem jah. Töös on esitatud selgesti mõistetavad arutluskäigud, kuidas väljapakutud lahenduseni jõuti ja mis on töö lugejale korratav. Puudu on siiski metoodika kirjeldus, kuidas esitatud eeldusi kontrollida või kuidas kaasata praegustele normidele mittevastavaid materjale.

2. Kas on koostatud täismahus tee konstruktiivne lahendus [töö teine eesmärk]?

Jah. Esitatud on üheselt arusaadav lahendus.

3. Kas tee konstruktsioon koosneb kohalikest ehitusmaterjalidest (veokaugus kuni 50 km) [töö pealkirja nõue]?

Jah. Kompleksstabiliseeritud ja mustkillustiku segus on ette nähtud kasutada kohalikku dolomiitkivikillustikku. Muldkeha töötsooni alumises kihis on lubatud kasutada paekivisõelmete ja liiva segu vahekorras kuni 50/50 tingimusel, et segatud materjali filtratsioonimoodul on > 0.1 m/ööp (EVS 901:20) ning töötsooni all paekivisõelmeid tingimusel, et need ei püsiks veeküllastunud olekus.

4. Kas lagedal on tuisuohutuse nõue tagatud [p. 2.1]?

Jah.

5. Kas 2+1 lahenduse metoodika on koostatud nii, et neid saaks optimaalsete kulutustega ja tehniliste riskidega laiendada 2+2 peale nõrkade aluspinnaste korral [p.2.2…2.4]?

Jah.

6. Kas koostatud lahenduses on pikaajalise elukaareanalüüsi (30+ a.) põhjal optimaalseim [p. 2.3]?

Pigem ei (pigem ei saa küsimusele vastata). Eelduseks on võetud, et teekatendite eluiga on võrdne ja vahetust vajab vaid kulumiskiht. Kuna teekatendid on erinevad, siis võetud eeldus on väga üldistav. Pikaajalise elukaareanalüüsi tegemiseks on andmed katendikihtide vastupidavusest ja elueast puudulikud.

7. Kas konstruktsioonilahendused on kantud joonistele arvestades etteantud mõõteahelaid 2+2 ja 2+1 ristlõigetele [p. 2.5]?

Jah.

8. Kas esitatud on karjääride ja materjalide ülevaade 50 km raadiuses [p. 2.6.1]?

Jah.

9. Kas koostatud konstruktsioonides on kasutatud pehmeid paekivi kihte, sõelmeid jms karjäärides ülejäävat materjali [p. 2.6.2]?

Pigem jah. Tegemist on vaid loaga pehmemaid paekivikihte kasutada, kuid reaalsuses pole infot, kas see tagab teekatendi pikaealisuse (v.t küsimuse 6 kommentaar). Paekivisõelmete osas öeldakse, et neid võib kasutada sügavamal, kui 1.5 m juhul, kui need ei ole veeküllastunud olekus. Paekivisõelmete ja liiva segu vahekorras kuni 50/50 võib kasutada

muldkeha töötsooni aluskihtides tingimusel, et segatud materjali filtratsioonimoodul on vähemalt > 0.1 m/ööp. Sellekohane täpsustav kommentaar esitatakse peatükis 2.2 ja 2.3.

10. Kas koostatud lahenduse maksumust on võrreldud nii projekteerimisnormide järgse kui betoonkatendiga konstruktsiooni maksumusega arvutades elukaarekulud 30. aastale [p.2.6.3]?

Jah, kuigi tegelikult elukaareanalüüs ei võimalda enamat, kui vaid ehitusmaksumuste võrdlust.

11. Kas on koostatud Are ümbersõidu 2+1 mulde ja konstruktsiooni põhiprojekt väljatöötatud optimaalse lahendusmetoodika alusel [p.2.7]?

Jah.

12. Kas väljatöötatud optimaalse lahendusmetoodika ja Are ümbersõidu 2+1 mulde ja konstruktsiooni põhiprojekti alusel on tehtud ettepanekud *Muldkeha ja dreenkihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhise* täiendamiseks projekteeritavate jätkusuutlike 2+1 lahenduste mullete peatüki osas [p.2.7]?

Pigem ei. Ettepanekutega ei ole käsitletud konkreetselt 2+1 lahendust, vaid on antud eri soovitusi geotehniliste arvutuste osas.

13. Kas projekteerimisel on kasutatud Teemaaplaneeringu trassi telge [p.2.8]?

Jah.

14. Kas projekteeritud on minimaalselt 2 mulde- ja katendikonstruktsiooni – üks lagedal alal ja teine väljaspool lagedaid alasid [p.2.9]?
    a. Lagedal alal, kus teekatte kõrgus vähemalt 1.75 m, tuleb välja tuua vajumi- ja stabiilsusarvutustele tuginevad riskid ja suurused, kui mullet tulevikus laiendatakse 2+2 peale.
    b. Väljaspool lagedaid alasid sõltub kõrgus katendiarvutusest. Välja tuua vajumi- ja stabiilsusarvutustele tuginevad riskid ja suurused, kui mullet tulevikus laiendatakse 2+2 peale.

Jah.

15. Kas on tõestatud järgmised suurused: vajum projektjoone suhtes, pikikalde muutuse %, põikkalde muutuse % 30 aasta jooksul [2.11]?

Jah.

16. Kas aruande lõpus on toodud välja tehnilis-majanduslike elukaare põhjendustega, kui palju 2+2 valmidus tõstab maksumust ja kas see on mõistlik 30+ aastat silmas pidades.

Jah.

17. Kas töövõtjal oli min 3 liikmeline meeskond, kus min 1 geotehnik [p. 2.13]?

Jah.

18. Kas Are ümbersõidu teekonstruktsiooni lahendus on projekteeritud nii, et seda oleks võimalik hiljem optimaalsete kulutustega laiendada 2+2 peale [p. 3.6]?

Jah.

19. Kas katendiarvutus on tehtud KAP 2.0-iga arvestades E_{vaj} = 309 MPa [p.3.7]? Märkus: p.2.10 lubas kasutada ka analoogse kliimavöötme juhiseid ja norme.

Jah.

20. Kas väljatöötetud muldkeha on pikaajaliselt stabiilne ja tugev ning kas tagab järgmised nõuded [p. 3.9]:
    a. esimese 5 aasta jooksul vajum punase joone suhtes kuni 12 cm, pikikalde muutus kuni 0.24% ja põikkalde muutus kuni 0.6%;
    b. 30 aasta jooksul vajum punase joone suhtes kuni 30 cm, pikikalde muutus kuni 0.6% ja põikkalde muutus kuni 1.5%.

Jah.

21. Kas mulle on projekteeritud lähtudes EVS-NE 1997, kas muldkeha ja dreenkihi eluiga on vähemalt 50 aastat ja kas aluspinnase tugevdamise eluiga 100 aastat [p. 3.9]?

Jah.

22. Kas on esitatud mulde tehnilised alternatiivid koos kirjeldustega [p. 3.10]?

Jah.

23. Kas kõikide variantide kohta on olemas minimaalselt 1 mulde stabiilsuse ja vajumi arvutus tee kilomeetri kohta ja kas sama on olemas 400 m tagant nõrkade aluspinnaste osas [p. 3.11]?

Jah.

24. Kas aruande kokkuvõttes on esitatud selgelt põhjendatud (tehniliselt, majanduslikult, keskkonna jm osas) ettepanek parima lahenduse osas, reastades eelistuse järjekorras ka ülejäänud variandid [p. 3.11]?

Pigem jah. Eraldi kokkuvõtet ei ole tehtud, lahendused sisalduvad töös.

25. Kas geotehniliste arvutuste lähteandmed on esitatud tabelite näol [p.3.12]?

Jah.

26. Kas arvutused on tehtud geotehnilisi arvutusi võimaldava tarkvaraga ja kas välja on toodud kõik kontrollväärtused [p. 3.12]?

Jah.

27. Kas stabiilsus on tagatud arvestades EVS-EN 1997 nõudeid, kui liikluskoormus on 25 kN/m^2 [p. 3.12]?

Jah, kuigi ei ole arvestatud Eesti rahvusliku lisa soovitustega.

28. Kas on arvestatud projekteerimisnormide järgsete nõlvustega [p. 3.12]?

Jah.

29. Kas maksumuste võrdluseks on kasutatud 2017. a maksumusi aruandest Teetööde ühikhinnad ja nende prognoos aastani 2022, TTÜ 2013a. [p. 3.13]?

Jah.

1.2.1. Škepast&Puhkim OÜ töö vastavus lähteülesandele

Töö pigem vastas esitatud peamistele eesmärkidele ehk esitati üheselt mõistetav ja järgitav metoodika ning koostati korrektne ja arusaadav teekonstruktsiooni lahendus. Metoodika osas oli siiski puudu selle sügavam tähendus ehk see, kuidas kontrollida esitatud eelduste paikapidavust (näiteks kas MUK kihis võib kasutada LA 40 kivi või kas mulle on piisavalt kõrge takistamaks kapillaartõusu teekonstruktsiooni jne) ja kas seetõttu on elukaareanalüüs pädev.

Vastused esitatud küsimustele:

- jah – 23;
- pigem jah – 2;
- pigem ei või ei – 2.

27 küsimuse osas saadi seega kokku 24 punkti võimalikust 27-st. Esimesed kaks küsimust pidid moodustama 25% ja ülejäänud 27 küsimust 75% töö täitmise mahust. Töö peamine eesmärk oli osaliselt täidetud, millest tuleb 15% 100-st. Seega on Škepasti&Puhkimi töö tehtud 15% + 67% = 82% ulatuses. Tuleb rõhutada, et töö täitmise protsendi arvutamise näol on tegemist käesoleva ekspertiisi autori hinnanguga vastavuses tema etteantud (suhteliselt lihtsale) hindamiskriteeriumile. Täpsemaks hinnanguks tuleks eri küsimustele anda eri kaaluprotsendid (näiteks väga erinevad on küsimused, kas elukaareanalüüsist saadi vajalikud andmed või kas meeskond koosnes vähemalt kolmest liikmest), kuid lihtsustamise huvides lähtuti eelnevast.

Kokkuvõtteks tuleb Škepasti&Puhkim OÜ töö osas öelda järgmist:

- töö vastas suures osas esitatud lähteülesandele;
- tehtud on mõningaid eeldusi, mis on põhjendamata ning ei ole esitatud metoodikat, kuidas põhjendusteni jõuda;
- töö on väga konkreetne, selge ja lihtsasti jälgitav;

Töös antud lahendused ei ole kuigi innovaatilised, kuid need on pigem toimivad ja lihtsasti teostatavad. Esitatud ei ole metoodikat, kuidas leida võimalusi erinevate kohalike materjalide efektiivsemaks kasutamiseks, pigem on järgitud praegugi kehtivaid põhimõtteid ja nõudeid.

2. MÄRKUSED, KÜSIMUSED JA VÕRDLUSED

Tööde analüüsimisel tekkis ekspertmeeskonnal mitmeid märkusi ja küsimusi, mida hakatakse järgnevalt käsitlema.

2.1. ERC Konsultatsiooni OÜ

Peatükis 2 on antud karjääride ja materjalide ülevaade, mis vähemalt osaliselt põhineb Rail Balticu ehitamiseks vajalike ehitusmaavarade varustuskindluse uuringule. Tuleb märkida, et Are ümbersõidu jaoks on tegemist teoreetiliselt, mitte praktikas kasutatavate andmetega. Korrektsem oleks olnud esitada vaid need karjäärid ja andmed, millega töövõtjad saavad arvestada. Tabelis 2.1 on antud põhjalik ülevaade killustiku tootmiseks sobivate karjääride/mäeeraldiste osas. Töös esitatud lahenduste (eriti kõrge muldkehaga teekonstruktsiooni) puhul oli suur osatähtsus liival, mille osas oleks võinud samuti välja tuua konkreetsed karjäärid, kaevandamismahud ja veokaugused.

Näiteks on muldkeha materjalina välja pakutud kasutada paekivisõelmete ja liiva segu. Kust tuleb selleks liiv ja mis karjäärist sõelmed ning kus ja kuidas materjalid omavahel kokku segada – seda pole töös käsitletud. Etteruttavalt öeldes on Škepast&Puhkim töös küll loetletud ka liivakarjäärid, kuid samuti ei ole käsitletud liiva ja sõelmete segamisvõimalusi.

Suurim piirkonna karjäär, millest saada sõelmeid, on Analema dolokivikarjäär. Selle kõrval ei paikne ühtegi liivakarjääri. Kõige lähemal paiknevad on Pitsalu liivakarjäär ja Selja kruusakarjäär. Veidi kaugemal on näiteks Eassalu kruusakarjäär ja Seljametsa liivakarjäär, aga neid on veelgi. Nimetatud karjääride kaugus Arest ei ole tõenäoliselt nii suur, et see saaks määravaks ehitushinna moodustumisel, mistõttu ei ole võimalik välja valida ühte konkreetset kohta.

Eksperdil õnnestus tootjalt saada Eassalu karjääri ühe liivaproovi katseandmed, mille alusel oli selle filtratsioonimoodul 4.0 m/ööp (EVS 901:20) ja sõelkõver tabelis 1, millest nähtub, et käsitletav liiv oleks igati sobilikuks materjaliks, mida segada sõelmetega (ühtlaseterine ja väikese peenosiseprotsendiga). Sellest järgmine samm on teoreetiliselt segada liiv ja sõelmed omavahel kokku nägemaks, mis sõelkõver sealt moodustuks ja mille alusel saaks hinnata filtratsioonimoodulit, kapillaartõusu ja külmakerkelisust. Järgmine samm on laborikatsed, mille tulemusi saab kasutada arvutustes. Taoline arutluskäik võinuks töös sisalduda, millega saaks põhjendada esitatud ettepanekut.

Seega on vaadeldavas ERC töös jäetud vajalik analüüs karjääride paiknemise, varude ja sobilikkuse osas poolikuks.

Tabel 1. Eassalu karjääri liiva terakoostis.

Tulemused:

1. Terastikuline koostis ja peenosiste sisaldus / EVS-EN 933-1

Sõel, mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	6,3	8	12,5	16	20
Läbind, %	2,2	3	16	64	87	94	97	98	98	99	99	100

Peatükis 3 on esitatud lühikokkuvõte esimese etapi lahendusest ja sellest, et II etapi üheks eritingimuseks oli tuisuohutu mulde kõrguse kasutamine, mistõttu ei olnud võimalik rakendada esimese etapi kõiki ideid. Siinkohal tuleb nõustuda tellija seisukohaga, et tuisuohutu kõrguse nõudest loobumiseks ei ole esitatud vajalikke argumente või näiteid.

Peatükis 4 on käsiteletud materjalide omadusi ja mõõtmisi. Enamus tekstist ei puuduta lähteülesandes etteantud küsimuste lahendamist, mistõttu on peatüki vajadus küsitav.

Peatükis 5 käsitletakse mulde materjale ja katendi konstrueerimist. Tegemist on palju küsimusi tekitava ja segase peatükiga.

Peatükis on suurt rõhku pandud savipinnase stabiliseerimisele. Esimese põhjustena tuuakse välja see, et tuleb tagada töötingimused ehitusprotsessiks (lk 19 esimene lõik: „Analoogselt põhivariandiga on kavas kasutada aluspinnase töötlemist, mis tagab töötingimused ehitusprotsessiks“).

- kui ehitustehnikaga ei ole võimalik savi pinnal liikuda, kuidas on võimalik seda stabiliseerida? Lk 16 esimene lõik ütleb, et *pinnase stabiliseerimise tööprotsessid on samad, kui teekatendi stabiliseerimisel*. Selleks on vaja laotada sideainet ja väga suure tõenäosusega on vaja lisada vett, mis eeldab savipinnasel liiklemist enne, kui lisatav sideaine hakkab mõjuma ja eeldatavalt väga nõrk kandevõime tõuseb.
- lahendusena on pakutud killustikust või liivast 10 cm paksuse tehnoloogilise kihi rajamist (lk 16 kolmas lõik ja lk 18 esimene lõik). Kui stabiliseerimiseks vajalik tehnika ei saa savil liigelda, ei ole võimalik ka tehnoloogilist kihti rajada. Nii õhuke killustikukiht ei taga killustikku kaotavale tehnikale piisavalt tugevat alus (ehk seda ei ole võimalik ehitada) ja kui tagakski, siis ei ole stabiliseerimist enam väljatoodud põhjusel vajadust teha.

Savikihi stabiliseerimine on vaid ehitustehnika liiklemise tagamiseks tarbetu. Seda enam, et peatükis 9 tuuakse välja, et enamikes uuringupunktides on mulla all savist kuivamiskoorik ehk materjal ei ole pehme ega voolav. Lihtsam, kiirem ja odavam meetod on rajada muldkeha eraldavale geotekstiilile nii, et ehitusmasinad liiklevad paigaldatud täitematerjalil.

Teiseks põhjuseks stabiliseeritud kihi rajamisel on kapillaartõusu takistamine. Selle vajadust on põhjendatud peatüki 5.2 alguses, kus öeldakse, et kohalike madalakvaliteediliste materjalide kasutus muldkehas on võimalik juhul, kui muldkeha konstruktsiooni vee sattumine välditakse. Allpool pakutakse selleks materjaliks killustikusõelmete (kas selle all mõeldakse paekivisõelmeid fr. 0…4 või midagi muud?) ja liiva segu vahekorras 50/50.

- ei ole põhjendatud, miks on vaja takistada täielikult vee ligipääs 50/50 vahekorras olevale segumaterjalile. Nimelt nähakse ette, et üles tuleb paigaldada kontrollitult madala filtratsiooniga materjal ja alla dreenmatt või stabiliseeritud kiht. Paekivisõelmete ja liiva omavaheline segamine on väga töömahukas protsess, mis samas muudab oluliselt sõelmete terastikulist koostist (vähendab peenosiste protsentuaalset sisaldust), mis eelduslikult tähendab väiksemat tundlikkust vee ja külmumise suhtes. Kui lisaks segamisele on vajalik veel ka muude (kulukate) meetmete järgi, ei ole paekivisõelmete kasutamine enam otstarbekas.

Lk 17 käsitletakse uuesti seda, kuidas tagada ehitustehnika liikumine peale kasvupinnase eemaldamist. Selleks on antud kolm võimalust – 1. savipinnase jäätmetäitematerjaliga mehaaniline stabiliseerimine (savikihi peale tuleb fr 0/125 kiht); 2. savi stabiliseerimine akrüülpolümeerstabilisaatoriga LBS; 3. savi tsementstabiliseerimine kasutades Stabilroad lisandit.

- Kui liiklemine tagatakse jäätmetäitematerjali kihiga, siis stabiliseerimist enam teha ei saa ja kapillaartõus takistatakse dreenmati kasutamisega (lk 18 lõik 2). See eeldab, et pind jääks tasakseks ja ühtlaste kalletega, pinda ei tohi tekkida roopaid, mis hakkaksid hiljem vett koguma ja mistõttu dreenmatt ei täida oma ülesannet (töös pole esitatud ka andmeid selle kohta, kas dreenmatt tegelikult takistab kapillaartõusu või mitte). Ei ole

täpsustatud, kui paks peab olema fr. 0/125 kihipaksus. Kihi rajamise vajadus vaid ehitustehnika ehitusaegse liiklemise jaoks on küsitav – miks ei võiks kohe rajada esimese kihi muldkeha, mille peal saaksid ehitusmasinad liigelda.

- Stabiliseerimine on ette nähtud teha nii, et sideaine lisatakse pinnasele liikursegistiga. Lk 18 esimene lõik ütleb, et stabiliseerimisprotsess eeldab tehnoloogilise killustiku või liivakihi paigaldamist (piisab 10 cm, kuid materjalina ei tohiks kasutada sõelmeid või paeliiva). Kuna tegemist on tehnoloogilise kihiga, mis seguneb saviga ja jääb stabisegu koostisesse, siis miks ei tohi kasutada paesõelmeid? Kuidas tehnoloogiline kiht ehitatakse – nimelt tuleb materjal ehitusmasinatega järk-järgult savi peale paigaldada; 10 cm materjalikiht seguneb saviga juba peale ühe traktori, veoki, dumperi ülesõitu, mistõttu ei ole see võimalik? 10 cm paksust kihti (plastsele) savile paigaldada ei ole võimalik ja selle peal ei saa sõita rasketehnikaga.
- Lk 17 öeldakse LBSi osas, et see vähendab savipinnase plastsust, mistõttu liigitlub stabiliseeritud materjal liivaks ja mille elastsusmooduliks saab arvestada 180 MPa. Lk 18 lõigus 2 öeldakse samas, et stabiliseeritud kiht töötab membraanina, mis tõkestab vee liikumise. Kui savipinnas muutub liivaks, siis kuidas saab see samaaegselt töötada membraanina?
- Kas tsementstabiliseerimine sobib muldkeha alla jääva savipinnase stabiliseerimiseks (isegi koos elastsust suurendava lisandiga)? Nimelt tsement tekitab tugevad sidemed, mistõttu tekivad muldkeha alla klombid, mitte ühtne, monoliitne kiht, mistõttu on kaheldav, et see moodustaks membraani (tõenäoliselt küll väheneks kapillaartõusu võimalikkus).

Lk 18 lõigus 4 öeldakse, et stabiliseeritud materjalide kapillaartõusu tuleb laboratoorsel teel uurida.

- Eelnevas tekstis on käsitletud tsementstabiliseeritud ja ka LBS kihti kui kapillaartõusu takistava materjalina. Ei ole mõeldav, et kõigepealt esitatakse lahendus ja hiljem tekstis kaheldakse selle toimivuses.

Mitmes kohas mainitakse, et vajalik on mingi materjali omaduse määramine:

- lk 16 viimane lõik: „moodul on mõistlik laboratoorsel teel määrata“;
- lk 17 stabiliseerimist puudutava osas ei ole teada kulunorme rääkimata tekkiva materjali omadustest.
- lk 18 neljas lõik: „Nii stabiliseeritud materjalide kui aluspinnase ja muldkehasse planeeritud kohalike materjalide segu (paekivisõelmed + liiv) kapillaartõusu tuleb laboratoorsel teel uurida“.
- lk 18 viies lõik: „segu omaduste kohta puudub adekvaatne info. Segu eeldatavate omaduste osas ei ole ka eksperdid ühel meelel, mistõttu on tarvilik laboratoorne analüüs“. Lisaks öeldakse, et samuti on vaja stabiliseeritud pinnase omaduste kohta laboratoorseid katseid, ühesõnaga tekkiva kihi omaduste osas ei ole usaldusväärset infot.
- lk 19 lõik 2: „Sõltuvalt valitud stabiliseerimise meetodist tuleb laboratoorsel teel määrata stabiliseeritud materjali paisumistegur külmumisel“.

Kuna esitatud lahenduste toimivused sõltuvad otseselt kasutamiseks ettenähtud materjalide omadustest, siis esitatud küsimuste lahendamine pidanuks kuuluma töö koosseisu. Projektset lahendust ei ole võimalik välja pakkuda ja välja töötada teadmata kasutamiseks ettenähtud materjalide omadusi. Selle kohta oli töö lähteülesandes ka eraldi punkt: p. 3.3 „vajadusel tuleb

Töövõtjal teha omale lisauuringud ja katsetused“. See on ka peamiseks põhjuseks, miks järeldati peatükis 1.1.1 „pigem on tegemist esimese etapi tööga“.

On tõsi, et laborikatsetused nõuavad palju aega, mis on tõenäoline põhjus, miks jäid hädavajalikud laborikatsetused tegemata. Siinkohal tuleb märkida, et paekivisõelmete osas on Eestis tehtud mitmeid uuringuid (näiteks Tallinna Tehnikakõrgkoolis aastal 2014 koostatud Kaevandamise jääkmaterjalide kasutusvõimaluste uuring), mida oleks saanud edukalt kasutada.

Lisaks segadusele muldkeha osas, on ebaselge ka katendikonstruktsioon. Ei ole esitatud üheselt mõistetavad konstruktsiooni.

- Peatükis 5.3 öeldakse, et otstarbekas on stabiliseerida aluspinnas ja rajada kraavid kohe täislaiuses vastavuses 2+2 ristlõikele ning kujundada ristlõike kitsamas osas lamedam nõlvakalle. Kas see on projektne lahendus? Nimelt töös ei sisaldu ühtegi joonist tee ristlõike osas ja geotehnika peatükk 9 käsitleb laiendamist vaid niipalju, kui ütleb lk 48 neljandas lõigus, et stabiilsus ei erine 2+1 ja 2+2 ristlõigetel, seega ei eksisteeri vajadust koheseks 2+2 ristlõike välja ehitamiseks.
- Lk 19 lõik 3 esitab katendikonstruktsiooni osas valiku kasutada kas 15 cm kompleks- või 20 cm tsementstabiliseeritud (Stabilroad lisandiga) alust. Kumbat tuleb projektse lahenduse käigus kasutada?
- Lk 19 lõik 4 toob välja, et stabiliseeritud aluse all on 12 cm killustikust tehnoloogiline kiht, mis töötab ka dreenkihina. Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis defineeritakse tehnoloogilist kihti kui kihti, mis ei ole katendi toimivuseks vajalik. Kas on tegemist mõistete ebakõlaga või kui ole, siis mille alusel on leitud, et 12 cm on dreenkihiks piisav?
- Mis on lõplik teekonstruktsioon? Lk 20 on tekstis nimetatud 7 cm AC 32 base ja 3+1 cm AC16 või 20 surf ning eelnevalt 12 cm killustikust dreenkihti, kuid all olevates tabelites on numbrid teised.

Maksumuse tabelis lk 20 ei ole kõik andmed korrektsed:

- 2+1 puhul on asfaltkatte laius 14.0 m, kuid kõrge muldega asfaltbetoonkattega konstruktsioonis on arvestatud laiusega 16.0 m. Seega on ehituse maksumuse hind ebakorrektne;
- Kõrge muldkehaga on killustiku kihi paksus 31 cm (kas peaks olema 21 cm nagu eelnevas tabelis?) ja kihi ühikhind ei ole korrektne ei 31 ega ka 21 cm puhul;
- KS32 hind on arvestatud teel segamisega ja freespuru kasutamisega. Kirjelduses on kirjutatud, et KS peab olema uutest materjalidest, mistõttu ühikhind peab olema kõrgem;
- Kõrge muldkehaga täitematerjali kihipaksus on 153.5 cm, kuid üleval tabelis on 147 cm. Kuidas tuli kokku selle ühikhind 14.70 EUR/m^2?
- Stabiliseeritava aluspinnase maksumuseks on arvestatud 6 EUR/m^2, kuid kuskil ei sisaldu selle ehitamiseks vajaminevat tehnoloogilist kihti ilma milleta seda ehitada ei saa ja mis tõstab seega stabiliseerimise hinda.
- Madala muldkeha asfaltbetoonkattega kõrguse number on tabelis vale – kui kõrge muldkeha puhul on stabiliseeritud alus muldkeha kõrguse osas välja jäetud, siis madala muldkeha puhul on see sisse arvestatud. Muldkeha kõrgus peab olema 94 cm, millele lisandub 30 cm stabiliseerimist. Sama lugu betoonkattega – tee kõrgus on 70 cm, millele lisandub 20 cm stabialus;

- Madala muldkehaga asfaltbetoonkatte ühihkinnad ei ole korrektsed – valed on AC base, KS32 ja killustik. Kuidas on leitud juurdeveetava täitematerjali ühikhind? Stabiliseeritud aluse ühikhind on erinev kõrge muldkehaga lahenduse ühikhinnast, kuigi peaks olema sama.
- Kõrge muldkeha puhul on täitematerjali kihipaksus 147 cm, kuid madala muldkeha puhul 35 cm. Ühikhinnad on arvestatud vastavalt 14.7 ja 9.57 EUR/m^2 – arvestades kihipaksusi, on ühihkinna erinevus liiga väike. 9.57 EUR/m^3 on dreenkihi ühikhinnaks, kuid mitte ühe ruutmeetri, vaid kuupmeetri osas.
- Hinnakalkulatsioonis pole arvestatud geosünteetide maksumusega, kuid neid mainitakse töös mitmetes kohtades (kohati märkimisväärsetes mahtudes).

Eksperdi poolt korrigeeritud hinnatabel koos kommentaaridega on esitatud alljärgnevas tabelis (tabel 2), millest nähtub, et hinnaerinevused võrreldes esitatud tööga on märkimisväärsed. Lisaks ühikhindadele korrigeeriti ka kihtide laiusi vastavalt joonistatud tüüpristlõikele, milles muldkeha nõlvusena kasutati 1:2 (lk 48 lõik 6) arvestusega, et KS ja killustikukihid ulatuvad nõlvani (kuigi reaalses konstruktsioonis oleks KS kiht veidi kitsam).

Kuna betoonkattega teekonstruktsioonis annab määrava osa hinnast betoonkate, siis muude kihtide laiuste ja ühikhindade täpsustamine tulemust praktiliselt ei muuda. Siiski tekitab küsimusi, miks on betoonkattega teel ette nähtud killustiku kasutamine kolmes erinevas kihis ja miks tsementstabiliseerimise all peab olema 8 cm graniitkivikillustikku? Kas tehakse samuti savipinnase stabiliseerimine 30 cm sügavuselt?

NB! Kuna elukaarearvutustes on kasutatud lk 20 ja 21 toodud andmeid, siis pole ka see korrektne.

Tabel 2. Korrigeeritud maksumuste tabel.

Kihi nimetus	Kihi paksus, cm	Kihi laius, m	Ühikhind, EUR/m2	Maksumus (EUR/km)	Kokku	
Kõrge muldega asfaltbetoonkate						
SMA	4	14.0	12.21	170940	1094016	
AC bin (surf)	4	14.1	8.33	117453	751699.2	
AC base	11.5	14.2	15.61	221662	1418637	
KS32	15	16	6.93	110880	709632	hind oli teel segamisega. Uutest materjalidest 50% kallim(?)
Killustik LA35	21	16.7	6.61	110387	706476.8	kihipaksus ja ühikhind valed
Täitematerjal 147 cm	147	20.1	14.7	295470	1891008	paesõelmed + liiv 50/50 (kuidas leiti ühikhind?)
Stabi alus 30 cm	30	23	8.0	184000	1177600	arvestades tehnoloogilist kihti
	202.5	Maksumus kokku		**1210792**	**7749069**	
Madala muldega asfaltbetoonkate						
SMA	4	14.0	12.21	170940	1094016	
AC bin (surf)	4	14.1	8.33	117453	751699.2	
AC base	12	14.2	16.29	231318	1480435	ühikhind vale
KS32	18	16.1	8.31	133791	856262.4	hind oli teel segamisega. Uutest materjalidest 50% kallim(?)
Killustik LA35	21	16.9	6.61	111709	714937.6	ühikhind vale
Täitematerjal	35	18	3.5	63000	403200	hind peab olema madalam
Stabi alus 30 cm	30	19	8.0	152000	972800	
	94	Maksumus kokku		**980211**	**6273350**	

Peatükis 6 käsitletakse katendi arvutuste süsteeme, mis annab lihtsalt töö koostaja seisukohast ülevaate erinevatest katendiarvutuse metoodikatest.

Peatükk 7 käsitleb konstruktsiooni arvutusi, kus sisalduvad erinevad konstruktsioonid, kuid kõigepealt tuleb välja tuua need konstruktsioonid, mida käsitleti peatükis 5:

1. Kõrge muldega ja asfaltkattega lahendus

- 4 cm SMA;

- 4 cm AC bin;
- 11,5 cm AC base;
- 15 cm KS32 (uutest materjalidest)
- 21 cm killustik LA 35
- 147 cm killustikusõelmete ja liiva segu (50/50);
- Vahetult peale kasvupinnase eemaldamist tehakse savipinnase stabiliseerimine (30 cm), mis elimineerib riski, et sademed takistavad töödega alustamist (lk 16 teine lõik). Kui stabiliseerimine on mehaaniline, kasutatakse dreenmatti, kui keemiline, siis ehitatakse muldkeha otse sellele.

2. Madala muldega ja asfaltkattega lahendus

- 4 cm SMA;
- 4 cm AC bin;
- 12 cm AC base;
- 18 cm KS32 (uutest materjalidest)
- 21 cm killustik LA 35
- 35 cm killustikusõelmete ja liiva segu (50/50);
- Vahetult peale kasvupinnase eemaldamist tehakse savipinnase stabiliseerimine (30 cm), mis elimineerib riski, et sademed takistavad töödega alustamist (lk 16 teine lõik). Kui stabiliseerimine on mehaaniline, kasutatakse dreenmatti, kui keemiline, siis ehitatakse muldkeha otse sellele.

3. Madala muldega ja betoonkattega lahendus

- 4 cm SMA;
- 21 cm betoonkate;
- 15 cm TS32;
- 8 cm 0/32 tardkivikillustik;
- 22 cm 16/64 paekivikillustik;
- 20 cm killustik (LA35);
- Vahetult peale kasvupinnase eemaldamist tehakse savipinnase stabiliseerimine (20 cm ?), mis elimineerib riski, et sademed takistavad töödega alustamist (lk 16 teine lõik). Kui stabiliseerimine on mehaaniline, kasutatakse dreenmatti, kui keemiline, siis ehitatakse muldkeha otse sellele.

Peatükk 7 jätkab teistsuguste konstruktsioonidega:

<u>Lk 26 esimene lõik toob välja valitud konstruktsiooni:</u>

1. 4 cm SMA/AC surf;
2. 4 cm AC bin;
3. 14 cm AC base;
4. 25 cm TS/Sr;
5. 55 cm killustikalus;
6. 80 cm liivpinnas.

Mis konstruktsioon see on, miks on see valitud ja miks kasutatakse seda kontrollarvutustes, kui eelnevalt esitatud lahenduses kasutati teistsugust katendit?

Lk 26 tabelis on esitatud Soome juhendi järgi arvutatud katend, milles kihipaksused on järgmised:

1. 15 cm asfaltbetoon;
2. 15 cm KS32;
3. 12 cm killustik (LA35);
4. 107 cm kohalik segatud täitematerjal;
5. 30 cm stabiliseeritud savipinnas;
6. Looduslik savipinnas.

Mis konstruktsioon see on, miks on see valitud ja miks kasutatakse seda kontrollarvutustes, kui eelnevalt esitatud lahenduses kasutati teistsugust katendit?

Peatükk 7.3.1 jätkab järgmiste katenditega (konstruktsiooni arvutused kõrge mulde korral):

Konstruktsioon A (kogupaksus 160 cm):

1. 4 cm kulumiskiht;
2. 4 cm AC bin;
3. 15 cm AC base;
4. 8 cm kiilekillustik;
5. 42 cm paekivikillustik (LA 35);
6. 87 cm liiv (E = 50 MPa);
7. Aluspinnas savi E = 15 MPa.

Konstruktsioon B (kogupaksus 175 cm):

1. 4 cm kulumiskiht;
2. 5 cm AC bin;
3. 15 cm AC base;
4. 30 cm killustikalus (kaheosaline – ülemine tardkivi, alumine paekivi LA 35);
5. 37 cm liiv (70 MPa);
6. 84 cm täitepinnas (35 MPa);
7. Aluspinnas savi E = 15 MPa.

Konstruktsioon C (kogupaksus 209 cm):

1. 4 cm kulumiskiht;
2. 4 cm AC bin;
3. 11.5 cm AC base;
4. 15 cm KS32;
5. 21 cm killustikalus;
6. 153.5 cm liiv (70 MPa);
7. Aluspinnas savi E = 10 MPa.

Peatükis 7.3.2 esitatakse järgmised katendid (konstruktsiooni arvutused madala mulde korral):

Konstruktsioon D (kogupaksus 95 cm):

1. 4 cm kulumiskiht;
2. 5 cm ACbin;
3. 23 cm tsementstabiliseeritud kiht Stabilroad lisandiga (segus kasutatakse paekivisõelmeid);
4. 24 cm killustik LA 40;

5. 39 cm liiv (E = 70 MPa);
6. Aluspinnas (100 cm savi E = 15 MPa, mille all savi E = 10 MPa).

Teine konstruktsioon on komplekssstabiliseeritud alusel ja see kattub lk 20 esimeses tabelis toodud katendiga.

Seega töös sisaldub 6 eri varianti teekonstruktsioonidest, mida kasutada kõrge muldkeha puhul (üks peatükis 5.4 ja viis varianti peatükis 7) ja kaks eri varianti, mida kasutada madala muldkeha korral, mistõttu on töö väga raskesti jälgitav.

Arvutuses kasutatud elastsusmoodulitest

Lk 28 on stabiliseeritud savikihi elastsusmooduliks nimetatud 180 MPa, sama väärtus on antud külmakartlikule liiva ja paesõelmete segule (180 MPa). Varasemalt esitatud arvutustes on mõlemate väärtuseks arvestatud 150 MPa.

> Võrdluseks, Elastsete teekatendite projekteerimise juhendis 2001-52 on paetuha elastsusmoodul sama, mis keskliival (120 MPa), kuid sisehõõrdenurk on väiksem. Millest tuleneb töö autorite eeldus, et segumaterjali elastsusmoodul on kõrgem, kui liival?

Lk 28 on stabiliseeritud aluse elastsusmoodulina kasutatud 1000 MPa, kuid lk 31 on 800 MPa.

Peatükk 8 on tõenäoliselt jäänud poolikuks.

Peatükid 9 ja 5.5 (ehk geotehnilised arvutused)

Lähteandmetest

ERC töös on koostatud uus pinnaste arvutusmudel, mille vajadus on hästi ära põhjendatud. Siiski ei esitata seda, kuidas kasutatud väärtused on tulnud, mis samas ei tähenda, et parameetrid oleksid valed ja arvutustulemus ebaõige (v.t Mait Metsa seisukoht lisa 4).

Vajumiarvutustest

Peatükis 5.5 öeldakse, et hiljem on võimalik ehitada teed laiemaks ilma ebaühtlase vajumi riskita. Peatükis 9 seda täpsustatakse lausega, et arvutatud vajumid ja vajumierinevused jäävad maksimaalselt lubatud väärtustest väiksemaks.

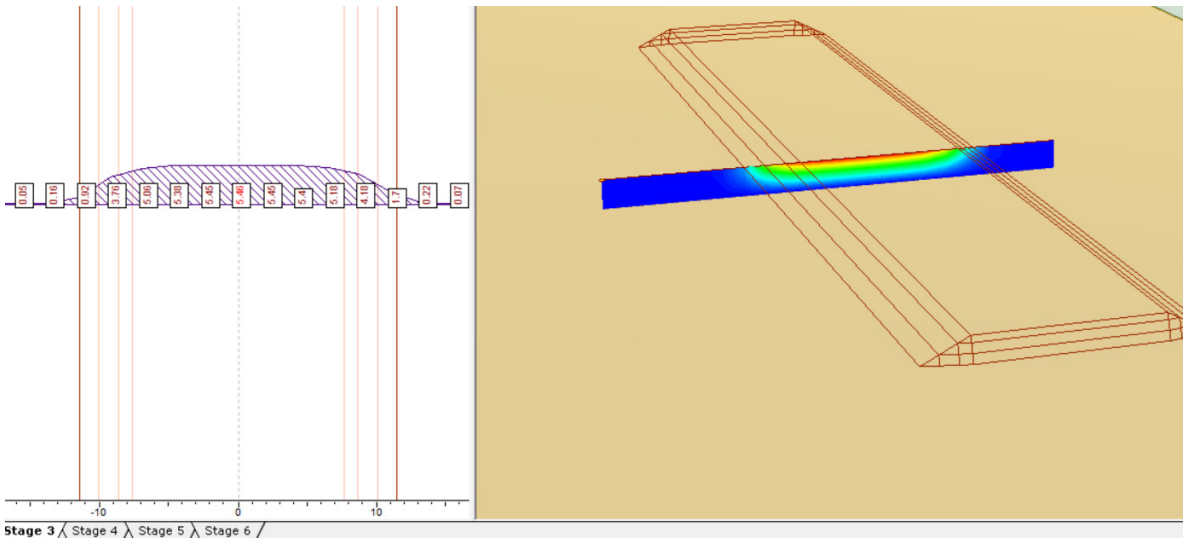
Geotehnilised arvutused on tehtud nii, et kõigepealt on vaadeldud muldkeha laiusega, mis vastab 2+1 ja seejärel 2+2. Arvestades töö lähteülesannet, milleks oli analüüsida tee laiendamise võimalusi, siis arvutusskeem ei olnud sellekohane. Nimelt arvutustes on samadel tingimustel võrreldud 2+1 ja 2+2 lahendusi, kuid ei ole arvutatud olukorda, kui 2+1 on valmis ehitatud ja ära vajunud ning peale mida (näiteks 20 a pärast) laiendatakse tee ühte poolt. Seetõttu on raskesti jälgitav, missugused vajumid toimuvad tee laiendamise tagajärjel. 2+1 tee telg tuleb jätta paigale, lisada juurde tee laiendus peale mida on võimalik näha, kuidas ja mis ulatuses toimuvad ebaühtlased vajumised.

Ekspert arvutas tee laiendamise olukorra läbi samade pinnaseandmetega, mis oli kasutatud ERC töös, kuid selle käigus selgus, et ERC töös on vajumiarvutus suhteliselt halvasti jälgitav sellesmõttes, et pole toodud välja ei muldkeha kihte ega selle alla jäävate pinnaste kihipaksusi.

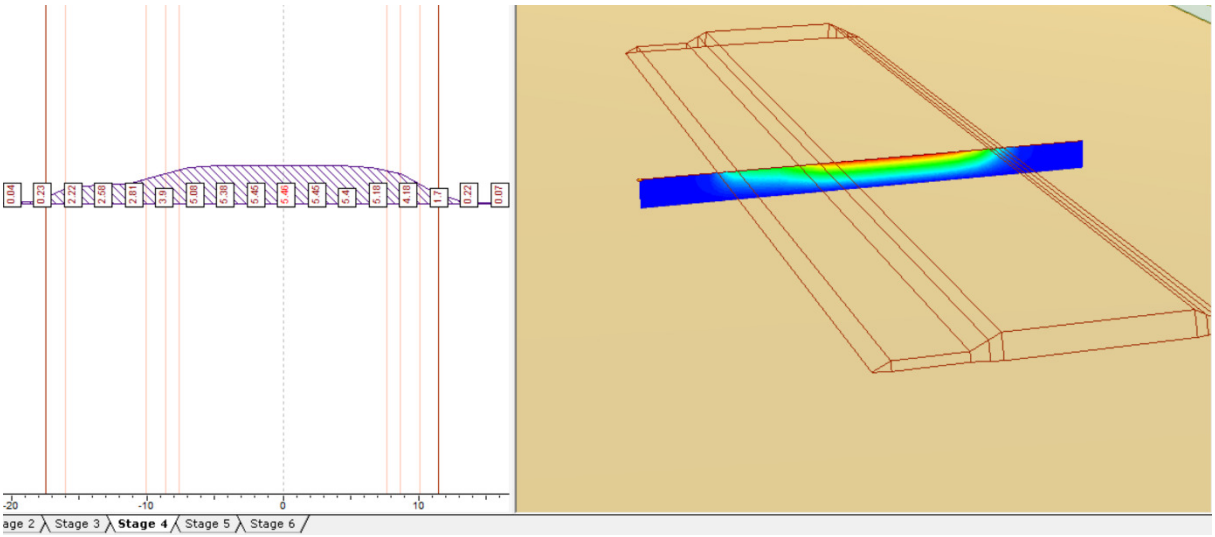
Kontrollarvutus tehti PA 28 juures, mis oli tabeli 7.1 järgi kõige suurema vajumisega punkt (5.2 cm). Arvutuses arvestati, et muldkeha kõrgus on 2.0 m, nõlvus 1:2 ning all olev pinnas on 0.5 m plastne savi ja 2.3 m pehme savi. Arvutustulemus saadi väga lähedane ERC töös olevale väärtusele – maksimaalseks vajumiks leiti 2+1 tee puhul 5.46 cm. Selle väikese erinevuse võib tingida see, et ERC töös on kasutatud arvutiprogrammi Rocscience Phase2,

aga käesoleval juhul Rocscience Settle3D (Phase2 ei ole enam kasutusel, selle asemel on RS^2, kus ei olnud võimalik defineerida pinnaseomadusi läbi kompressiooniindeksi, mistõttu kasutati Settle 3D).

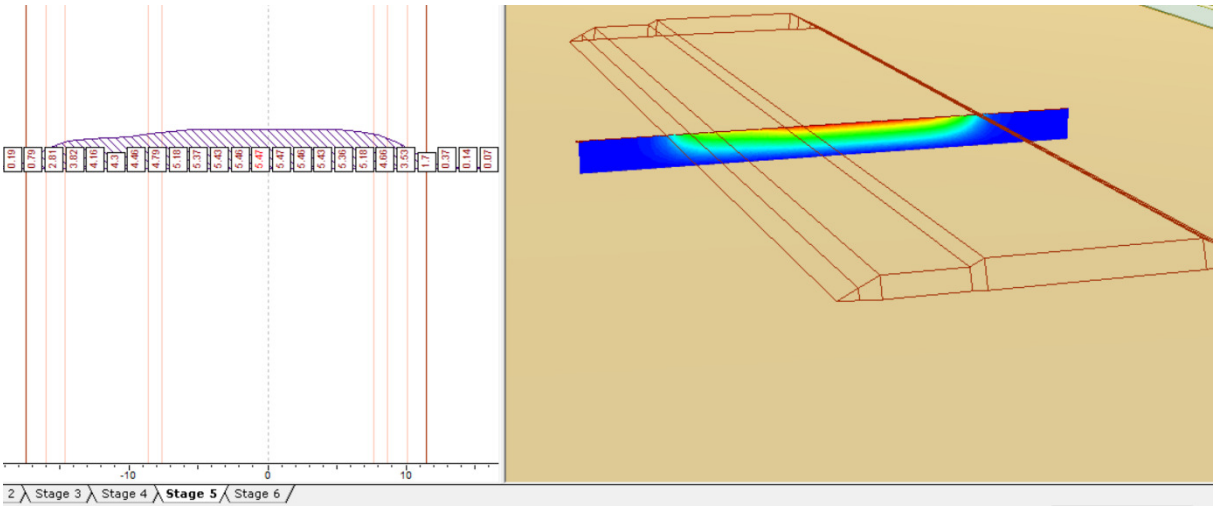
Arvutuse tulemused piltide kujul on esitatud joonistel 1…4 ning tee ristlõike vajumigraafik joonisel 5, mille abil on selgesti nähtav, kuidas vajumid laienduse ehitamisel jagunevad ja lisanduvad.



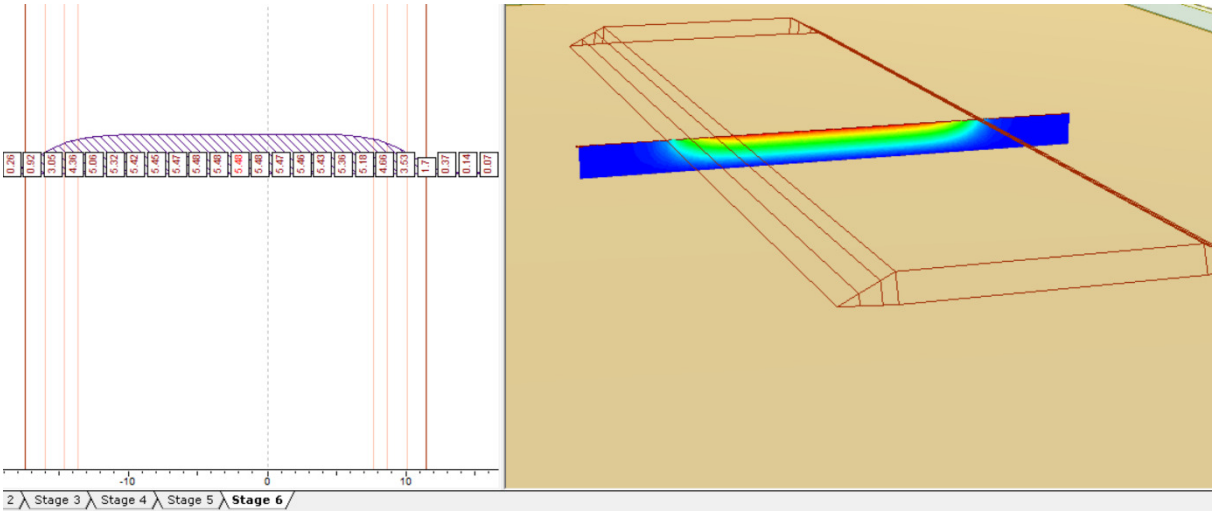
Joonis 1. Valmis ehitatud 2+1 muldkeha (nõlvus 1:2 ja kõrgus 2 m).



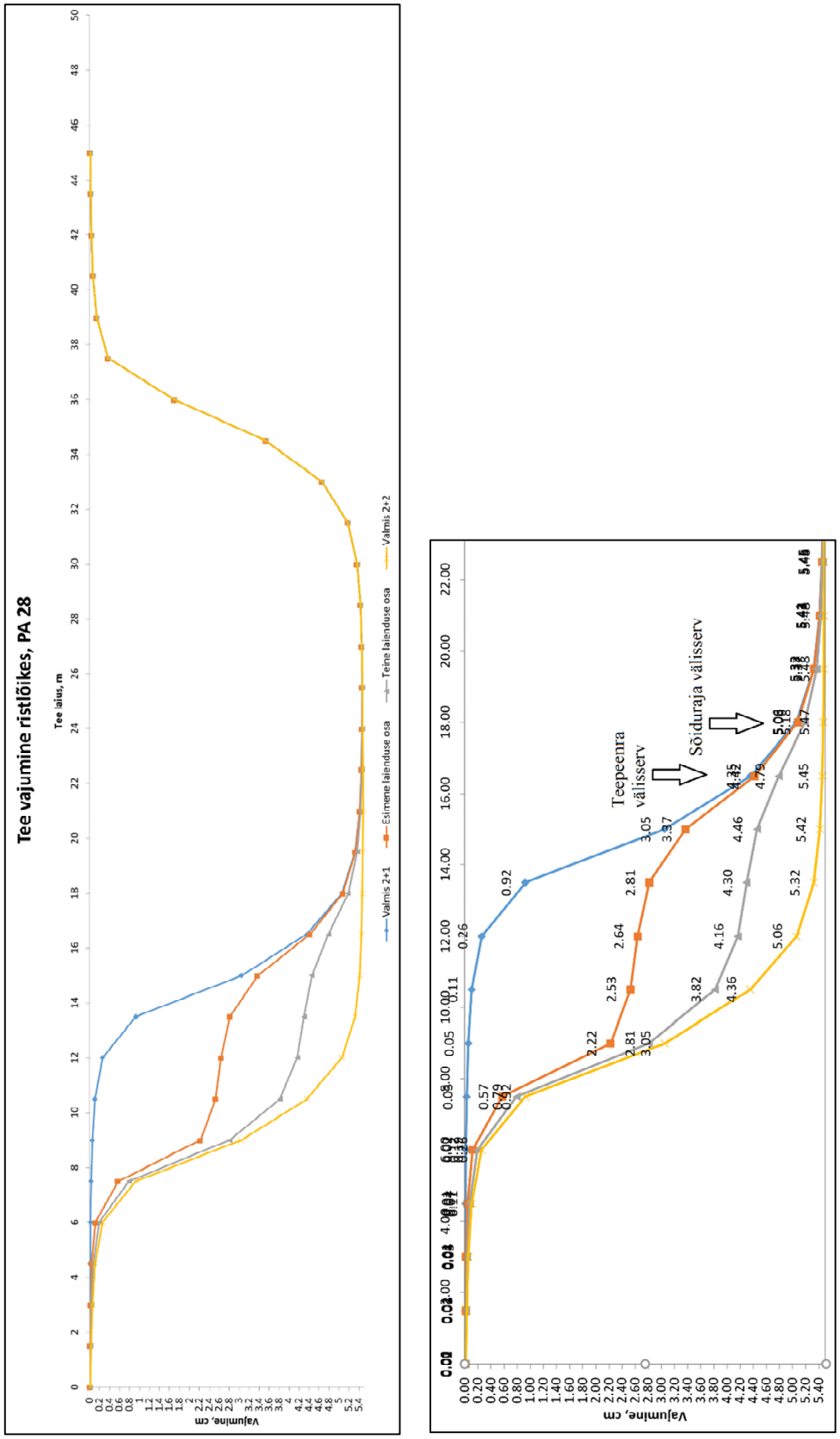
Joonis 2. Laiendamise esimene etapp (kihipaksus 0.75 m).



Joonis 3. Laiendamise teine etapp (kihipaksus 0.75 m).



Joonis 4. Valmis laiendus (teekonstruktsiooni kogupaksus 2 m).



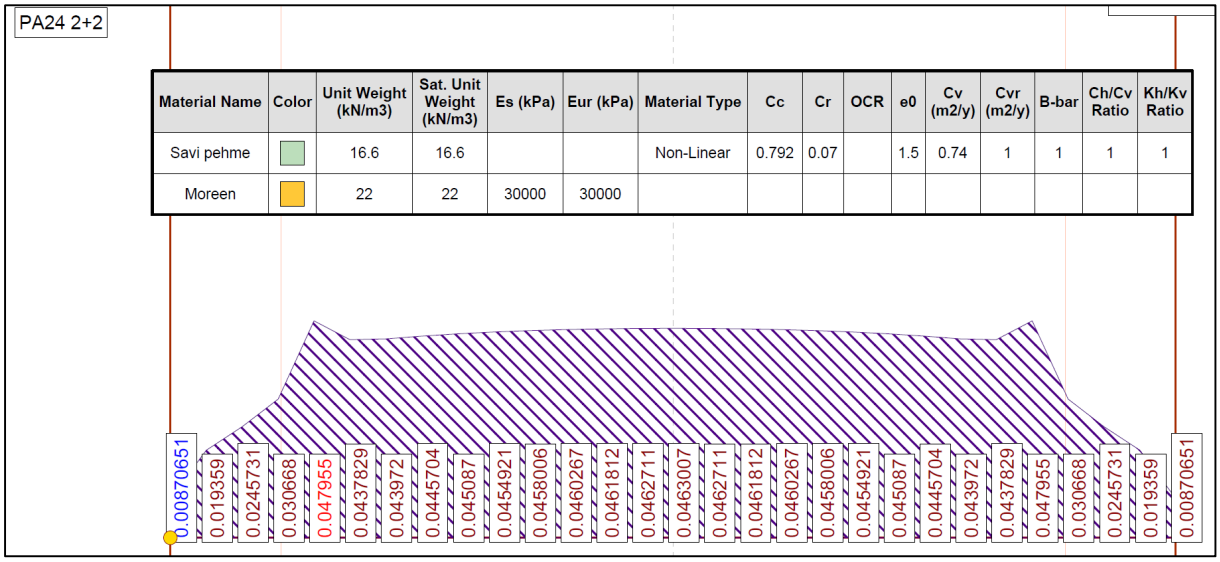
Joonis 5. PA 28 laienduse ehitamise vajumigraafik.

Laiendamise osas on kõige huvipakkuvam nüanss see, kuidas mõjutab laiendamine olemasolevat teed. Selleks on joonisel 5 suurendatud vastavat piirkonda ja ära märgitud 2+1 teepeenra välisserv (nõlva alguspunkt) ning sõiduraja välisserv. Tulemustest nähtub, et

vajumierinevus nõlva ülaosas on ca 1 cm ning sõiduraja ääres asfaltkatte all alla 0.5 cm. Seega on korrektne ERC töös toodud järeldus, et 2+1 ehitamise ajal ei ole vajadust ehitada muldkeha laiemaks tuleviku 2+2 jaoks (eeldusel muidugi, et kasutatud pinnaseomadused on korrektsed). Tuleb märkida, et arvutustes ei ole arvestatud muldkeha järeltihenemisega ega võimalike töövigadega (seda ei olegi võimalik arvestada), mis kokkuvõttes võivad tekitada suurema vajumise, mis päädib prao tekkimisega ja/või põikkalde suurenemisega. Seega on tee laiendamise puhul väga oluline, et järgitaks õiget tehnoloogiat.

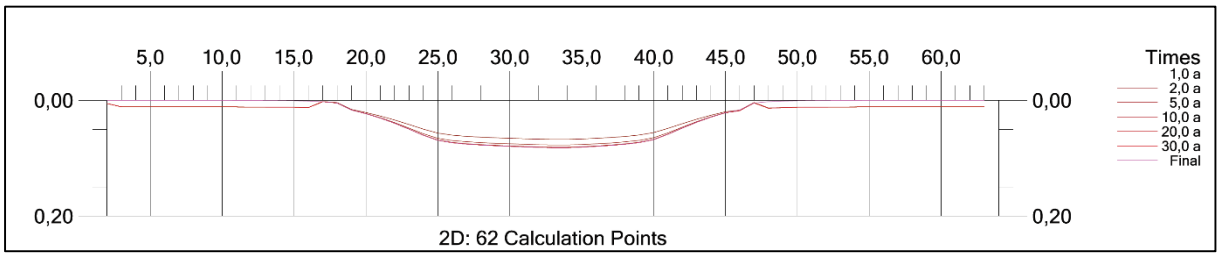
ERC töös paistab silma mõningate vajumisarvutuste juures vajumiprofiili kuju – näiteks PA24 2+2. Ei ole võimalik, et kui muldkeha all on pinnasekihid horisontaalselt (muud teavet kasutada ei ole) ja vajum arvutatakse summeerimismeetodiga, oleks maksimaalne vajum muldkeha ääres (mitte keskel) ja et vajum on sellise kujuga, nagu see on esitatud (joonis 6).

Aalto ülikooli ekspertide sõnutsi võib olla tegemist arvutusprogrammi eripäraga. Taoline nähtus on nähtav ka Škepast&Puhkim töö vajumiarvutustest (muldkeha ääres on vajumigraafiku külgedel „kõrvad“, joonis 7). Kuna ERC töö puhul on vajumid nii väikesed ja Škepast&Puhkim töö osas on maksimaalne vajum alati tee keskel, siis on tegemist vaid kosmeetilise veaga, mis ei sisuliselt ei mõjuta arvutustulemust.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Sat. Unit Weight (kN/m3)	Es (kPa)	Eur (kPa)	Material Type	Cc	Cr	OCR	e0	Cv (m2/y)	Cvr (m2/y)	B-bar	Ch/Cv Ratio	Kh/Kv Ratio
Savi pehme		16.6	16.6			Non-Linear	0.792	0.07		1.5	0.74	1	1	1	1
Moreen		22	22	30000	30000										

Joonis 6. Horisontaalsete pinnasekihtide olemasolul ei ole võimalik, et muldkeha vajub joonisel kujutatud viisil, kui kasutusel on summeerimismeetod. Tegemist ei ole siiski arvutaja veaga, vaid programmi eripäraga (sama asi nähtub Škepast&Puhkim arvutustulemustest joonisel 7).



Joonis 7. Ka Škepast&Puhkim vajumiarvutuse joonisel on äärtes sama nähtus, mis joonisel 6.

Lõppkokkuvõttes mõjutavad esitatud märkused tulemust ja järeldusi siiski minimaalselt, kuna savikihtide paksus on suhteliselt väike ja need on ületihenenud. Projekteeritud mulle ei ületa maksimaalse kõrguse korral ületihenemise survet ja savi vajumine toimub ehitamise ajal.

Stabiilsusarvutustest

Stabiilsusarvutused tehti olukorras, kus muldkeha nõlvus on 1:1.5 ja kõrgus 1.75 m kasutades Eurokoodi arvutusvarianti 1 kombinatsiooniga 2. Tulemuste alusel oli kõikides punktides, v.a PA 30 ja 40 stabiilsus tagatud.

ERC töös on geotehniliste arvutuste puhul arvestatud ka asfaltkattega, kuigi kasutatud kihipaksus on väga õhuke (tulemustest ei selgu, mis paksusega on arvestatud, kuid see on väiksem, kui katendiarvutusest tulenev) ja see paikneb vaid sõiduradade all. Arvutustes on kirjeldatud asfaltbetooni omadusi läbi nidususe (c = 2000 kPa).

Tavaliselt asfaltkatet stabiilsusarvutustes ei kasutata, kuna kui eeldatakse sellele suur tõmbetugevus (milleks c = 2000 kPa on), moonutab see arvutustulemusi. Antud juhul on asfaltkatte paksus siiski nii minimaalne, et tulemust mõjutas see marginaalselt.

Ekspert tegi PA 30 juures läbi stabiilsusarvutuse tingimustel, mida kõrge muldkeha korral oli ette antud – muldkeha kõrgus 2 m ja nõlva kalle 1:2 – ning asfaltkatte paksusena arvestati 5 cm paigutades selle vaid sõiduradade alla. Tulemusena saadi, et F = 0.767 (joonis 8), ERC tulemus PA 30 juures oli F = 0.765 (väikese erinevuse põhjustab see, et ERC töös oli teekonstruktsiooni kõrgus 1.75 m maapinnast, teekatendile oli antud 2.5% kalle ning nõlvade nõlvus oli 1:1.5).

Kui stabiilsusarvutusse oleks lisatud asfaltkate sellise paksusega, nagu see katendiarvutuses oli ette nähtud (4+4+11.5 cm = 19.5 cm), ja sellise laiusega nagu 2+1 tee nõuab (14 m), saadakse joonisel 9 kujutatud arvutustulemus ehk F = 1.635, mis tegelikkuses ei ole korrektne, kuna asfaltbetooniga ei ole võimalik korrigeerida aluspinnase puudujääke tugevuses. Seetõttu asfaltkattega stabiilsusarvutuste juures arvestama ei peaks.

ERC töös on sisuliselt lahendamata see, kuidas tagada stabiilsus kohtades, kus see arvutuste alusel pole välja andnud. Lk 48 on kommentaar, et PA 30 ja PA 40 lõikudes tuleb projekteerida laugem nõlvus – 1:1.5 asendada nõlvusega 1:2. Ekspert kontrollis väidet arvutuslikult ja nagu jooniselt 8 nähtub, ei lahenda see tegelikult stabiilsuse probleemi, millest tuleb seega järeldada, et kõrge muldkehaga lõikudes on lahendus osaliselt poolik. Tuleb märkida, et arvutustes pole arvestatud savi 30 cm stabiliseerimist, kuid pidades silmas kihi väikest paksust ja seda, et kiht ei anna muldkehale tõmbetugevust, siis see stabiilsusarvutustes praktiliselt midagi ei muudaks.

ERC töös on geotehnilised arvutused tehtud nõlva kaldega 1:1.5. Kui reaalsuses taolist nõlva kasutada, tuleb kõrge muldkeha korral paigaldada ka põrkepiire. Projekteerimisnormide kohaselt on minimaalne nõlva kalle I – III klassi tee puhul 1:3. Tehes PA 30 stabiilsusarvutus nõlvusega 1:3, saadakse F = 0.78, mis pole samuti piisav, kuid lisades muldkeha alla veel ka min. 80 kN/m PET armeeriva geotekstiili, saadakse F = 1.07 (joonis 10). Siinjuures tuleb täpsustada, et 80 kN/m on geotekstiili pikaajaline tõmbetugevus; leidmaks lühiajalise tõmbetugevuse, tuleb arvestada eri teguritega, mis sõltuvat tootjast. Järgnevalt näide (tähised Saksa EBGEO):

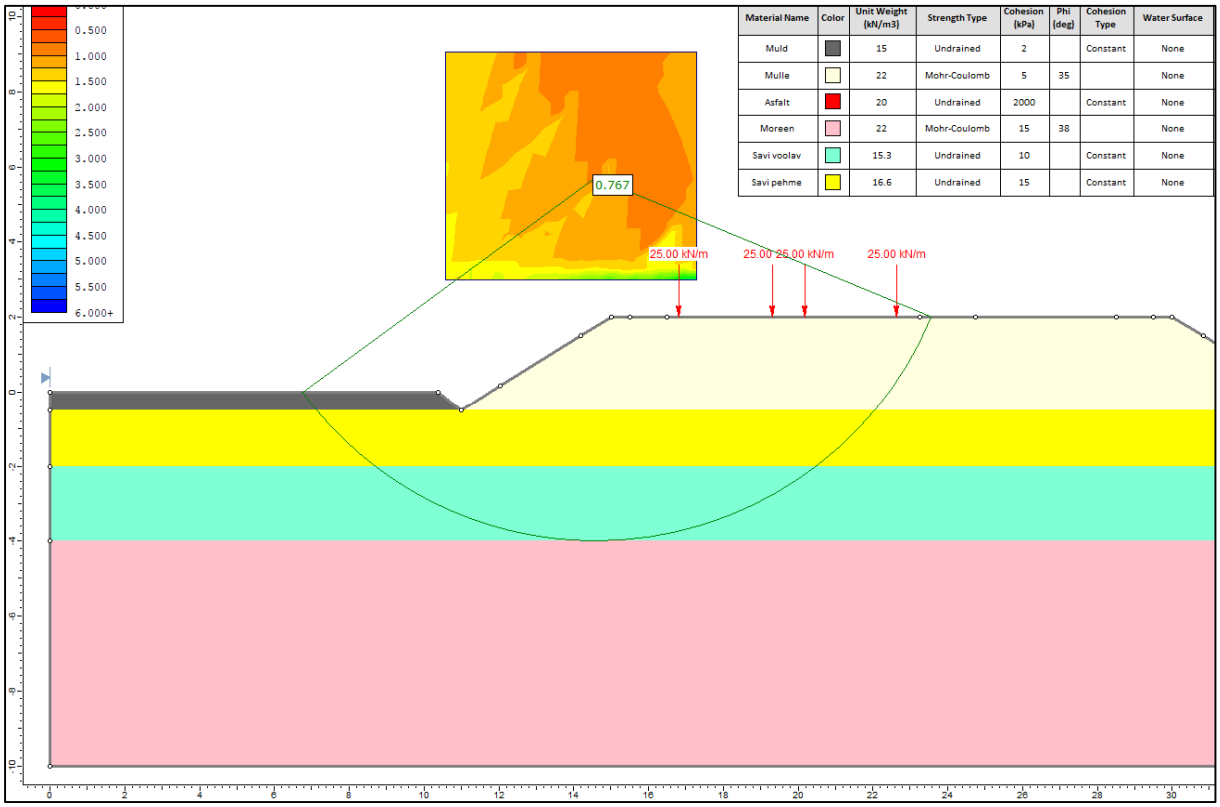
- varutegur roomele, f_{cr} = 1.49 (120 aastat);
- varutegur paigaldusele, f_d = 1.25 (kruusliiv);
- varutegur keskkonnatingimustele, f_e = 1.05 (kui pinnase pH jääb vahemikku 4-9 ja temperatuur pinnases <20^0; stabiliseerimise korral tuleb seda täpsustada);
- varutegur tootmisest tulenevatele vigadele, f_m = 1,0.

Seega geotekstiili lühiajaline tõmbetugevus peab olema vähemalt: 80*1.49*1.25*1.05*1.0 = 156 kN/m. Tuleb rõhutada, et varutegurid nimetatud tingimustele sõltuvad tootjast, mistõttu need võivad olla erinevad. Arvestades täiendavalt veel sellega, missugused on geosünteedi

tootjate toodete nomenklatuur, siis tõenäoliselt kasutataks objektil kootud geotekstiili, mille lühiajaline tõmbetugevus pikisuunas on 200 kN/m ja ristisuunas 50 kN/m (näiteks TeleTextiles TeleVev 200/50), kusjuures geotekstiili paanid tuleb paigaldada risti tee telje suhtes.

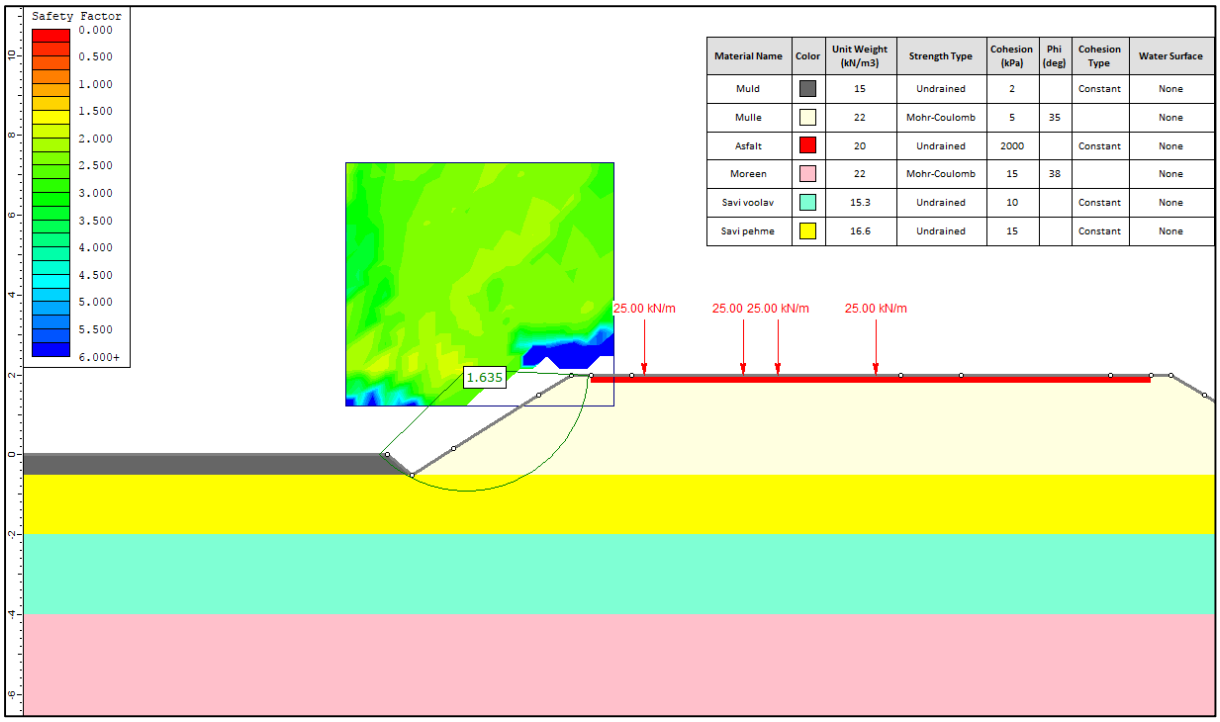
Täiendavalt tuleks arvutuslikult veel kontrollida geotekstiili väljatõmmet, materjalide horisontaalsuunas nihkumist geosünteedi peal ja vajalikke ülekatteid ning koostada paigaldusplaan, aga see kuulub tööprojekti koosseisu, mistõttu seda siinjuures ei tehta.

Küsimuse tekitab veel lk 48 lõik 6, mis käsitleb alla 1 m kõrgusi muldeid. Varasemalt käsitleti 1.75 m muldeid ja toodi välja, et nõlvusega 1:1.5 tekib probleeme vaid PA30 ja PA40 piirkondades. Lõik paistab olevat ülejäänud peatüki kontekstist väljas ja kas seega on tegemist ekslikult sisse jäänud väidetega?

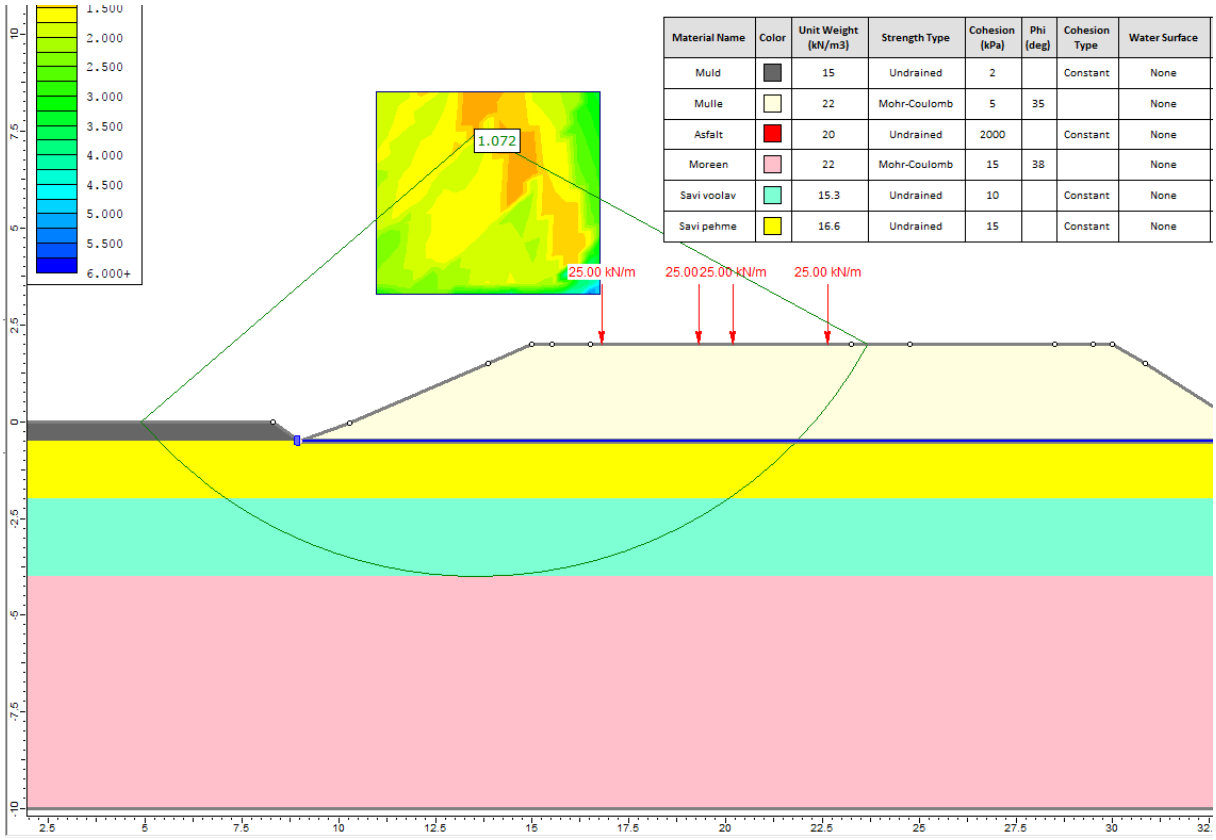


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface
Muld		15	Undrained	2		Constant	None
Mulle		22	Mohr-Coulomb	5	35		None
Asfalt		20	Undrained	2000		Constant	None
Moreen		22	Mohr-Coulomb	15	38		None
Savi voolav		15.3	Undrained	10		Constant	None
Savi pehme		16.6	Undrained	15		Constant	None

Joonis 8. Muldkeha stabiilsuse arvutus PA 30, kui teekatte pind on 2 m olemasolevast maapinnast ja nõlva kalle 1:2.



Joonis 9. Muldkeha stabiilsuse arvutus PA 30 (kõrge mulle), kui joonisele 8 on lisatud 20 cm asfaltbetooni.



Joonis 10. Muldkeha stabiilsuse arvutus PA 30 (kõrge mulle), kui nõlva kalle on 1:3 ja kasutatakse 80 kN/m armeerivat kootud PET geotekstiili.

Peatükk 10 käsitleb teekonstruktsiooni laiendamise võimalusi.

Esimese lõigu lõpuosa sõnastus võimaldab järeldada, et savipinnas tuleks kohe stabiliseerida 2+2 laiuses ja seejärel katta see sama pinnasega, millega ehitatakse 2+1 muldkeha, mis on vastuolus varasemate väidetega, et kohe ei pea laiendamisega arvestama. Samuti pole seda lisatud ehitusmaksumuse hulka.

Mida mõeldakse lõigu 2 lausega, et on otstarbekas laienduse teostamisel kasutada geosünteete, et vähendada riske ebaühtlaseks vajumiks laienduse osas? Lk 22 oli kirjas, et hiljem on 2+1 väljaehitatud konstruktsiooni võimalik laiendada ilma ebaühtlase vajumi riskita. Geosünteedi mõiste on väga lai, mida siinjuures täpsemalt mõeldud on?

Peatükk 11 käsitleb elukaare kulusid. Sellega on arvesse võetud erinevaid tegureid ja tehtud mitmeid eeldusi, millest kõige küsitavam on see, kas ja kuidas planeeritud katendikihid peavad vastu ajale (ilmastikukoormusele). Töös ei ole esitatud metoodikat, millega seda kontrollida, mistõttu on elukaareanalüüs suhteline. Arvutuste alusandmetena on kasutatud peatükis 5 esitatud ehitusmaksumuse kalkulatsiooni, kuid kuna see ei olnud korrektne, on viga sees ka elukaarearvutustes.

Peatükk 12. Kokkuvõte

Peatükist selgub, et lahenduse koostamise aluseks on võetud Rootsi PMS Objekt. Mille alusel on järeldatud, et sellega koostatud katendilahendus võimaldab pikemat tee eluiga ja pikaajalises (30 a.) perspektiivis kõige optimaalsemat lahendust?

Esimese lõigu lõpus nenditakse, et tarkvara kasutamiseks Eestis ei eksisteeri adekvaatseid arvutusparameetreid. Mille alusel saab seega järeldada, et PMS Objekt annab kõige optimaalse teekatendi lahenduse?

Lõigu 2 lõpp ütleb, et mulle tuleb kaitsta geokomposiitmatiga, mis takistab vee ligipääsu (täpsustuseks, et peatükis 5.2 öeldakse lk 16 punktis üks, et killustikukihi all olev materjal peab olema kontrollitult väga madala filtratsiooniga). Edasises tekstis mainitakse, et muldkeha tuleb ümbritseda vee muldesse pääsu takistamiseks geokomposiitmatiga. Mida siinkohal on täpsemalt mõeldud geokomposiitmatiga?

Lk 64 esitatakse Are ümbersõidu ehitamise variandid. Kas variandi II põhjal tuleb järeldada, et tee tuleb siiski ehitada valmis koheselt 2+2 laiusena?

2.1.1 Kokkuvõte ERC töö märkustest

Töö on seesmiselt vastuoluline, raskesti jälgitav ja sisaldab mitmeid sisulisi kui vormistuslikke vigu.

Võttes üldistavalt kokku kogu töö, saab esitada väljapakutud lahenduse järgnevalt:

1. Savipinnas tuleb stabiliseerida 30 cm sügavuselt (või kasutada dreenmatti, kokkuvõtte eelviimases lõigus öeldakse, et kasutada geotekstiili);
2. Muldkeha koosneb materjalist, mis koosneb 50/50 osas killustikusõelmetest (kas mõeldud on sõelmeid fr. 0…4 mm?) ja liivast. Kogu muldkeha tuleb ümbritseda geokomposiidiga, mis on kontrollitult vähese filtratsioonimooduliga (kokkuvõtte tekst võimaldab järeldada, et tegemist on geomembraaniga?);
3. Muldkeha peale tuleb PMS Objektiga arvutatud teekatend.

Töös ei ole võrreldud välja pakutud lahendust traditsioonilise (tänastele projekteerimisnormidele vastava) lahendusega, mistõttu on väljatoodud lahenduse optimaalsus küsitav (mis on nende omavaheline erinevus nii ehituskulusid kui pikaajalist

vastupidavust silmas pidades).

Töö suureks plussiks on see, et on püüeldud innovaatiliste lahenduste poole, kuid kogu see töö, mis puudutab esitatud väidete ja eelduste kontrollimist, on tegemata:

- savipinnaste stabiliseerimine on hea idee, kui ei ole vajadust tagada tuisuohutu muldkeha kõrgust. Meetodiga saab tõenäoliselt vähendada savi külmakerkeohtlikkust, mistõttu võib rajatav muldkeha olla madalam. Stabiliseerimise toimivuse eeldused olid kontrollimata ja esitatud mõtted kohati vastuolulised;
- paekivisõelmete kasutamine muldkehas segatuna 50% liivaga on hea idee, millega kasutada ära jääkmaterjali. Töös oldi väga kaheldaval seisukohal materjali omaduste osas, kuigi vajalikud laborikatsed oleksid olnud suhteliselt lihtsad ja kiired; samuti on paesõelmeid varasemalt uuritud, sh selle segu liivaga. Teadmatus viis selleni, et töö kokkuvõttes soovitati kogu muldkeha ümbritseda materjaliga, mis ei laseks vett sisse, mis teeks muldkeha ehituse tõenäoliselt nii kalliks, et paesõelmete kasutus ei ole enam optimaalne;
- töös oli mainitud tsementstabiliseeritud katendikihti, kus saaks kasutada samuti paekivisõelmeid ja mille all nõrka paekivikillustikku. Idee on väga hea, sisuliselt taolist tehnikat kasutati 70 ja 80-ndatel, kui stabiliseeriti kasutades põlevkivituhka, kuid peamiseks probleemiks olid hiljem ilmnenud põikpraod ja väga ebatäpne ehitustehnoloogia. Esimese probleemi lahendamiseks pakuti töös Stabilroad lisandit ja teise peaks lahendama tänapäevane ehitustehnika, kuid mõlema osas on info puudulik – näiteks oli peatükis 5 käsitletud kahte katselõiku Eestis, mille tulemused jäid kasinaks just erinevate vigade ja ehitustehnoloogia tõttu.

Töös pandi suurt rõhku PMS Objekti kasutamisele katendiarvutuses, kuigi ka sellega seoses tõsteti üles mitmeid probleeme, mistõttu on küsitav, kas väljatöötatud lahendus on kõikidest võimalikest variantidest kõige optimaalsem. Näiteks võib tuua selle, et asfaltkatte vajalikuks paksuseks arvutati ca 20 cm, mille alla pidi tulema stabiliseeritud kiht ja killustiku kiht. Taoline seotud kihtide paksus on nii suur, et reaalsuses ei saa määravaks enam katendiarvutus, vaid asfaltkatte enda vastupidavus ajale, mis oli töös täielikult käsitlemata. Optimaalse teekatendi koostamine peaks algama sellega, et kõigepealt õpitakse tundma materjalide omadusi tänu millele saab optimeerida – esitatud metoodika oleks pidanud sisaldama seda osa.

2.2. Škepast&Puhkim OÜ

Töö on võrreldes ERC Konsultatsiooni OÜ tööga oluliselt sirgejoonelisem ja arusaadavam, kuid teisalt vähem (kui üldse) innovaatilisem. Tekkinud küsimusi ja märkusi oli seetõttu oluliselt vähem.

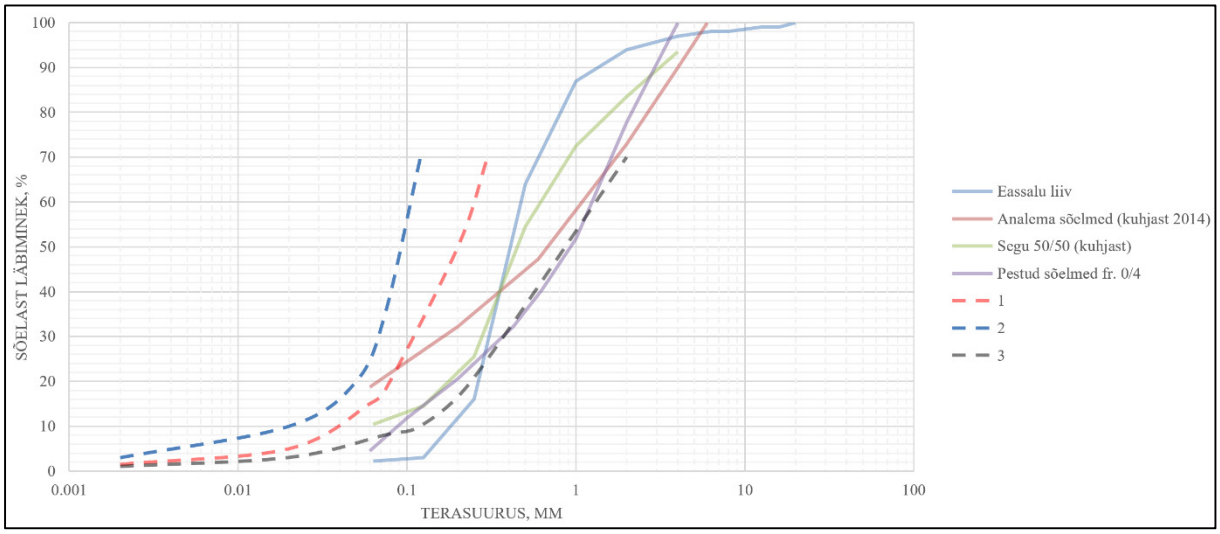
Peatüki 3.1 lõigus 2 on öeldud, et valitud lahendused on oma eluea jooksul optimaalseimate kuludega ja ei nõua erilisi teehoolde ja remondi meetodeid. Kui välja arvata tee laiendamise metoodika, siis väide on põhjendamata ja kontrollimata. Kui katendiarvutuse kohaselt on kõik kriitilised punktid kaetud (eeldades, et katendiarvutus tagab etteantud nõuded ka reaalsuses), saab tee pikaealisuse puhul määravaks seal kasutatavad materjalid – eelkõige asfaltkatte, stabiliseeritud segu ja killustikaluse vastupidavus ajale ja koormusele. Kogu see teema on töös katmata, kuidas kontrollida nende vastupidavust ja/või suurendada nende eluiga. Seega väide, et väljatöötatud teekonstruktsioon on optimaalseim, ei ole põhjendatud.

Peatükis 3.2 on mainitud, et paekivisõelmeid võiks kasutada sügavamal, kui 1.5 m katte pinnast, kuid tingimusel, et need ei oleks veeküllastunud olekus. Töös samas ei käsitleta seda, kuidas seda tagada või vältida.

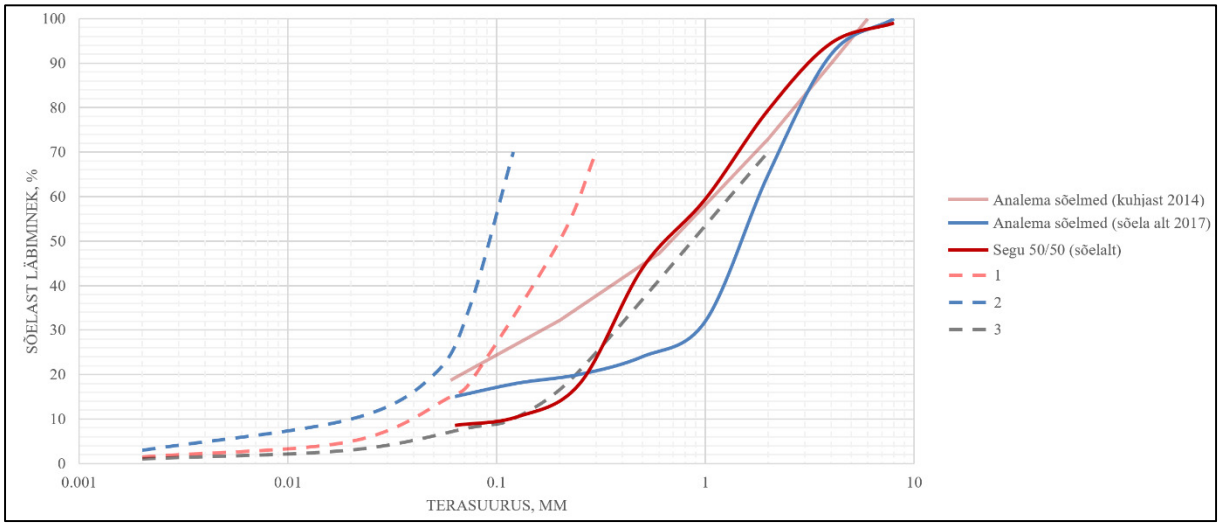
Lisaks on öeldud, et muldkeha töötsooni alakihtides võib kasutada paekivisõelmete ja liiva segu vahekorras kuni 50/50 tingimusel, et segatud materjali filtratsioonimoodul on vähemalt >0,1 m/ööp.

Käesoleva ekspertiisiga võrdles ekspertrühm saadaolevaid sõelkõveraid Analema ja Eassalu karjääridest ning koostas teoreetiliselt sõelmete ja liiva segu vahekorras 50/50. Sõelmetest oli kasutada kaks proovi – aastal 2014 kuhilast võetud ja aastal 2017 otse sõela alt võetud. Tulemused on esitatud joonistel 11 ja 12, kus sõelkõverad on võrreldud ka Soome külmakriteeriumitega (kahjuks materjaliproovide osas puuduvad andmed alla 0.063 mm osistest). 50/50 segumaterjali peenosiste sisaldus on igal juhul üle 8%. Eeldusel, et filtratsioonimoodul mõõdetakse EVS 901:20 alusel, ei ole selline materjal filtreeruv, samuti näib, et materjal ei täida ka külmaohutuse kriteeriumit. Seega ei ole võimalik täita etteantud filtreeruvuse kriteeriumit ja paekivisõelmeid ei saa projektses lahenduses kasutada 50/50 seguna, vaid sõelmete osakaal peab olema väiksem.

Uurimaks täiendavalt võimalusi paekivisõelmete kasutamiseks muldkeha ehitamisel, tegi töörühm täiendavaid laborikatseid, mida on käsitletud peatükis 2.3 ja eelkõige lisas 3.



Joonis 11. Aastal 2014 kuhilast võetud paekivisõelmete ja Eassalu liiva, nende segu sõelkõverad võrdlusena pestud sõelmete ja Soome külmakindluse väljadega.



Joonis 12. Aastal 2017 sõela alt võetud paekivisõelmete ja Eassalu liiva segu võrdlus aastal 2014 kuhilast võetud sõelmete proovi ja Soome külmakindluse väljadega.

Peatükis 5.2 on tabelis 6 arvestatud, et AC 32 base kihipaksus on 5 cm, mis on maksimaalset terasuurust arvestades liiga vähe. Peaks kasutama kas AC 20 base või suuremat kihipaksust.

Peatükk 7 ei ole täielik, kuna seal tegelikult ei arvestata 2+1 teedega, vaid käsitletakse ainult mõningaid nüansse muldkeha stabiilsusarvutustest.

Geotehnilised arvutused

Lähteandmetena on kasutatud geotehnilise uuringu aruande pinnaseomaduste normatiivsete väärtuste tabelit ignoreerides seega konkreetsete uuringupunktide mõõtmistulemusi (väga suured erinevused savikihtide veesisalduses, tiivik- ja penetratsioonikatsete tulemuses). Geotehnilises uuringus sisaldusid savipinnase kokkusurutavusnäitajad vaid ülemisest savikihist (nö kuivamiskoorikust), mistõttu olid andmed sisuliselt kasutuskõlbmatud ja seega on ka Škepast&Puhkim töös arvestatud teiste arvväärtustega.

Lisas 3 on esitatud Mait Metsa seisukoht Škepast&Puhkim vajumiarvutuste osas, mille järeldus on, et vajumid on 20…30% ülehinnatud.

Arvutusmetoodikast

Arvutustes on lähtutud pigem Soome juhenditest, kui nendest, mida kasutatakse Eestis. Stabiilsusarvutuste kriteerium tuleneb Soome juhendist „Tiegeotekniikan yleiset mitotusperusteet“, mille alusel on teemullete varutegur ehituse ajal F > 1.3 ja kasutuses F > 1.5.

Eurokoodi (EVS-EN 1997-1:2006) Eesti rahvuslik lisa ütleb (NA.2.4.7.3.4.1(1)P): „*Geotehnilisel projekteerimisel peaks Eestis kasutama arvutusvarianti 2. Teisi arvutusvariante võib kasutada juhul, kui need annavad ökonoomsema lahenduse kui variant 2. Arvutusvarianti 3 võib kasutada vaia kandevõime määramiseks ainult juhul, kui see toimub pinnase omaduste alusel. Nõlva püsivuse kontrolli peaks tegema arvutusvarianti 1 kombinatsiooniga 2.“* ja seega oleks olnud korrektsem kasutada taolist lähenemist.

Vajumiarvutuste osas on kasutatud Ohde-Janbu meetodit, mida eestikeelsetes juhendites ei sisaldu. Tegemist on Soomes välja töötatud ja kasutatava meetodiga. Arvutusparameetrite valikut ei ole põhjendatud. Eestis kasutatakse sarnastes oludes vajumiarvutustena summeerimismeetodit komressiooniindeksiga (Cc), mitte Ohde-Janbu meetodit.

Vajumiarvutustest

Kasutatud on Soomes levinud arvutusprogrammi Geocalc. Selle puhul on väga hästi jälgitav stabiilsusarvutus (paremini, kui ECR töö puhul, kuna välja on toodud puurimisel saadud ristlõige), kuid mitte vajumiarvutus.

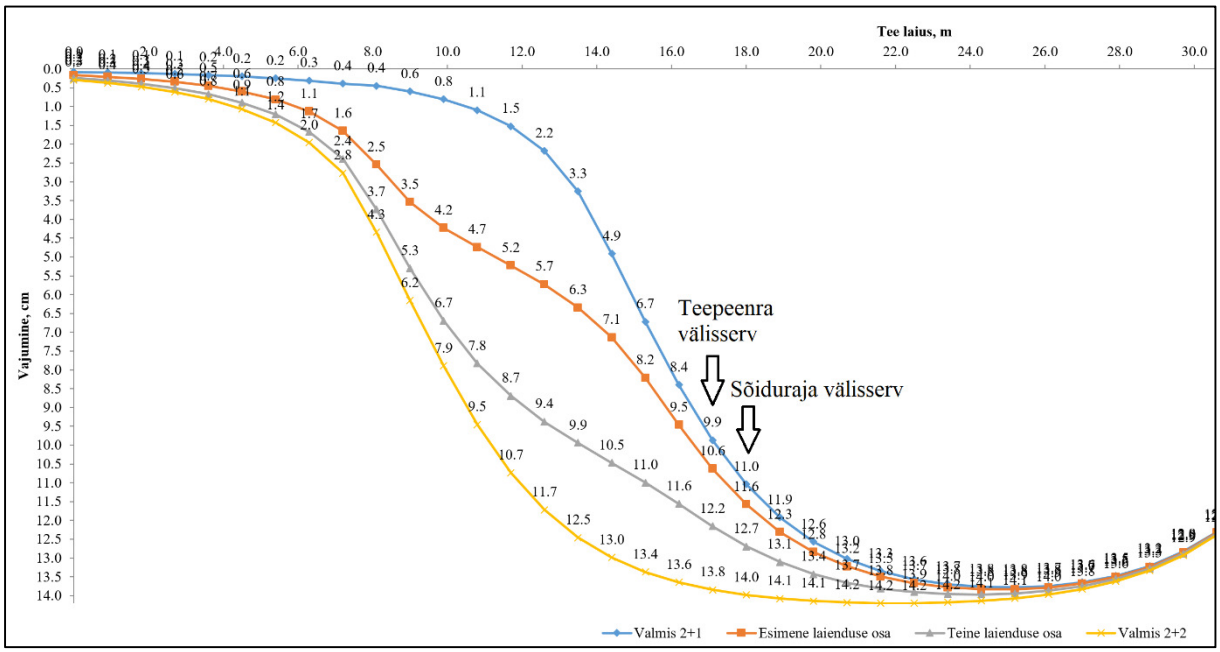
Vajumiarvutus on tehtud kasutades Soomes välja töötatud ja seal kasutusel olevat metoodikat, mida Eestis ei kasutata (meil on summeerimismeetod kompressiooniindeksi olemasolul). Seetõttu ei leia Ohde-Janbu metoodikat ka näiteks Rocscience programmist (millega käesolevas töös tehti kontrollarvutused). Metoodika kasutamiseks on tingimata vaja teha kompressiooniteim ja saada lähteandmed sealt, aga geotehnilies uuringus ei tehtud katseid nendes kohtades ja sellises mahus, kui vajalik.

Seoses Geocalc´i kasutamisega paluti kommentaari Aalto ülikoolist, kus tehti nii stabiilsuse kui vajumiste osas kontrollarvutus. Järeldusena toodi, et stabiilsusarvutused on korrektsed, kuid mitte vajumiarvutused. Nimelt on eksitud materjali mahumassiga allpool veepinda, mis on määratud liiga kõrgeks ja mis seetõttu annab tegelikust suurema koormuse. Kontrollarvutus korrektsete väärtustega andis PK 133+71 juures ca 25% väiksema vajumi (mis ühtib Mait Metsa hinnanguga). Märgiti ära ka see, et vajumiarvutustes oleks võinud arvestada kompressiooniindeksiga, mitte Ohde-Janbu meetodiga, mis on veaaltim.

Vajumiarvutuses pole üldse käsitletud tee laiendamist ja selle mõjusid. Pole analüüsitud seda, kas tegelikkuses on vajalik ehitada välja laugete nõlvadega muldkeha või mitte (minimaalne vajalik 1:3, projektne lahendus näeb ette nõlvused 1:5 ja 1:6).

Tee laiendamise ülesande puhul oli arvutuslikult vaja kontrollida ristlõiget. Vajumise tulemusi tee ristlõikes geotehniliste arvutuste koondtabelis esitatud ei ole, käsitletud on vaid maksimaalset vajumit, mis ei vasta küsimusele, mis saab siis, kui teed laiendatakse. Vajumiarvutuste juures on küll olemas graafiline kujutis, kuid seoses mõõtkavaga on see halvasti kasutatav.

Ka siin võib teha sama võrdluse tee laiendamise osas, kui tehti ERC töö osas. Jättes muldkeha samasuguseks, kui oli arvestatud ERC töös (nõlvus 1:2 ja kõrgus 2 m), kuid modifitseerides pinnaseomadusi nii, et maksimaalseks vajumiks saadakse 14 cm (Škepast&Puhkim töös oli maksimaalne vajum 14.5 cm PK 128+89), saadakse joonisel 13 kujutatud graafik, millelt nähtub, et teepeenra välisserv (nõlva peal) vajub 3.9 cm ja sõiduraja serva punkt 3 cm. Vajumine on suhteliselt ühtlane, mistõttu savipinnase vajumisest pikipragu tee sisse tõenäoliselt ei tule (seda võib põhjustada muldkeha enda järelvajumine ja töövead), kuid see muudab põikkallet – vahemikus 18…20 m on vajumiste erinevus 3,9 – 1,5 = 2.4 cm, mis tähendab, et põikkalle kujuneb 2.5% + 1.2% = 3.7%. Seetõttu on väga õigustatud lahendus, et kui lähteandmed on sellised, mis need oletati olevat, siis muldkeha nõlvad tehakse kohe laugemaks, mistõttu on vajumierinevused tee põiklõikes minimaalsed ja põikkalde muutus on marginaalne.



Joonis 13. Vajumiarvutus samadel muldkeha tingimustel, kui joonisel 5, kuid maksimaalne vajum on arvutatud Škepast&Puhkim töö PK 129+89 alusel.

Stabiilsusarvutustest

Arvutustes kasutatud arvutusparameetreid (ei kokkusurutavust ega nihketugevust iseloomustavaid väärtusi) ei ole põhjendatud. Kui vajumiarvutuste osas on kasutatud väärtuste leidmine täiesti puudu, siis stabiilsusarvutuste puhul on kasutatud normväärtuste tabelit, kuid seda, et geotehniliste uuringute mõõteandmetega saadi tegelikult sellest madalamaid väärtusi (näiteks tiivikkatse tulemused TK 40), pole kommenteeritud ega neid pole arvestatud. Mait Mets on siiski hinnanud tulemused rahuldavateks ja kokkuvõttes ei ole ohtu, et teekonstruktsiooniga peaks midagi arvutustulemusi arvestades savipinnaste omaduste tõttu

juhtuma.

Stabiilsusarvutuste puhul on võrreldes ERC tööga parem see, et probleemsetele piirkondadele on antud arvutuslikult lahendus – proovitud on eri nõlva kaldeid, vastumullet ja armeerivaid geosünteete, kuid viimase osas on teatav arusaamatus. Nimelt sellist geosünteeti nagu 200/50 NorGeoSpec V ega 150/40 NorGeoSpec II pole olemas. Kas sellega seoses on mõeldud, et kasutama peaks kahte geosünteeti korraga – 200/50 kN/m, millega koos NorGeoSpec V-profiili geotekstiil ja ülespoole 150/40 kN/m koos NorGeoSpec II profiiliga? Kui nii, siis on see tarbetu. Geotekstiilide tõmbetugevuste osas tuleb rõhutada, et tõenäoliselt on tegemist pikaajaliste tõmbetugevustega, mida on vaja suurendada varutegurite võrra. Kasutades samu varutegureid, kui ERC töös saadakse:

- 200*1.49*1.25*1.05*1.0 = 391 kN/m (kasutatakse 400/50 kN/m);
- 150*1.49*1.25*1.05*1.0 = 293 kN/m (kasutatakse 300/50 kN/m).

Kasutades taolist geosünteetide kombinatsiooni kõikjal probleemsetes kohtades, on tegu kohatise üledimensioonimisega: PK 157+72 FOS_{min} = 2.23 (kuigi siia on pakutud ka suuremat nõlvust ja vastumulde varianti), PK 165+93 FOS_{min} = 1.87 – nendes kohtades võinuks proovida tulemust, kui jätta ülemine geosünteet ära või kasutada 150 kN/m kahes kihis. Lahendus toimib PK 169+75 juures, kus FOS_{min} = 1.50.

2.2. Geotehnilise arvutuse võrdlus

Puuraukude järgi tehtud võrdlus arvutustulemustest on esitatud lisas 1. Peamine erinevus tuleb sellest, kuidas on defineeritud olemasoleva pinnase tugevus- ja kokkusurutavusomadused.

ERC töö peatükis 9.1.2 alguses öeldakse: "On täiesti selge, et kirjeldatud ja aruandes eraldatud pinnasekihtidega korrektseid geotehnilisi arvutusi läbi viia ei saa. Eraldatud pinnasekihtide füüsikalised omadused muutuvad eraldatud kihtide piirides sedavõrd palju, et korrektseid ja statistiliselt põhjendatud normsuuruseid kihtidele arvutamiseks leida ei ole võimalik ja see ei ole standardiga EVS-EN 1997-1 ka lubatud.“ /…/ „Selleks, et teha vajalikke stabiilsuse ja vajumise arvutusi koostati suru-löökpenetratsiooni katsete ja laboris määratud veesisalduse alusel uus pinnaste arvutusmudel.“

Seega kasutas ERC erinevaid kihipaksusi ja materjalide omadusi, kui oli kirjas geotehnikaaruandes. Välja ei ole toodud meetodit, kuidas nende tulemusteni jõuti, kirjas on vaid, et kasutati suru-löökpenetratsiooni katsete ja veesisalduse andmeid. Tõenäoliselt on tegemist töövõtja kogemustest ja statistilisest andmebaasist tulenevate andmetega, mille õigsuse kontrollimine nõuab sarnaste andmete olemasolu. Mait Metsa hinnangul tuleks need geotehniliste uuringute abil üle kontrollida, kuna statistiline andmebaas on koostatud arvestades Pärnus tehtud uuringuid, kuid Are piirkond on sellest mõnevõrra erinev.

Škepast&Puhkim töös kasutati samu kihipaksusi ja materjale, mis oli kirjas geotehnikaaruande ristlõigetel ja materjaliomaduste normväärtuste tabelis. Arvestatud ei ole sellega, et tiivikkatsetel saadi oluliselt madalamaid tulemusi, kui oli kirjas tüüptabelis (tegelikult oli tegemist veaga, aga töös seda ei selgitata) ega sellega, kuidas muutuvad veesisaldused ja penetratsioonikatsete tulemused. ERC töös on kihipaksusi ja materjalide omadusi muudetud vastavuses penetratsioonikatse tulemustele ja veesisaldustele, mis on võimaldanud arvestada olemasolevat pinnast enamasti tugevamana, kui geotehnikaaruandes on välja toodud.

Kui geotehnikaaruandes sisalduvat normväärtuste tabelit saab mööndustega kasutada stabiilsusarvutuste tegemiseks, siis väga puudulik on info pinnaste kokkusurutavuste osas –

vajalikud andmed tuli geotehnikul sisuliselt endal tuletada kasutades kas omi kogemusi või varasemalt kogutud andmeid sarnastest oludest. Vajumiarvutuse puhul on seda teinud ka Škepast&Puhkim meeskonna geotehnik, kes on kasutanud kokkusurutavuse hindamisel täiendavaid andmeid. Tegemist ei ole tingimata vale lähenemisega („*Kokkusurutavuse võib leida ka empiiriliste seoste abil, kui katsetega on kindlaks tehtud sõltuvus kokkusurutavuse ja mõnede lihtsamini määratavate pinnase omaduste, näiteks poorsuse, veesisalduse, plastsusomaduste, vahel.*“ V. Jaaniso). Küsimus on, kas kasutatud andmed on korrektsed:

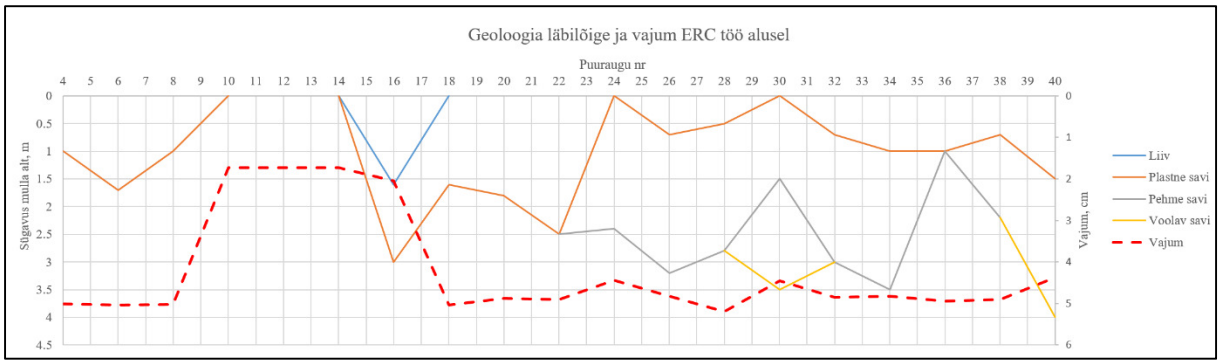
> Näiteks on Škepast&Puhkim vajumiarvutuses nii savi- kui möllsavi puhul kõikjal kasutatud Janbu moodulina arvu 20, kuid see vastab materjalile „stiff clay“, mis ei ole kindlasti kogu objekti osas korraktne. Seda kinnitab ka see, et geoloogiaaruandes on toodud välja väga suured erinevused savi veesisalduses, mistõttu ei saa vajuminäitajad kogu objekti lõikes olla samad.

ERC töös on selgelt välja toodud vajumisarvutustes kasutatud kompressiooniindeksid (Cc), dekompressiooniindeksid (Cr) ja konsolidatsioonimoodulid (Cv), kui ka arvestatud eeltihenemissurved (p_c) ja ületihenemisastmed (OCR). Škepast&Puhkim töös ei ole vajumiarvutuste lähteparameetritest võimalik nii üheselt aru saada – välja on toodud küll konsolidatsioonimoodulid, kuid mitte kompressiooniindeksid. Selle tingib kasutatud arvutusprogrammi (Geocalc) eripära, kus kasutatakse kompressiooniteimist tuletatud keerulisemaid seoseid (Ohde mudel), kui „tavapäraselt“ (järgnev on väljavõte V. Jaaniso konspektist):

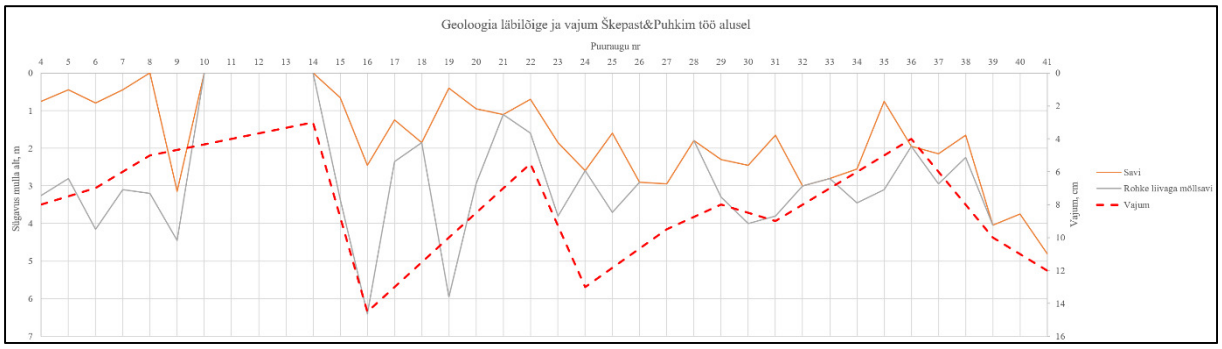
> Mitte alati ei ole kompressioonikõver poollogaritmilises teljestikus sirge p_c-st suurema pinge puhul. Andmetöötlus arvutiga võimaldab kasutada keerulisemaid seoseid kompressioonikõvera täpsemaks kirjeldamiseks.
> Eriti Soomes on laialt kasutusel Ohde ( )poolt soovitatud seos
>
> $$\varepsilon = \frac{1}{m\beta}\left(\frac{\sigma}{\sigma_v}\right)^{\beta} + C_{\beta} \qquad (4.14)$$
>
> kus m, β ja C_{β} on katsest määratavad tegurid – jäikusparameetrid.

Hoolimata kõigest on mõlemad arvutused andnud sama järelduse selles suhtes, et määravaks on saanud muldkeha stabiilsus, mitte vajum. Kui ERC leidis maksimaalseks vajumiks ca 5 cm, siis Škepast&Puhkim ca 15 cm (joonised 14 ja 15). ERC töös on vajumigraafik väga ühtlane sõltumata savikihtide vaheldumisest ja paksustest, kuid korrelatsioon ilmneb siis, kui võetakse arvesse savikihi paksus ja selle kompressiooniindeks (joonis 16). Võrreldes kahe töö vajumisi näeme, et tulemused on täiesti erinevad (joonis 17).

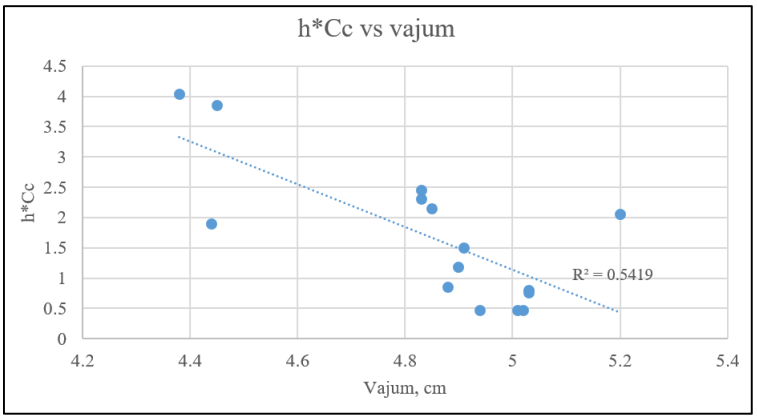
Erinevuse peamine põhjus on selles, et ERC töös on arvestatud ületihenemisteguriga, mistõttu on vajumise suurus väiksem. Teine põhjus on see, millised on materjalide arvestatud kokkusurutavusomadused.



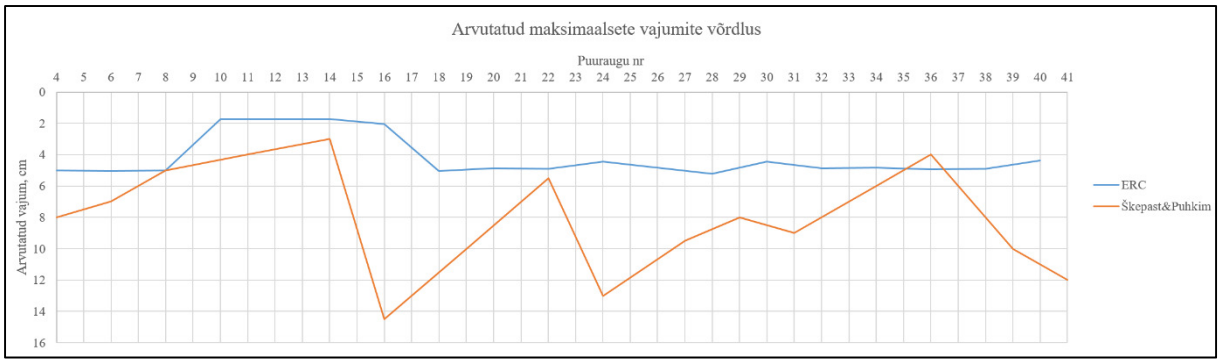
Joonis 14. Geoloogia ja maksimaalne vajum ERC aruandest.



Joonis 15. Geoloogia ja maksimaalne vajum Škepast&Puhkim aruandest.



Joonis 16. ERC tööst savipinnase h*Cc võrrelduna arvutatud vajumisega.



Joonis 17. Arvutatud vajumiste omavaheline võrdlus.

Škepast&Puhkim töös on arvutuslike vajumiste tõttu ette nähtud kasutada laugemate nõlvadega muldkeha – ühel pool teed 1:5 ja teisel pool 1:6 – et oleks võimalik tulevikus teed turvaliselt laiendada. ERC töös võib kõikjal arvestada nõlvusega 1:3. Võttes eelduseks, et

teekonstruktsiooni kõrgus on 1.75 m, on 1:3 nõlvuse pindala 4.59 m^2, 1:5 pindala 7.65 m^2 ja 1:6 pindala 9.19 m^2. Ühe kilomeetri pikkuse teelõigu puhul on mahtude erinevus ERC ja Škepast&Puhkim töö osas seega 1000x(7.65 + 9.19 – 4.59x2) = 7660 m^3. Arvestades, et ühe kuupmeetri muldkeha maksumus on 11.55 EUR (ühikhindade tabelist), saadakse hinnaerinevuseks 88´473 EUR ja 6 kilomeetri tee osas üle 0.5 milj. EUR. Tegemist on märkimisväärselt suure summaga, mida tuleb maksta selle eest, et arvustes ei ole andmed õiged või teisisõnu, on arvestatud liiga suure tagavaraga, kuna täpsed andmed puuduvad.

Teine arvutustulemuste erinevus tuleb sellest, kui palju on vaja materjale, et tagada muldkeha stabiilsus. Arvutustulemused erinesid üksteisest PA 16, 27, 30, 34 ja 39…41 juures. Tabelis 3 on esitatud kokkuvõte nendest punktidest, missugune on sobilik lahendus saavutamaks muldkeha vajalikku stabiilsust. Andmete puhul tuleb arvestada sellega, et osaliselt arvutuse kohad ei kattunud – ERC arvutas PA 30 ja 40, kuid Škepast&Puhkim 29, 39 ja 41 juures.

Tabel 3. Probleemsete punktide võrdlus

Puurauk	ERC lahendus (ekspertrühma täiendustega)	Škepast&Puhkim lahendus
PA 16	Nõlvus 1:3	Tuleb teha nõlv min. 1:5
PA 27	Nõlvus 1:3	Tuleb teha nõlv min. 1:5
PA 29, 30	Nõlvus 1:3 + 200/50 kN/geotekstiil	Tuleb teha nõlv min. 1:5
PA 34	Nõlvus 1:3	Tuleb teha nõlv min. 1:5
PA 39, 40 ja 41	Nõlvus 1:3 + 200/50 kN/geotekstiil	400/50 ja 300/50kN/m geotekstiil või vastumulle

Tulemustest nähtub, et Škepast&Puhkim töös tuleb kasutada laugemaid nõlvasid (kuid need on tee võimalikku laiendamist arvestades juba kasutusel), kasutada rohkem ja tugevamat geosünteeti stabiilsuse tagamiseks kui ERC töös, või tuleb kasutada vastukaalu.

> Vastukaalu ehitamine objektist üle jäävast materjalist on väga hea mõte, mis võimaldab ehitajal lahendada ehituseks muudmoodi kõlbmatu materjali äraveo küsimused ja utiliseerimise vajaduse. Teisalt on hinnatavates töödes arvestatud sellega, et üle jääv materjal on vaid kasvumuld. Reeglina kasutatakse seda hiljem haljastustöödes kas antud objektil või mujal, mistõttu on küsitav, kust saadakse vastukaaluks vajaminevat materjali. Teine nüanss on suurenenud vajadus tee maa-ala osas.

Oletades, et kõik probleemsed punktid asuvad üksteise järel ja nende omavaheline vahekaugus on 150 m (geotehnilise uuringu käigus tehti 6 km tee trassil kokku 41 punkti, mille omavaheline kaugus on keskmiselt seega 146 m). Sellisel juhu saadakse vaadeldavaks tee pikkuseks 8x150 = 1200 m + 50 m mõlemale poole äärmistest puuraukudest ehk kokku 1300 m.

ERC töös saab kasutada kõikjal nõlvust 1:3, kuid Škepast&Puhkim töös peab kasutama 1:5 (arvestame sellega, et ka PA 39…41 tuleb 1:5 ja sel juhul on vaja kasutada 400/50 kN/m geotekstiili ühes kihis, vastumullet maa-ala laiuse tõttu kasutada ei saa). Muldkeha mahtudest tuleb erinevuseks 7´956 m^3 (ca 92´000 EUR).

Armeerivat geosünteeti on ERC töös vaja kasutada PA 30 ja 40 piirkonnas – arvestame kokku

300 m, muldkeha laiuseks on 25.5 m, kokku 7´650 m^2 + 10% ülekatted = ca 8´500 m^2. 200/50 kN/m kootud PET geotekstiil maksab ca 1.5 eur/m^2 + km, mis teeb materjali maksumuseks 12´750 EUR + km + paigaldus.

Armeerivat geosünteeti on Škepast&Puhkim töös vaja kasutada PA 39 ja 41 piirkonnas – arvestame kokku 300 m, muldkeha laiuseks on 1:5 nõlvuse tõttu 32.5 m, kokku 9´750 m^2 + 10% ülekatted = ca 11´000 m^2. 400/50 kN/m kootud PET geotekstiil maksab ca 2.5 eur/m^2 + km, mis teeb materjali maksumuseks 27´500 EUR + km + paigaldus.

Seega tuleb esitatud tingimustel Škepast&Puhkim muldkeha maksumus (jättes vajumiarvutuse siinjuures arvestamata) 92´000 + (27´500 – 12´750) = 106´750 EUR kallim ERC lahendusest.

Geotehniliste arvutuste võrdlustulemused näitavad, kui oluline on põhjaliku ja täpse geotehnilise uuringu olemasolu. Keerulistes tingimustes sõltub selle olemasolust ja usaldusväärsusest märkimisväärsete rahasummade kulutamine või säästmine.

Eksperdid esitasid geotehnilise aruande osas järgmised mõtted. Mait Mets, PhD:

- „Tellija on esitanud ebapädeva ülesande (geotehnilise) uuringu tegijale, kiitnud aruande heaks ja esitanud selle lõpliku tõena projekteerijale. Kuna aruanne ei sisalda projekti koostamiseks vajalikke andmeid, on projekteerijad need andmed ise „leidnud“ ja tuginedes nendele projekteerinud.“
- Nihketugevuse andmed tuleb TK 40 piirkonnas uuesti üle mõõta ning määratleda nõrga pinnase levikuala.
- Üle on vaja kontrollida savikihtide tegelik nihketugevus (ERC kasutatud korrelatsioonid selles piirkonnas ei pruugi kehtida).
- Geotehniline uuring ei sisaldanud savipinnaste kokkusurutavusparameetreid ning Škepast&Puhkim töös ei ole seetõttu kasutatud korrektseid väärtusi, mistõttu vajumid on ülehinnatud 20…30%. ERC töös on vajumid teisalt liiga väikesed, kuna kahe tugevama savikihi OCR on ülehinnatud.
- Enne lõpliku projekti koostamist on vaja hinnata pinnaste mehhaanilised omadused kõikide viirsavi kihtidele. Tuleb selgitada, millega on tegemist TK-40 juures. Kui on tegemist väga nõrga viirsavi erimiga, on vaja määrata ta levikuala.

Prof. Leena Korkiala-Tanttu:

- Kompressiooninäitajad pärinevad vaid ülemisest savikihtist ja seega ei ole andmeid kõikidest kokkusurutavatest kihtidest.
- Kõikide tiivikkatsete puhul on redutseerimistegurina kasutatud 0.8, kuid tegelikult sõltub see väärtus materjali veesisaldusest või voolavuspiirist ja võib olla eri kihtide piires vahelduv.
- Tiivikkatsete osas on nähtav, et TK 40 on ebaõnnestunud. Ka TK 31 sügavuses 2.5 m ja TK 26 sügavuses 1.5 m olev mõõtetulemus ei pruugi olla korrektne, kuna dreenimata nihketugevused on liiga väiksed.
- Geotehnilise uuringu maht on liiga väike arvestades piirkonna olusid ja ebaõnnestunud katsete hulka.
- Tiivikkatse ebaõnnestumine TK 40 punktis on murettekitav, kuna just seal saadi kõige madalamad stabiilsusnäitajad.

2.3. Hinnang muldkehale, teekatendile ja soovitused

Katendi toimivusele andis arvutuslikult hinnangu prof. Pauli Kolisoja Tampere Tehnikakülikoolist. Lisaks anti Aalto ülikoolis prof. Leena Korkiala-Tanttu ja Henry Gustavsson, PhD poolt hinnang paekivisõelmete kasutuskõlblikkusele teede muldkehades.

Paekivisõelmetest ja külmakergetest.

Aastal 2014 tehti Aalto ülikoolis katseid paekivisõelmetega, kus määrati ödomeetris selle kokkusurutavus ja niiskustundlikkus ning külmakerketestiga külmakerkelisus. Käesoleva uuringu raames tehti külmakerkekatseid lisaks puhastele paekivisõelmetele, selle segule Eassalu liivaga suhtes 50/50 ja pestud sõelmetele ning määrati vastupidavus külmumis-sulamistsüklitele (aruanne lisas 3). Lisaks määrati Eesti Keskkonnauuringute Keskuses paekivisõelmete ja selle segu Eassalu liivaga suhtes 50/50 pundumistundlikkus.

Kokkuvõtlikult öeldes (Analema sõelmed):

- Paekivisõelmed ei ole punduvad, vaid need pehmenevad vees ehk on leondumisohtlikud ja kaotavad oma algsest kandevõimest kuni 50% niiskuse tõustes üle optimaalse taseme. Seetõttu on oluline, et need jääksid allapoole pinnaseveetaset.
- Külmakerketesti järgi on pestud sõelmed ja sõelmete (Eassalu) liiva segu suhtes 50/50 vähe külmaohtlikud ega tekita teekatenditele külmakahjusid ka juhul, kui vee juurdepääs külmumistsooni ei ole takistatud.
- Sõelmete (sh segu liivaga ja pestud sõelmete) vastupidavus külmumis-sulamistsüklitele on suhteliselt nõrk ja seetõttu tuleks need paigaldada muldkehas sügavamale, kui mõjuvad talvised külmumis-sulamistsüklid. Materjal ei pea paiknema külmumistsoonist allpool, kuid on oluline, et külmumine ja sulamine ei toimuks materjalis tihemini, kui kord aastas. Minimaalselt peavad sõelmed (või selle segu liivaga) paiknema teekatte pinnast sügavamal, kui on talve jooksul ulatuvad külmumis-sulamistsüklid (Lõuna-Soome jälgimisandmetele tuginedes on piiriks 60 cm).
- Töötlemata sõelmeid ei või kasutada muldkehade töötsoonis, vajalik on kas sõelmete pesemine või segamine kvartsliivaga suhtes 50/50. Sõelmete vastupidavuse suhtes on eelistatavam viimane, külmakerkelisuse osas olid mõlemad sisuliselt külmaohutud, kuid see oleneb kasutatud kvartsliiva terakoostisest. Parim variant oleks sõelmete pesemine ja segamine kvartsliivaga.

Mõlema meeskonna ettepanek kasutada muldkeha ehitamisel paekivisõelmete ja liiva segu suhtes 50/50 on sobilik, kuid siinjuures tuleb võtta arvesse mõned märkused:

- ERC töös nähti ette muldkeha isoleerimine nii alt kui ülalt tuleva vee eest (pakutud oli mitu erinevat varianti) – see ei ole vajalik, kuna segumaterjali külmakerkeohtlikkus on madal. Paesõelmete ja liiva segu kasutamine tuleb nihutada veidi sügavamale, kui see oli praegu ette nähtud. Minimaalne sügavus teekattest peaks olema 60 cm.
- Škepast&Puhkim töös oli segumaterjalile ette antud minimaalne filtratsioonimoodul – see ei ole vajalik, vaid pigem tuleks kontrollida eelkõige segumaterjali terakoostist ning kui see on peenemateraline, kui käesoleva aruande raames testitud materjal, tuleks teha külmakerketest. Materjali paiknemine suhtena teekatte kõrgusesse on sobilik, võib kaaluda ka suurema määra segumaterjali kasutamist.
    - Enne ehitustöödega alustamist on soovituslik teha katseliselt sõelmete ja erinevate liivadega segud määrates külmakerketestiga nende külmakerkelisused leides nii piirolukorra, missugusest terakoostisest erinevaga ei või segumaterjali enam kasutada. Kvaliteedikontrolli tehakse objektil seejärel vaid terastikulise koostise alusel.

Paekivisõelmete uurimise raames tehti Aalto ülikoolis ka külmakerkearvutused, mille järeldusteks olid:

- Pestud paekivisõelmed või sõelmete ja Eassalu liiva segumaterjali külmakerkelisus oli nii vähene, et põhjustas alla 20 mm külmakerke, mis ei ole teekatendile ohtlik.

- Muldkeha peab olema nii kõrge, et külmumissügavus ei ulatuks savikihti. Kui muldkeha kõrgus on 1.25 m ja külmumissügavus 1.6 m (Are piirkonnas hinnanguliselt kord 20 a. jooksul toimuv), tuleb külmakerke suuruseks 50…80 mm (olenevalt savi külmatundlikkusest – seda uuringu käigus ei määratud), mis põhjustab külmakahjusid.
- Seega peaks sisuliselt külmaohutu teekonstruktsiooni kõrgus savi suhtes olema min 1.5…1.6 m (tegelikult oleneb see külmumissügavusest). Osaliselt võib seda tagada ka savi stabiliseerimisega, nagu soovitas ERC töö, mis võimaldab ehitada muldkeha madalamana. Selleks tuleb läbi viia stabiliseeritud segu külmakerkekatsed (eelnevalt tuleb leida sobilik segu koostis).

Muldkeha tuisuohtlikkusest.

Lähteülesandes oli ette antud tuisuohutu muldkeha kõrguseks 1.75 m. Selle vajalikkus on küsitav, lisaks eeldab see suuri pinnasetöömahte. Pigem peaks muldkeha kõrguse määrama tugevus- ja külmakerkearvutustega. Näiteks Soomes tuisuohutu mulde kõrgust projekteerimisjuhendites ette pole nähtud. Mõningaid viiteid siiski leiab, näiteks mainitakse juhendis „Tienrakenteen suunnittelun lähtökohdat“, et laugem nõlv vähendab tuisuohtlikkust ja aastast 1993 on juhend „Arktinen tienrakentaminen“, kus on kirjas, et tee pind tuleks tuisuohtlikkust arvestades tõsta 0.2…0.5 m kõrgemale arvutuslikust lumekihi paksusest. Viimane juhend on ajakohane siiski eelkõige Põhja-Soomes ja see pole üldises kasutuses.

Kui Are ümbersõidul lähtuda sellest, et külmumissügavus on kuni 1.6 m ja kui tehakse ERC töö eeskujul 30 cm sügavuselt savi stabiliseerimine, siis teekonstruktsiooni kõrgus peaks külmakerkeohtu silmas pidades olema 1,3 m. Piirkonna mullakihi paksus on varieeruv, kuid jääb enamasti 30 cm piiridesse, mis tähendab, et tee jääks maapinnast 1 m kõrgusele. Piirkonna arvutuslik lumekihi paksus on 55 cm ja seega jääks tee sellest ca 45 cm kõrgemale, mis on eelnevalt mainitud juhendi soovituse piirides.

Tuisuohutus paraneb veelgi, kui arvestada Škepast&Puhkim töös soovitatud laugemate nõlvadega (1:5 ja 1:6), et teed oleks tulevikus lihtsam (ja ka igas mõttes turvalisem) laiendada.

Teekatend

Teekatendi arvutused tegi prof. Pauli Kolisoja Tampere Tehnikaülikoolist kasutades selleks BISAR-arvutitarkvara. Ta on toonud välja, et tarkvara annab samu tulemusi, kui muud sarnased (näiteks Kenlayer) või ka lõplike elementide meetod. Kontrollarvutustega vaadeldi alumise sideainega seotud kihi tõmbepingeid, killustiku ja liiva peal toimuvaid vertikaalsuunalisi deformatsioone. Teisendamaks arvutustulemusi teekatendi vastu pidamiseks liikluskoormuse suhtes, on kasutatud Soomes läbiviidud uuringute tulemusi. Tulemused eri kombinatsioonidena on esitatud lisas 2.

Kontrollarvutused tehti järgmiste kombinatsioonidena (elastsusmoodulid ei ole harjumuspärased Odemarki moodulid, mistõttu on väärtused sideainega seotud materjalide osas teised):

1. Sideainega seotud kihid 20ºC juures (SMA 3580 MPa, AC bin 3650 MPa, AC base 3895 MPa), KS 1800 MPa, MUK 1000 MPa, killustik 200 MPa, kõik liivad 50 MPa.

- ERC kõrge muldkeha – 7.9 milj. koormustsüklit (määravaks on liiv);
- ERC madal muldkeha – 13.7 milj. koormustsüklit (määravaks on liiv);
- Š&P kõrge/madal muldkeha v.1 – 4.5 milj. koormustsüklit (määravaks on liiv);
- Š&P kõrge/madal muldkeha v.2 – 1.7 milj. koormustsüklit (määravaks on liiv).

2. Sideainega seotud kihid 10ºC juures (SMA 7099 MPa, AC bin 7238 MPa, AC base 7724 MPa), KS 3569 MPa, MUK 1983 MPa, killustik 200 MPa, kõik liivad 50 MPa.

- ERC kõrge muldkeha – 35.3 milj. koormustsüklit (määravaks on liiv);
- ERC madal muldkeha – 62.5 milj. koormustsüklit (määravaks on liiv);
- Š&P kõrge/madal muldkeha v.1 – 17.3 milj. koormustsüklit (määravaks on liiv);
- Š&P kõrge/madal muldkeha v.2 – 5.7 milj. koormustsüklit (määravaks on liiv).

3. Sideainega seotud kihid 10ºC juures, KS 1300 MPa, MUK 1500 MPa, killustik 200 MPa, paesõelmed/liiva segu 100 MPa, keskliiv 100 MPa, peenliiv 50 MPa

- ERC kõrge muldkeha – 41.6 milj. koormustsüklit (määravaks on KS);
- ERC madal muldkeha – 79.6 milj. koormustsüklit (määravaks on KS);
- Š&P kõrge/madal muldkeha v.1 – 12.7 milj. koormustsüklit (määravaks on KS);
- Š&P kõrge/madal muldkeha v.2 – 8.4 milj. koormustsüklit (määravaks on MUK).

4. Sideainega seotud kihid 10ºC juures, KS 1300 MPa, MUK 1000 MPa, killustik 200 MPa, paesõelmed/liiva segu 70 MPa, keskliiv 70 MPa, peenliiv 50 MPa.

- ERC kõrge muldkeha – 33.3 milj. koormustsüklit (määravaks on KS);
- ERC madal muldkeha – 61.7 milj. koormustsüklit (määravaks on KS);
- Š&P kõrge/madal muldkeha v.1 – 10.9 milj. koormustsüklit (määravaks on KS);
- Š&P kõrge/madal muldkeha v.2 – 5.0 milj. koormustsüklit (määravaks on MUK).

Esitatud kombinatsioonide võrdlusest nähtub, kui palju mõjutab arvutustulemusi valitud arvutusparameetrid, mistõttu on keeruline otsustada konstruktsioonide sobilikkuses osas. Lisas 2 on nähtavad kõik arvutatud tulemused ja need on kasutatud lähteandmeid silmas pidades õiged. See, kuidas arvutustulemusi teisendada normtelgede ülesõiduks, on tihti seotud kohalike kogemustega – siin esitatud numbrid tulenesid Soome kogemustele. ERC töös kasutati katendiarvutuseks samuti BISARil põhinevat Rootsi PMS Object´i, mis arvestab sealseid kogemusi. Sellest tuleb järeldada seda, et ühe riigi kogemusi ei ole võimalik otse üle kanda teise riiki ja kui seda siiski tehakse, võivad tulemused olla mõistmatud. Samuti ei ole võimalik teha keerukamaid (täpsemaid) arvutusskeeme enne, kui ei tunta kohalike materjalide neid omadusi, mida nendes arvutustes tuleb kasutada.

Kirjeldatud teemat käsitleti Tallinna Tehnikakõrgkooli optimaalse tee konstruktsiooni välja töötamise esimese etapi töös, milles kokkuvõtlikult nenditi, et <u>tõeliselt optimaalse ja pikaealise teekatendi aluseks on kohalikul tasandil kasutatavate materjaliomaduste väga hea tundmine.</u> Ühest, teises ja kolmandast kohast kokku „laenatud“ süsteem ei ole toimiv.

Arvestades Tampere Tehnikaülikoolis tehtud arvutusi, Eesti kogemusi ja Tallinna Tehnikakõrgkoolis tehtud uuringuid nii Teeregistri baasil kui HVS stendikatsetes, on neljast käsitletud katendist kõige sobilikum ERC töö kõrge muldkehaga katend:

1. 3+1 cm SMA;
2. 4 cm AC 12 surf;
3. 11.5 cm AC base;
4. 15 cm KS32;
5. 21 cm killustikku;
6. Täitematerjal (liiv või kruus, paesõelmete segu alates min. 60 cm teekattest).

Teisalt on väga huvipakkuv ERC töö peatüki 7.3.2 esitatud katend, mis sisaldab tsementstabiliseeritud kihti. Tänu selle suurele jäikusele saab asfaltkatte paksus olla oluliselt õhem, kui kõikides muudes katendites kasutatud. Tsementstabiliseeritud kihis saab teoreetiliselt kasutada paekivisõelmeid ning sideainena põlevkivituha ja tsemendi segu koos jäikust vähendava lisandiga, et segusse ei tekiks sisse temperatuuripragusid. Võimalus on käsitleda seda segu mõnes mõttes ka betoonkattena nii, et ehituse käigus tehakse sisse põikvuugid, millega kontrollitakse põikpragude teket. Taolise katendi näol oleks tegemist

oluliselt enam kohalikke materjalidega arvestava kihiga, kui kõikidel muudel esitatud juhtudel. Seega on soovituslik uurida nimetatud katendikihi sobilikku koostist ja rajamisvõimalusi täiendavalt.

KOKKUVÕTE

Hinnates kahte koostatud tööd – ERC Konsultatsiooni OÜ (töö 1) ja Škepast&Puhkim OÜ (töö 2) – saab teha järgnevad järeldused:

- Töö 1 on oluliselt innovaatilisema lähenemisega täites selles osas paremini võistlustöö mõtet, kui töö 2. Kahjuks ei ole töö 1 viidud vajalikule tasemele, suur osa lähteülesandes nõutust on tegemata, mistõttu on tegemist pigem esimese kui II etapi tööga.
    - Töö 1 ülesehitus oli ebaühtlane, see on sisemiselt vastuoluline ja ei ole üheselt arusaadav. Samuti sisaldab see mitmeid olulisi (sh tähelepanematuse) vigu ja ebaolulist informatsiooni.
- Töö 1 geotehnilised arvutused on läbi viidud heal tasemel ja kõik on vajalikul määral põhjendatud. Tänu projektmeeskonnas olnud geotehnikule saadi väga väärtuslikke andmeid, mida geotehniliste uuringute aruanne ei sisaldanud ja tänu millele saaks kasutada optimaalsemaid lahendusi.
- Töö 2 vastas suures osas lähteülesandes esitatule, kuid tegemist oli pigem „tavapärase“ kui innovaatilise lahendusega, mistõttu see pigem ei vasta tööde koostamise tuumikmõttele.
- Mõlemas töös on esitamata kõige olulisem komponent, milleks oli metoodika optimaalse tee konstruktsiooni välja töötamiseks. Siinkohal mõistetakse seda kui tegevuste loetelu, mida järgida saavutamaks ükskõik kus kohas Eestis kõige optimaalsema tee lahenduse – sealhulga uuringutegevus, laborikatsed, katendikihtide eluea ja vastupidavuse uurimised ning saadud andmete sisestamine geotehnilistesse, katendi- kui elueaarvutustesse. Mõlemas töös esitatud väited ja eeldused on kontrollimata ja/või põhjendamata, samuti pole enamasti kirjeldatud metoodikat ja kontrolltegevusi, mida viia läbi jõudmaks nii kõige optimaalsema lahenduseni.

Tööde esiletõstmist väärivad punktid:

- Töö 1 savipinnase stabiliseerimine on hea idee vähendamaks karjäärides kaevandatava materjali hulka. Selle rakendamiseks on vaja siiski metoodikat, mille alusel saaks kinnitada saadava tulemuse sobilikkust.
- Töö 1 sisaldas suurel hulgal katendiarvutusi, millest võiks edasi arendada tsementstabiliseeritud kihi kasutusvõimalikkust, kuna läbi selle saaks vähendada asfaltkatte paksusi ning kasutada suurel hulgal kohalikke (jääk)materjale. Silmas peaks pidama paekivisõelmete ja põlevkivituha kasutusvõimalusi (taolisi uuringuid on mingil määra tehtud ja need saab võtta esimesteks lähteandmeteks).
- Töö 2 heaks ideeks on laugete nõlvusega tee. See võimaldab teha 2+1 laiendamise tulevikus 2+2 peale lihtsamalt. Samas tõstetakse läbi laugete nõlvade liiklusohutust ja vähendatakse muldkeha tuisuohtlikkust, mistõttu ei oleks vajalik järgida Projekteerimisnormide tuisuohutu muldkeha kõrguse nõuet ja saaks planeerida muldkeha madalamaks.

Tööde geotehniliste arvutuste pool tõstis esile geotehniliste uuringute tähtsuse – kui sellega saadakse usaldusväärseid ja täpseid andmeid, on võimalik koostada väga optimaalsed teekonstruktsioonide lahendused muldkehade osas. Vastupidisel juhul tuleb teha üledimensioonimine olemaks kindel, et rajatud ehitis on püsiv ja turvaline.

Optimaalse tee konstruktsiooni projektiga on võimalusel soovituslik jätkata kolmandasse

etappi, kus tuleks koostada järgitav metoodika koos vajalike nõuete ja soovitustega tegevusteks, mis viivad arvutustega põhjendatava optimaalse tee konstruktsiooni loomisele.

Are ümbersõidu projekteerimise osas tuleks:

- leida lahendus savipinnase stabiliseerimiseks, et oleks külmakerkeohtu silmas pidades võimalik hoida muldkeha madalamana;
- katsetada teekatendisse sobiliku stabiliseeritud segu erinevaid variatsioone (Aalto ülikool on valmis seda magistritudengite väljaõppe raames tegema);
- katsetada paesõelmete ja erinevate kohalike liivade segude külmakerkelisi omadusi võimaldamaks ehitusaegselt teha kvaliteedikontrolli vaid terastikulise koostise põhjal.

Kumb töö osutus võitjaks?

- Mõlemad tööd on head omal viisil, kuid kumbki polnud tehtud sellisel tasemel, mida lähteülesandes nõuti ja eeldati. ERC töö oli innovaatilisem, kuid lõpetamata, Škepast&Puhkim´i töö oli suures osas valmis, kuid mitte kuigi uuenduslik ega sisaldanud ideid, mida arendada edasi kolmandas etapis.
- Kõige määravamaks sai see, et kumbki töö polnud esitanud järgitavat metoodikat, kuidas jõuda optimaalse tee konstruktsiooni loomisele.
- Seega soovitame võitjat mitte välja kuulutada ja kasutada ettenähtud preemiat soovitatud kolmanda etapi tööde tegemiseks.

Lisa 1. Geotehniliste arvutustulemuste võrdlus

PA	**ERC** *muld γ = 15 kN/m^3, Cu = 2 kPa;* *mulle γ = 22 kN/m^3, φ = 35°, c = 5 kPa (kõrgus 2.0 m)*		**Škepast&Puhkim** *muld γ = 15 kN/m^3, Cu = 10 kPa;* *mulle γ = 20 kN/m^3, φ = 34°, c = 0 kPa (kõrgus 1.75 m)*	
	Geoloogia	**Arvutustulemus**	**Geoloogia**	**Arvutustulemus**
4	<u>1 m plastne savi:</u> *γ = 18.4 kN/m^3, Cu = 35 kPa, Cc = 0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas* <u>Moreen:</u> *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 5.01 cm	<u>0.75 m savi:</u> *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* <u>2.5 m rohke liivaga möllsavi:</u> *γ = 18.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa* <u>Kruusaga mölline peenliiv:</u> *γ = 20.5 kN/m^3, φ = 35°, c = 0 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.62 Max. Vajum 8 cm
6	<u>1.7 m plastne savi:</u> *γ = 18.4 kN/m^3, Cu = 35 kPa, Cc = 0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas* <u>Moreen:</u> *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 5.03 cm	<u>0.8 m savi:</u> *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* <u>Rohke liivaga möllsavi:</u> *γ = 18.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.53 Max. Vajum 7 cm
8	<u>1 m plastne savi:</u> *γ = 18.4 kN/m^3, Cu = 35 kPa, Cc = 0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas* <u>Moreen:</u> *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 5.02 cm	<u>3.2 m rohke liivaga möllsavi:</u> *γ = 18.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa* <u>Kruusaga mölline peenliiv:</u> *γ = 20.5 kN/m^3, φ = 35°, c = 0 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.66 Max. Vajum 5 cm

10	Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 1.73 cm	-	-
11	-	-	Kruusaga ja rohke liivaga savimöll $\gamma = 21.5\ kN/m^3$, $Cu = 30\ kPa$	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 2.06 Max. Vajum 4 cm
12	Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 1.73 cm	-	-
14	Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 1.73 cm	Kruusaga ja rohke liivaga savimöll $\gamma = 21.5\ kN/m^3$, $Cu = 30\ kPa$	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 2.30 Max. Vajum 3 cm
16	0.6 m liiv $\gamma = 20\ kN/m^3$, $\varphi = 35^o$, $c = 5\ kPa$ 1.4 m pehme savi $\gamma = 16.6\ kN/m^3$, $Cu = 15\ kPa$, $Cc = 0.79$, $Cr = 0.07$, $Cv = 0.74\ m^2/aastas$ Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.14 Max. Vajum 2.05 cm	0.6 m mölline peenliiv $\gamma = 20\ kN/m^3$, $Cu = 32\ kPa$ 1.85 m savi $\gamma = 17.4\ kN/m^3$, $Cu = 10\ kPa$ Rohke liivaga möllsavi: $\gamma = 18.6\ kN/m^3$, $Cu = 15\ kPa$	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.39 Max. Vajum 14.5 cm *(nõlvusega 1:5 F = 1.55)*
18	1.6 m plastne savi $\gamma = 18.4\ kN/m^3$, $Cu = 35\ kPa$, $Cc =$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75	-	-

	0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas Moreen: *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Max. Vajum 5.03 cm		
19	-	-	0.4 m savi *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* Rohke liivaga möllsavi: *γ = 18.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.52 Max. Vajum 10 cm
20	2.8 m plastne savi *γ = 18.4 kN/m^3, Cu = 35 kPa, Cc = 0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas* Moreen: *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 4.88 cm	-	-
22	2.4 m plastne savi *γ = 18.4 kN/m^3, Cu = 35 kPa, Cc = 0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas* Moreen: *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 4.90 cm	0.7 m savi *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* 0.9 m rohke liivaga möllsavi: *γ = 18.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa* 1.6 m kruusaga mölline peenliiv: *γ = 20.5 kN/m^3, φ = 35°, c = 0 kPa* Lubjakivi	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.75 Max. Vajum 5.5 cm
24	2.4 m pehme savi *γ = 16.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa, Cc = 0.79, Cr = 0.07, Cv = 0.74 m^2/aastas*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.09	2.6 m savi *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.5

	Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$	Max. Vajum 4.44 cm	1.05 m kruusaga mölline peenliiv: $\gamma = 20.5\ kN/m^3$, $\varphi = 35^o$, $c = 0\ kPa$ Kruusa ja rohke liivaga savimöll $\gamma = 21.5\ kN/m^3$, $Cu = 30\ kPa$	Max. Vajum 13 cm
26	0.7 m plastne savi $\gamma = 18.4\ kN/m^3$, $Cu = 35\ kPa$, $Cc = 0.47$, $Cr = 0.04$, $Cv = 0.62\ m^2/aastas$ 2.5 m pehme savi $\gamma = 16.6\ kN/m^3$, $Cu = 15\ kPa$, $Cc = 0.79$, $Cr = 0.07$, $Cv = 0.74\ m^2/aastas$ Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.15 Max. Vajum 4.83 cm	-	-
27	-	-	2.95 m savi $\gamma = 17.4\ kN/m^3$, $Cu = 10\ kPa$ 0.7 m kruusaga mölline peenliiv: $\gamma = 20.5\ kN/m^3$, $\varphi = 35^o$, $c = 0\ kPa$ Kruusa ja rohke liivaga savimöll $\gamma = 21.5\ kN/m^3$, $Cu = 30\ kPa$	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.27 Max. Vajum 9.5 cm
28	0.5 m plastne savi $\gamma = 18.4\ kN/m^3$, $Cu = 35\ kPa$, $Cc = 0.47$, $Cr = 0.04$, $Cv = 0.62\ m^2/aastas$ 2.3 m pehme savi $\gamma = 16.6\ kN/m^3$, $Cu = 15\ kPa$, $Cc =$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.15 Max. Vajum 5.20 cm	-	-

	0.79, Cr = 0.07, Cv = 0.74 m^2/aastas Moreen: *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*			
29	-	-	2.3 m savi *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* 1.0 m rohke liivaga möllsavi: *γ = 18.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa* Kruusa ja rohke liivaga savimöll *γ = 21.5 kN/m^3, Cu = 30 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.34 Max. Vajum 8 cm
30	1.5 m pehme savi *γ = 16.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa, Cc = 0.79, Cr = 0.07, Cv = 0.74 m^2/aastas* 2.0 m voolav savi *γ = 15.3 kN/m^3, Cu = 10 kPa, Cc = 1.33, Cr = 0.09, Cv = 0.35 m^2/aastas* Moreen: *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 0.765 Max. Vajum 4.45 cm	-	-
31	-	-	1.65 m savi (kihiga pole arvestatud) *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* 2.15 m rohke liivaga möllsavi (arvutuses kasutatud kihipaksus on 3.8 m): *γ = 18.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.53 Max. Vajum 9 cm

			Lubjakivi	
32	<u>0.7 m plastne savi</u> *γ = 18.4 kN/m^3, Cu = 35 kPa, Cc = 0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas* <u>2.3 m pehme savi</u> *γ = 16.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa, Cc = 0.79, Cr = 0.07, Cv = 0.74 m^2/aastas* <u>Moreen:</u> *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.197 Max. Vajum 4.85 cm	-	-
34	<u>1.0 m plastne savi</u> *γ = 18.4 kN/m^3, Cu = 35 kPa, Cc = 0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas* <u>2.5 m pehme savi</u> *γ = 16.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa, Cc = 0.79, Cr = 0.07, Cv = 0.74 m^2/aastas* <u>Moreen:</u> *γ = 22 kN/m^3, φ = 38°, c = 15 kPa*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.189 Max. Vajum 4.83 cm	<u>2.55 m savi</u> *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* <u>0.9 m rohke liivaga möllsavi:</u> *γ = 18.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa* <u>Kruusa ja rohke liivaga savimöll</u> *γ = 21.5 kN/m^3, Cu = 30 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.24 Max. Vajum 6 cm *Piisaks 200 kN tekstiil?*
36	<u>1.0 m plastne savi</u> *γ = 18.4 kN/m^3, Cu = 35 kPa, Cc = 0.47, Cr = 0.04, Cv = 0.62 m^2/aastas* <u>1.0 m pehme savi</u> *γ = 16.6 kN/m^3, Cu = 15 kPa, Cc = 0.79, Cr = 0.07, Cv = 0.74 m^2/aastas*	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.44 Max. Vajum 4.94 cm	<u>1.95 m savi</u> *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* <u>Kruusa ja rohke liivaga savimöll</u> *γ = 21.5 kN/m^3, Cu = 30 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 2.51 Max. Vajum 4 cm

	Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$			
38	0.7 m plastne savi $\gamma = 18.4\ kN/m^3$, $Cu = 35\ kPa$, $Cc = 0.47$, $Cr = 0.04$, $Cv = 0.62\ m^2/aastas$ 1.5 m pehme savi $\gamma = 16.6\ kN/m^3$, $Cu = 15\ kPa$, $Cc = 0.79$, $Cr = 0.07$, $Cv = 0.74\ m^2/aastas$ Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 1.34 Max. Vajum 4.91 cm	-	-
39	-	-	4.05 m savi $\gamma = 17.4\ kN/m^3$, $Cu = 10\ kPa$ Kruusa ja rohke liivaga savimöll $\gamma = 21.5\ kN/m^3$, $Cu = 30\ kPa$	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.11 Max. Vajum 10 cm *Vaja tekstiil ja laugem nõlv*
40	1.5 m plastne savi $\gamma = 18.4\ kN/m^3$, $Cu = 35\ kPa$, $Cc = 0.47$, $Cr = 0.04$, $Cv = 0.62\ m^2/aastas$ 2.5 m voolav savi $\gamma = 15.3\ kN/m^3$, $Cu = 10\ kPa$, $Cc = 1.33$, $Cr = 0.09$, $Cv = 0.35\ m^2/aastas$ Moreen: $\gamma = 22\ kN/m^3$, $\varphi = 38^o$, $c = 15\ kPa$	Nõlvus 1:1.5 Varutegur F = 0.981 Max. Vajum 4.83 cm	-	-

41	-	-	<u>4.8 m savi</u> *γ = 17.4 kN/m^3, Cu = 10 kPa* <u>0.5 m kruusaga mölline peenliiv:</u> *γ = 20.5 kN/m^3, φ = 35°, c = 0 kPa* <u>Kruusa ja rohke liivaga savimöll</u> *γ = 21.5 kN/m^3, Cu = 30 kPa*	Nõlvus 1:3 Varutegur F = 1.00 Max. Vajum 12 cm *Vaja tekstiil ja laugem nõlv*

Lisa 2. Prof. Pauli Kolisoja teekatendiarvutused (lisas 2.1 on selle eestikeelne tõlge)

Tarkasteltavat rakenteet ja niiden mitoitusarvot tulkittuna suomalaisten ohjeiden mukaan lähimmäksi vastaaville materiaaleille

Työ 1: Korkea penger (200 cm + 30 cm)

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
11.5 cm AC base	115	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm KS32 (uusista materiaaleista)	150	KOST2	1800	1250	KOST ”Normaali”
21 cm kalkkikivimurske (LA35)	210	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
147 cm 50/50 sekotus kalkkikivijäte/luonnonhiekka	1470	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
30 cm saven stabilointi (akrüülipolümeeri tai sementtistabilointi)	300		?	?	Ei oleellinen, lienee vähintään 50 MPa

Työ 1: Matala penger (124 cm)

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
12 cm AC base	120	ABK	3895	2500	BIT70/100
18 cm KS32 (uusista materiaaleista)	180	KOST2	1800	1250	KOST ”Normaali”
21 cm kalkkikivimurske (LA35)	210	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
35 cm 50/50 sekotus kalkkikivijäte/luonnonhiekka	300	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
30 cm saven stabilointi (akrüülipolümeeri tai sementtistabilointi)	300		?	?	Ei oleellinen, lienee vähintään 50 MPa

Työ 2: Korkea penger 1 (175 cm)

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC 16 bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
7 cm AC 32 base	70	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm komposiittistabilointi	150	KOST2	1800	1250	KOST ”Normaali”
25 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
Suodatinkangas					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
65 cm täytemateriaali (50/50 sekotus)	650	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella

Matala penger 1 (125 cm) on päällysrakennemitoituksen kannalta identtinen, koska sidottujen kerrosten alapuolinen rakenne on tehty mitoitusmenettelyn ohjeitten mukaisesti tulkittuna toisiaan vastaavista materiaaleista molemmissa tapauksissa yli 0,5 m paksuudelta. Pohjamaan pinnassa kuivakuorikerros, jonka deformaatioriski näillä rakennepaksuuksilla vähäinen.

Työ 2: Korkea penger 2 (175 cm)

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
5 cm AC 16 bin	50	AB	3650	2500	BIT70/100
8 cm AC 32 base	80	ABK	3895	2500	BIT70/100
9 cm bitumilla sidottu murske	90	VBST1	1000	700	VBST ”Laiha”
25 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
Suodatinkangas					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
69 cm täytemateriaali (50/50 sekotus)	690	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella

Matala penger 2 (125 cm) päällysrakennemitoituksen kannalta jälleen identtinen, koska sidottujen kerrosten alapuolinen rakenne on tehty mitoitusmenettelyn ohjeitten mukaisesti tulkittuna toisiaan vastaavista materiaaleista molemmissa tapauksissa yli 0,7 m paksuudelta. Pohjamaan pinnassa kuivakuorikerros, jonka deformaatioriski näillä rakennepaksuuksilla vähäinen.

Huomioita moduuliarvojen valinnasta

- Lämpötilakorjaus 20 °C → 10 °C kaksinkertaistaa sidottujen materiaalien moduuliarvot (lämpötilan korjauskerroin suomalaisen ohjeen mukaan tässä tapauksessa 1,983)
- Ohjeessa tarjolla useampi bitumilaatu; analyyttisen mitoituksen moduuliarvot valittu BIT70/100 mukaan; edustaa puoliväliä tai tätä pehmeämpää bitumia
- ABK:n moduulit Suomessa selvästi suurempia; valittu BIT70/100 joka tässä on pehmein vaihtoehto
- KOST2 jäykempi kahdesta tarjolla olevasta vaihtoehdosta
- Kalkkikivimurskeen moduuliksi valittu hiukan varovaisesti 200 MPa, koska kalkkikivi suomalaisia kovia kiviä pehmeämpää
- 50/50 seoksen moduuliksi valittu 50 MPa, vaikka ylittää ohjealueen rajan vain niukasti; seoksen hienoainesmäärä kuitenkin melko korkea, joten arvioidaan moduuli varovaisesti
- Bitumilla sidotulle murskeelle ei suoraan löydy vastaavaa ohjearvoa; käytetty heikommille bitumistabiloinneille (VBST1/BEST1 ”laiha”) suositeltuja arvoja 1000 MPa (analyyttinen mitoitus) ja 700 (Odemark)
- Keskliiv aika selkeästi 50 MPa ohjealueella
- Peenliiv menee lähelle 35 MPa ohjealuetta, mutta hienoainesta erittäin vähän, joten 50 MPa lienee tällekin materiaalille ok tulkinta

Laskennoissa käytetty kuormitus

- Pyöräkuormana käytetty 50 kN eli puolen normaalista mitoitusakselipainosta
- Yksittäispyöräkuormituksella suurempi rasitusvaikutus kuin paripyöräkuormituksella
- Tasaiseksi pintapaineeksi tien ja pyörän välillä otaksuttu 800 kPa
- Edellä mainituilla otaksumilla ympyränmuotoisen kuormitusalan halkaisija 0,282 m

Laskelmien periaatteista

Rakenteiden jännitys-muodonmuutostilan ratkaisemisessa laskentatyökaluna on käytetty alun perin öljy-yhtiö Shellin kehittämää BISAR-ohjelmaa. Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuva ohjelma hyödyntää nk. Burmisterin teoriaa ja sen on muilla rakenteilla todettu antavan vertailukelpoisia laskentatuloksia muiden kerrosrakennelaskentaohjelmistojen (esim. Kenlayer) samoin kuin elementtimenetelmään perustuvien ratkaisujen kanssa.

Kriittisiä rasituksina mallinnetuista rakenteista on tarkasteltu alimman sidotun kerroksen alapinnan vaakasuuntaista venymää suoraan kuormitusalan keskipisteen alapuolella sekä kalkkikivimurskekerroksen ja sen alla olevan ylimmän hiekkakerroksen yläpintojen pystysuuntaisia muodonmuutoksia niin ikään suoraan kuormitusalan keskipisteen alapuolella.

Kriittisten rasitusten muuntamisessa niitä vastaaviksi rakenteen sallituiksi kuormituskertaluvuiksi on käytetty Suomen tiehallinnon julkaisussa ’Tietoa tiensuunniteluun nro 71D’ esitettyjä kestävyysmalleja. Sidottujen rakennekerrosten osalta kestävyysmallien kokeellista verifiointia on tehty mm. 1990-luvulla toteutetussa Tien pohja- ja päällysrakenteet –tutkimusohjelmassa (TPPT). Sitomattomien kerrosten osalta kestävyysmallien kokeellista verifiointia ei käsitykseni mukaan ole tehty kovinkaan systemaattisesti – ennemminkin kestävyysmallit lienee formuloitu siten, että niiden avulla päädytään suunnilleen vastaavanlaisiin rakennekokonaisuuksiin kuin Suomessa laajasti sovelletulla Odemarkin kantavuusmitoituksellakin päästään.

Laskentatulokset 'Tierakenteen suunnittelu' –ohjeen mukaisilla kestävyysmalleilla – analyyttinen mitoitus:

Työ 1: Korkea penger (200 cm + 30 cm)

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST2 venymä	119	41´580´444
Kalkkikivimurske kok.puristuma	242	5´670´506´102
Hiekka kok.puristuma	301	7´967´467

Työ 1: Matala penger (124 cm)

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST2 venymä	103	79´631´141
Kalkkikivimurske kok.puristuma	206	15´202´475´693
Hiekka kok.puristuma	262	13´730´311

Työ 2: Korkea penger 1 (175 cm) / Matala penger 1 (125 cm)

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST2 venymä	149	15´118´623
Kalkkikivimurske kok.puristuma	325	932´097´812
Hiekka kok.puristuma	348	4´510´080

Työ 2: Korkea penger 2 (175 cm) / Matala penger 2 (125 cm)

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
VBST1 venymä	201	4´176´568
Kalkkikivimurske kok.puristuma	442	141´841´316
Hiekka kok.puristuma	445	1´719´452

Kantavuusmitoitus Odemarkin menetelmällä:
Lasketut kantavuudet (rakenteen kokonaisjäykkyydet) päällysteen päältä:

Työ 1	Kantavuus (MPa)
Korkea penger (200 cm + 30 cm)	450
Matala penger (124 cm)	504
Työ 2	
Korkea penger 1 (175 cm) / Matala penger 1 (125 cm)	367
Korkea penger 2 (175 cm) / Matala penger 2 (125 cm)	284

Työ 2: Korkea penger 1 (175 cm) – mitoituslämpötila 10°C

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 10°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	7099	2500	BIT70/100
4 cm AC 16 bin	40	AB	7238	2500	BIT70/100
7 cm AC 32 base	70	ABK	7724	2500	BIT70/100
15 cm komposiittistabilointi	150	KOST2	3569	1250	KOST ”Normaali”
25 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
Suodatinkangas					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
65 cm täytemateriaali (50/50 sekotus)	650	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella

Matala penger 1 (125 cm) on päällysrakennemitoituksen kannalta identtinen, koska sidottujen kerrosten alapuolinen rakenne on tehty mitoitusmenettelyn ohjeitten mukaisesti tulkittuna toisiaan vastaavista materiaaleista molemmissa tapauksissa yli 0,5 m paksuudelta. Pohjamaan pinnassa kuivakuorikerros, jonka deformaatioriski näillä rakennepaksuuksilla vähäinen.

Työ 2: Korkea penger 2 (175 cm) – mitoituslämpötila 10°C

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 10°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	7099	2500	BIT70/100
5 cm AC 16 bin	50	AB	7238	2500	BIT70/100
8 cm AC 32 base	80	ABK	7724	2500	BIT70/100
9 cm bitumilla sidottu murske	90	VBST1	1983	700	VBST ”Laiha”
25 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
Suodatinkangas					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella
69 cm täytemateriaali (50/50 sekotus)	690	Hiekka50	50	50	Rakeisuuden perusteella

Matala penger 2 (125 cm) päällysrakennemitoituksen kannalta jälleen identtinen, koska sidottujen kerrosten alapuolinen rakenne on tehty mitoitusmenettelyn ohjeitten mukaisesti tulkittuna toisiaan vastaavista materiaaleista molemmissa tapauksissa yli 0,7 m paksuudelta. Pohjamaan pinnassa kuivakuorikerros, jonka deformaatioriski näillä rakennepaksuuksilla vähäinen.

Työ 1: Korkea penger (200 cm + 30 cm) – mitoituslämpötila 10°C

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST2 venymä	75	331´951´600
Kalkkikivimurske kok.puristuma	152	97´790´128´998
Hiekka kok.puristuma	206	35´259´067

Työ 1: Matala penger (124 cm) – mitoituslämpötila 10°C

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST2 venymä	64	677´704´811
Kalkkikivimurske kok.puristuma	128	280´076´495´654
Hiekka kok.puristuma	178	62´533´222

Työ 2: Korkea penger 1 (175 cm) / Matala penger 1 (125 cm) – mitoituslämpötila 10°C

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST2 venymä	95	114´576´151
Kalkkikivimurske kok.puristuma	206	15´202´475´693
Hiekka kok.puristuma	247	17´302´171

Työ 2: Korkea penger 2 (175 cm) / Matala penger 2 (125 cm) – mitoituslämpötila 10°C

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
VBST1 venymä	135	25´043´781
Kalkkikivimurske kok.puristuma	292	1´795´494´622
Hiekka kok.puristuma	328	5´688´540

Työ 1: Korkea penger (200 cm + 30 cm) - vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 1

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
11.5 cm AC base	115	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm KS32 (uusista materiaaleista)	150	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
21 cm kalkkikivimurske (LA35)	210	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
147 cm 50/50 sekotus kalkkikivijäte/luonnonhiekka	1470	Hiekka100	100	100	
30 cm saven stabilointi (akrüülipolümeeri tai sementtistabilointi)	300		?	?	Ei oleellinen, lienee vähintään 50 MPa

Työ 1: Matala penger (124 cm) - vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 1

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
12 cm AC base	120	ABK	3895	2500	BIT70/100
18 cm KS32 (uusista materiaaleista)	180	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
21 cm kalkkikivimurske (LA35)	210	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
35 cm 50/50 sekotus kalkkikivijäte/luonnonhiekka	300	Hiekka100	100	100	
30 cm saven stabilointi (akrüülipolümeeri tai sementtistabilointi)	300		?	?	Ei oleellinen, lienee vähintään 50 MPa

Työ 2: Korkea penger 1 (175 cm) - vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 1

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC 16 bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
7 cm AC 32 base	70	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm komposiittistabilointi	150	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
25 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
Suodatinkangas					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka100	100	100	
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka70	70	70	
65 cm täytemateriaali (50/50 sekotus)	650	Hiekka100	100	100	

Matala penger 1 (125 cm) on päällysrakennemitoituksen kannalta identtinen, koska sidottujen kerrosten alapuolinen rakenne on tehty mitoitusmenettelyn ohjeitten mukaisesti tulkittuna toisiaan vastaavista materiaaleista molemmissa tapauksissa yli 0,5 m paksuudelta. Pohjamaan pinnassa kuivakuorikerros, jonka deformaatioriski näillä rakennepaksuuksilla vähäinen.

Työ 2: Korkea penger 2 (175 cm) - vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 1

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
5 cm AC 16 bin	50	AB	3650	2500	BIT70/100
8 cm AC 32 base	80	ABK	3895	2500	BIT70/100
9 cm bitumilla sidottu murske	90	VBST2	1500	1050	VBST ”Normaali”
25 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
Suodatinkangas					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka100	100	100	
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka70	70	70	
69 cm täytemateriaali (50/50 sekotus)	690	Hiekka100	100	100	

Matala penger 2 (125 cm) päällysrakennemitoituksen kannalta jälleen identtinen, koska sidottujen kerrosten alapuolinen rakenne on tehty mitoitusmenettelyn ohjeitten mukaisesti tulkittuna toisiaan vastaavista materiaaleista molemmissa tapauksissa yli 0,7 m paksuudelta. Pohjamaan pinnassa kuivakuorikerros, jonka deformaatioriski näillä rakennepaksuuksilla vähäinen.

Työ 1: Korkea penger (200 cm + 30 cm) – vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 1

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST1 venymä	119	41´580´444
Kalkkikivimurske kok.puristuma	275	2´592´323´660
Hiekka kok.puristuma	231	527´396´806

Työ 1: Matala penger (124 cm) – vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 1

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST1 venymä	103	79´631´141
Kalkkikivimurske kok.puristuma	235	6´786´952´150
Hiekka kok.puristuma	205	982´467´730

Työ 2: Korkea penger 1 (175 cm) / Matala penger 1 (125 cm) – vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 1

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST1 venymä	155	12´657´788
Kalkkikivimurske kok.puristuma	367	442´866´670
Hiekka kok.puristuma	261	279´163´650

Työ 2: Korkea penger 2 (175 cm) / Matala penger 2 (125 cm) – vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 1

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
VBST2 venymä	172	8´420´228
Kalkkikivimurske kok.puristuma	417	202´595´709
Hiekka kok.puristuma	290	161´236´121

Työ 1: Korkea penger (200 cm + 30 cm) - vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 2

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
11.5 cm AC base	115	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm KS32 (uusista materiaaleista)	150	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
21 cm kalkkikivimurske (LA35)	210	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
147 cm 50/50 sekotus kalkkikivijäte/luonnonhiekka	1470	Hiekka70	70	70	
30 cm saven stabilointi (akrüülipolümeeri tai sementtistabilointi)	300		?	?	Ei oleellinen, lienee vähintään 50 MPa

Työ 1: Matala penger (124 cm) - vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 2

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
12 cm AC base	120	ABK	3895	2500	BIT70/100
18 cm KS32 (uusista materiaaleista)	180	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
21 cm kalkkikivimurske (LA35)	210	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
35 cm 50/50 sekotus kalkkikivijäte/luonnonhiekka	300	Hiekka70	70	70	
30 cm saven stabilointi (akrüülipolümeeri tai sementtistabilointi)	300		?	?	Ei oleellinen, lienee vähintään 50 MPa

Työ 2: Korkea penger 1 (175 cm) - vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 2

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC 16 bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
7 cm AC 32 base	70	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm komposiittistabilointi	150	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
25 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
Suodatinkangas					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka70	70	70	
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	
65 cm täytemateriaali (50/50 sekotus)	650	Hiekka100	100	100	

Matala penger 1 (125 cm) on päällysrakennemitoituksen kannalta identtinen, koska sidottujen kerrosten alapuolinen rakenne on tehty mitoitusmenettelyn ohjeitten mukaisesti tulkittuna toisiaan vastaavista materiaaleista molemmissa tapauksissa yli 0,5 m paksuudelta. Pohjamaan pinnassa kuivakuorikerros, jonka deformaatioriski näillä rakennepaksuuksilla vähäinen.

Työ 2: Korkea penger 2 (175 cm) - vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 2

Kerros	Paksuus (mm)	Vastaava suomal.	Moduuli 20°C	Moduuli Odemark	Huom!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
5 cm AC 16 bin	50	AB	3650	2500	BIT70/100
8 cm AC 32 base	80	ABK	3895	2500	BIT70/100
9 cm bitumilla sidottu murske	90	VBST1	1000	700	VBST ”Laiha”
25 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Rakeisuuden perusteella
Suodatinkangas					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka70	70	70	
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	
69 cm täytemateriaali (50/50 sekotus)	690	Hiekka100	100	100	

Matala penger 2 (125 cm) päällysrakennemitoituksen kannalta jälleen identtinen, koska sidottujen kerrosten alapuolinen rakenne on tehty mitoitusmenettelyn ohjeitten mukaisesti tulkittuna toisiaan vastaavista materiaaleista molemmissa tapauksissa yli 0,7 m paksuudelta. Pohjamaan pinnassa kuivakuorikerros, jonka deformaatioriski näillä rakennepaksuuksilla vähäinen.

Työ 1: Korkea penger (200 cm + 30 cm) – vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 2

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST1 venymä	125	33´323´867
Kalkkikivimurske kok.puristuma	296	1´651´977´627
Hiekka kok.puristuma	278	132´249´773

Työ 1: Matala penger (124 cm) – vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 2

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST1 venymä	109	61´720´752
Kalkkikivimurske kok.puristuma	231	7´539´232´822
Hiekka kok.puristuma	245	255´131´590

Työ 2: Korkea penger 1 (175 cm) / Matala penger 1 (125 cm) – vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 2

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
KOST1 venymä	160	10´972´625
Kalkkikivimurske kok.puristuma	362	481´671´256
Hiekka kok.puristuma	319	64´672´005

Työ 2: Korkea penger 2 (175 cm) / Matala penger 2 (125 cm) – vaihtoehtoiset materiaaliparametrit 2

Tarkasteltava rasitus	Venymä (microstrain)	Kuormituskertaluku
VBST1 venymä	193	5´014´111
Kalkkikivimurske kok.puristuma	444	137´974´040
Hiekka kok.puristuma	376	27´507´497

Tulosten tarkastelua:
Laskelmista saatujen tulosten perusteella voidaan tehdä ainakin seuraavia huomioita:

- Työssä 1 esitetyt rakennevaihtoehdot ovat kauttaaltaan työssä 2 esitettyjä rakennevaihtoehtoja kestävämpiä
- Kalkkikivimurskekerroksen kestävyys-/deformaatiotarkastelu tuottaa kaikkein suurimmat kuormituskertaluvut eli todennäköisyys sen deformoitumiselle on oletettavasti hyvin pieni
- Ensimmäisten laskelmien parametrivalinnoilla selkeästi pienimmät kuormituskertaluvut saadaan kaikilla rakenteilla ylimmän hiekkakerroksen deformaatiotarkastelun perusteella; tulos on tältä osin kuitenkin erittäin herkkä hiekkakerroksen jäykkyysarvon valinnalle, koska jäykkyyden kasvu pienentää sekä tarkasteltavaa muodonmuutosta että ohjaa käyttämään kestävyysmallia, joka tuottaa samalla venymäarvolla huomattavasti paremman ennusteen rakenteen kestävyydelle
- Kaiken kaikkiaan hiekkakerrosten deformaatiotarkastelu voidaan tässä tarkastelujen rakenneratkaisujen osalta jossain määrin kyseenalaistaa, koska kaikissa rakennevaihdoissa on varsin paksulti sidottuja kerroksia ja ylimmän hiekkakerroksen etäisyys sidottujen kerrosten alapinnasta on varsin pieni (210 – 250 mm). Käytännössä hiekkakerroksen deformoituminen edellyttäisi sen päällä olevien sidottujen kerrosten deformoitumista tai rikkoutumista.

Lisa 2.1. Eestikeelne tõlge Tampere Tehnikaülikoolis tehtud katendiarvutustele.

Uuritavad katendid ja nende arvutusväärtused teisendatuna vastavateks Soome juhendites käsitletavatele materjalidele.

Töö 1. Kõrge muldkeha (200 cm + 30 cm)

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
11.5 cm AC base	115	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm KS32 (uutest materjalidest)	150	KOST2	1800	1250	KOST ”Normaali”
21 cm paekivikillustik (LA35)	210	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
147 cm 50/50 segu liiv/paekivisõelmed	1470	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
30 cm savi stabiliseerimine (akrüülpolümeer või tsement)	300		?	?	Ei oma tähtsust

Töö 1. Madal muldkeha (124 cm)

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
12 cm AC base	120	ABK	3895	2500	BIT70/100
18 cm KS32 (uutest materjalidest)	180	KOST2	1800	1250	KOST ”Normaali”
21 cm paekivikillustik (LA35)	210	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
35 cm 50/50 segu liiv/paekivisõelmed	300	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
30 cm savi stabiliseerimine (akrüülpolümeer või tsement)	300		?	?	Ei oma tähtsust

Töö 2. Kõrge muldkeha 1 (175 cm)

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC 16 bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
7 cm AC 32 base	70	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm kompleksstabi	150	KOST2	1800	1250	KOST ”Normaali”
25 cm paekivikillustik (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
Geotekstiil					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
65 cm täitematerjal (50/50 segu)	650	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal

Töö 2. Madal muldkeha 1 (125 cm) on katenadiarvutuslikult identne, kuna sideainega seotud kihtide alla jääv osa on arvutusmetoodika jaoks mõlemal juhul üle 0.5 m paksune. Muldkeha alla jääva kuivanud savikihi deformeerumise risk on nende katendipaksuste puhul marginaalne.

Töö 2. Kõrge muldkeha 2 (175 cm)

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
5 cm AC 16 bin	50	AB	3650	2500	BIT70/100
8 cm AC 32 base	80	ABK	3895	2500	BIT70/100
9 cm MUK (bituumeniga seotud killustik)	90	VBST1	1000	700	VBST ”Laiha”
25 cm paekivikillustik (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
Geotekstiil					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
69 cm täitematerjal (50/50 segu)	650	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal

Töö 2. Madal muldkeha 2 (125 cm) on katenadiarvutuslikult identne, kuna sideainega seotud kihtide alla jääv osa on arvutusmetoodika jaoks mõlemal juhul üle 0.7 m paksune. Muldkeha alla jääva kuivanud savikihi deformeerumise risk on nende katendipaksuste puhul marginaalne.

Märkused moodulite osas

- Temperatuuri muutus 20 °C → 10 °C kahekordistab (bituumen)sideainega seotud kihtide mooduleid (temperatuuriparandustegur antud juhul Soome juhenditele tuginedes on 1.983);
- Juhendis on valida mitme bituumeni vahel; analüütilise arvutuse moodulid on valitud BIT70/100 kohased; see kirjeldab pigem pehmemat bituumenit;
- ABK moodulid on Soomes selgelt suuremad; valitud BIT70/100 on kõige pehmem valikuvariant;
- KOST2 on jäigem kahest valikuvariandist;
- Paekivikillustiku mooduliks on valitud konservatiivne 200 MPa, kuna paekivi on Soome kõvadest kividest pehmem;
- 50/50 segu mooduliks valiti 50 MPa, kuigi see ületab sõelkõverapiire vaid napilt; segu peenosisesisaldus on üpriski kõrge, mistõttu kasutatud moodul peaks olema pigem konservatiivne;
- Bituumeniga seotud killustikule (MUK) ei leidu otseselt vastavat moodulit; kasutatud on nõrgemalt bituumenstabiliseerimisele (VBST1/BEST1 ”laiha”) soovitatud väärtusi 1000 MPa (analüütiline meetod) ja 700 MPa (Odemark);
- Keskliiv on selgesti 50 MPa sõelkõveraväljas;
- Peenliiv on lähedal 35 MPa sõelkõveravälja, kuid kuna peenosist on väga vähe, siis 50 MPa on sellelegi materjalile sobilik.

Arvutustes kasutatud koormus

- Rattakoormusena on kasutatud 50 kN ehk pool tavalisest normteljest;
- Üksikrehvil on suurem koormusmõjutus, kui paarisrattal;
- Kontaktpinge tee ja ratta vahel on 800 kPa;
- Koormatud ala läbimõõt arvestades eeltoodud parameetreid on 0.282 m.

Arvutuste põhimõtetest

Konstruktsioonide pinge-deformatsiooniolukorra leidmise arvutusalusena on kasutatud Shelli välja töötatud BISAR-programmi. Lineaarsele kihilisele mudelile põhinev programm kasutab Burmisteri teooriat ja see on muude konstruktsioonide analüüsimisel leitud andvat võrreldavaid tulemusi muude kihilis-analüütiliste programmide (näiteks Kenlayer) kui ka elementarvutustel töötavate lahendustega.

Arvutustega on kontrollitud kriitilisi punkte nagu kõige alumise sideainega seotud kihi horisontaalsuunalised tõmbepinged otse koormuse rakendamise punkti all ning paekivikillustiku ja selle all oleva liivakihi ülapindade vertikaalsuunalisi deformatsioone.

Kriitiliste deformatsioonide teisendamiseks liikluskoormusele on kasutatud Soome tiehallinto väljaandes ”Tietoa tiensuunniteluun nro 71D” toodud vastupidavusmudeleid. Seotud kihtide osas vastupidavusmudelite katselist verifitseerimist on tehtud 1990-ndatel läbi viidud ”Tien pohja- ja päällysrakenteet” (TPPT) uurimisprogrammis. Sideainega sidumata kihtide osas ei ole vastupidavusmudeli verifitseerimist tehtud kuigi süsteemselt – pigem on need formuleeritud nii, et nende abil jõutaks suures osas sarnaste konstruktsioonideni, kui Soomes laialdaselt kasutatava Odemarki meetodiga saadaks.

Arvutustulemused ”Tierakenteen suunnittelu”-juhendi vastupidavusmudeliga; analüütiline arvutus:

Töö 1: Kõrge muldkeha (200 cm + 30 cm)

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST2 venivus	119	41´580´444
Paekivikillustik: kokkusurutavus	242	5´670´506´102
Liiv: kokkusurutavus	301	7´967´467

Töö 1: Madal muldkeha (124 cm)

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST2 venivus	103	79´631´141
Paekivikillustik: kokkusurutavus	206	15´202´475´693
Liiv: kokkusurutavus	262	13´730´311

Töö 2: Kõrge muldkeha 1 (175 cm) / Madal muldkeha 1 (125 cm)

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST2 venivus	149	15´118´623
Paekivikillustik: kokkusurutavus	325	932´097´812
Liiv: kokkusurutavus	348	4´510´080

Töö 2: Kõrge muldkeha 2 (175 cm) / Madal muldkeha 2 (125 cm)

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
VBST1 venivus	201	4´176´568
Paekivikillustik: kokkusurutavus	442	141´841´316
Liiv: kokkusurutavus	445	1´719´452

Kandevõime Odemarki meetodiga:

Arvutatud kandevõimed teekatte pealt:

Töö 1	Kandevõime (MPa)
Kõrge muldkeha (200 cm + 30 cm)	450
Madal muldkeha (124 cm)	504
Töö 2	
Kõrge muldkeha 1 (175 cm) / Madal muldkeha 1 (125 cm)	367
Kõrge muldkeha 2 (175 cm) / Madal muldkeha 2 (125 cm)	284

Töö 2: Kõrge muldkeha 1 (175 cm) – temperatuur 10 ºC

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 10°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	7099	2500	BIT70/100
4 cm AC 16 bin	40	AB	7238	2500	BIT70/100
7 cm AC 32 base	70	ABK	7724	2500	BIT70/100
15 cm kompleksstabi	150	KOST2	3569	1250	KOST ”Normaali”
25 cm paekivikillustik (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
Geotekstiil					
25 cm ”**keskliiv**” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
65 cm täitematerjal (50/50 segu)	650	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal

Madal muldkeha 1 (125 cm) on katenadiarvutuslikult identne, kuna sideainega seotud kihtide alla jääv osa on arvutusmetoodika jaoks mõlemal juhul üle 0.5 m paksune. Muldkeha alla jääva kuivanud savikihi deformeerumise risk on nende katendipaksuste puhul marginaalne.

Töö 2: Kõrge muldkeha 2 (175 cm) – temperatuur 10 ºC

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 10°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	7099	2500	BIT70/100
5 cm AC 16 bin	50	AB	7238	2500	BIT70/100
8 cm AC 32 base	80	ABK	7724	2500	BIT70/100
9 cm MUK (bituumeniga seotud killustik)	90	VBST1	1983	700	VBST ”Laiha”
25 cm paekivikillustik (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
Geotekstiil					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal
69 cm täitematerjal (50/50 segu)	650	Hiekka50	50	50	Terakoostise põhjal

Töö 2. Madal muldkeha 2 (125 cm) on katenadiarvutuslikult identne, kuna sideainega seotud kihtide alla jääv osa on arvutusmetoodika jaoks mõlemal juhul üle 0.7 m paksune. Muldkeha alla jääva kuivanud savikihi deformeerumise risk on nende katendipaksuste puhul marginaalne.

Töö 1: Kõrge muldkeha (200 cm + 30 cm) – temperatuur 10 ºC

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST2 venivus	75	331´951´600
Paekivikillustik: kokkusurutavus	152	97´790´128´998
Liiv: kokkusurutavus	206	35´259´067

Töö 1: Madal muldkeha (124 cm) – temperatuur 10 ºC

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST2 venivus	64	677´704´811
Paekivikillustik: kokkusurutavus	128	280´076´495´654
Liiv: kokkusurutavus	178	62´533´222

Töö 2: Kõrge muldkeha 1 (175 cm) / Madal muldkeha 1 (125 cm) – temperatuur 10 ºC

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST2 venivus	95	114´576´151
Paekivikillustik: kokkusurutavus	206	15´202´475´693
Liiv: kokkusurutavus	247	17´302´171

Töö 2: Kõrge muldkeha 2 (175 cm) / Madal muldkeha 2 (125 cm) – temperatuur 10 ºC

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
VBST1 venivus	135	25´043´781
Paekivikillustik: kokkusurutavus	292	1´795´494´622
Liiv: kokkusurutavus	328	5´688´540

Töö 1. Kõrge muldkeha (200 cm + 30 cm) – teised moodulid 1

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
11.5 cm AC base	115	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm KS32 (uutest materjalidest)	150	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
21 cm paekivikillustik (LA35)	210	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
147 cm 50/50 segu liiv/paekivisõelmed	1470	Hiekka100	100	100	
30 cm savi stabiliseerimine (akrüülpolümeer või tsement)	300		?	?	Ei oma tähtsust

Töö 1. Madal muldkeha (124 cm) – teised moodulid 1

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
12 cm AC base	120	ABK	3895	2500	BIT70/100
18 cm KS32 (uutest materjalidest)	180	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
21 cm paekivikillustik (LA35)	210	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
35 cm 50/50 segu liiv/paekivisõelmed	300	Hiekka100	100	100	
30 cm savi stabiliseerimine (akrüülpolümeer või tsement)	300		?	?	Ei oma tähtsust

Töö 2. Kõrge muldkeha 1 (175 cm) – teised moodulid 1

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC 16 bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
7 cm AC 32 base	70	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm kompleksstabi	150	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
25 cm paekivikillustik (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
Geotekstiil					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka100	100	100	
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka70	70	70	
65 cm täitematerjal (50/50 segu)	650	Hiekka100	100	100	

Töö 2. Madal muldkeha 1 (125 cm) on katenadiarvutuslikult identne, kuna sideainega seotud kihtide alla jääv osa on arvutusmetoodika jaoks mõlemal juhul üle 0.5 m paksune. Muldkeha alla jääva kuivanud savikihi deformeerumise risk on nende katendipaksuste puhul marginaalne.

Töö 2. Kõrge muldkeha 2 (175 cm) – teised moodulid 1

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
5 cm AC 16 bin	50	AB	3650	2500	BIT70/100
8 cm AC 32 base	80	ABK	3895	2500	BIT70/100
9 cm MUK (bituumeniga seotud killustik)	90	VBST2	1500	1050	VBST ”Normaali”
25 cm paekivikillustik (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
Geotekstiil					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka100	100	100	
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka70	70	70	
69 cm täitematerjal (50/50 segu)	650	Hiekka100	100	100	

Töö 2. Madal muldkeha 2 (125 cm) on katenadiarvutuslikult identne, kuna sideainega seotud kihtide alla jääv osa on arvutusmetoodika jaoks mõlemal juhul üle 0.7 m paksune. Muldkeha alla jääva kuivanud savikihi deformeerumise risk on nende katendipaksuste puhul marginaalne.

Töö 1: Kõrge muldkeha (200 cm + 30 cm) – teised moodulid 1

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST1 venivus	119	41´580´444
Paekivikillustik: kokkusurutavus	275	2´592´323´660
Liiv: kokkusurutavus	231	527´396´806

Töö 1: Madal muldkeha (124 cm) – teised moodulid 1

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST1 venivus	103	79´631´141
Paekivikillustik: kokkusurutavus	235	6´786´952´150
Liiv: kokkusurutavus	205	982´467´730

Töö 2: Kõrge muldkeha 1 (175 cm) / Madal muldkeha 1 (125 cm) – teised moodulid 1

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST1 venivus	155	12´657´788
Paekivikillustik: kokkusurutavus	367	442´866´670
Liiv: kokkusurutavus	261	279´163´650

Töö 2: Kõrge muldkeha 2 (175 cm) / Madal muldkeha 2 (125 cm) – teised moodulid 1

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
VBST2 venivus	172	8´420´228
Paekivikillustik: kokkusurutavus	417	202´595´709
Liiv: kokkusurutavus	290	161´236´121

Töö 1. Kõrge muldkeha (200 cm + 30 cm) – teised moodulid 2

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
11.5 cm AC base	115	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm KS32 (uutest materjalidest)	150	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
21 cm paekivikillustik (LA35)	210	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
147 cm 50/50 segu liiv/paekivisõelmed	1470	Hiekka70	70	70	
30 cm savi stabiliseerimine (akrüülpolümeer või tsement)	300		?	?	Ei oma tähtsust

Töö 1. Madal muldkeha (124 cm) – teised moodulid 2

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
12 cm AC base	120	ABK	3895	2500	BIT70/100
18 cm KS32 (uutest materjalidest)	180	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
21 cm paekivikillustik (LA35)	210	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
35 cm 50/50 segu liiv/paekivisõelmed	300	Hiekka70	70	70	
30 cm savi stabiliseerimine (akrüülpolümeer või tsement)	300		?	?	Ei oma tähtsust

Töö 2. Kõrge muldkeha 1 (175 cm) – teised moodulid 2

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
4 cm AC 16 bin	40	AB	3650	2500	BIT70/100
7 cm AC 32 base	70	ABK	3895	2500	BIT70/100
15 cm kompleksstabi	150	KOST1	1300	900	KOST ”Laiha”
25 cm paekivikillustik (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
Geotekstiil					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka70	70	70	
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	
65 cm täitematerjal (50/50 segu)	650	Hiekka100	100	100	

Töö 2. Madal muldkeha 1 (125 cm) on katenadiarvutuslikult identne, kuna sideainega seotud kihtide alla jääv osa on arvutusmetoodika jaoks mõlemal juhul üle 0.5 m paksune. Muldkeha alla jääva kuivanud savikihi deformeerumise risk on nende katendipaksuste puhul marginaalne.

Töö 2. Kõrge muldkeha 2 (175 cm) – teised moodulid 2

Kiht	Paksus (mm)	Vastav Soome	Moodul 20°C	Moodul Odemark	Märkus!
4 cm SMA	40	SMA	3580	2500	BIT70/100
5 cm AC 16 bin	50	AB	3650	2500	BIT70/100
8 cm AC 32 base	80	ABK	3895	2500	BIT70/100
9 cm MUK (bituumeniga seotud killustik)	90	VBST1	1000	700	VBST ”Laiha”
25 cm paekivikillustik (16...64 mm)	250	Murske200	200	200	Terakoostise põhjal
Geotekstiil					
25 cm ”keskliiv” (k = 0.5 m/ööp)	250	Hiekka70	70	70	
30 cm ”peenliiv” (k = 0.2 m/ööp)	300	Hiekka50	50	50	
69 cm täitematerjal (50/50 segu)	650	Hiekka100	100	100	

Töö 2. Madal muldkeha 2 (125 cm) on katenadiarvutuslikult identne, kuna sideainega seotud kihtide alla jääv osa on arvutusmetoodika jaoks mõlemal juhul üle 0.7 m paksune. Muldkeha alla jääva kuivanud savikihi deformeerumise risk on nende katendipaksuste puhul marginaalne.

Töö 1: Kõrge muldkeha (200 cm + 30 cm) – teised moodulid 2

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST1 venivus	125	33´323´867
Paekivikillustik: kokkusurutavus	296	1´651´977´627
Liiv: kokkusurutavus	278	132´249´773

Töö 1: Madal muldkeha (124 cm) – teised moodulid 2

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST1 venivus	109	61´720´752
Paekivikillustik: kokkusurutavus	231	7´539´232´822
Liiv: kokkusurutavus	245	255´131´590

Töö 2: Kõrge muldkeha 1 (175 cm) / Madal muldkeha 1 (125 cm) – teised moodulid 2

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
KOST1 venivus	160	10´972´625
Paekivikillustik: kokkusurutavus	362	481´671´256
Liiv: kokkusurutavus	319	64´672´005

Töö 2: Kõrge muldkeha 2 (175 cm) / Madal muldkeha 2 (125 cm) – teised moodulid 2

Kontrollitav tegur	Tulemus (microstrain)	Koormustsüklid
VBST2 venivus	193	5´014´111
Paekivikillustik: kokkusurutavus	444	137´974´040
Liiv: kokkusurutavus	376	27´507´497

Tulemuste kommentaarid:

- Töös 1 esitatud katendilahendused on töös 2 esitatutest oluliselt vastupidavamad;
- Kõige suuremat vastupidavust koormusele näitab killustiku kokkusurutavus, kuna selle arvutuslik deformeeritavus on niivõrd madal;
- Esimeste arvutuste parameetrid andsid selgelt väiksemad koormustsüklite arvud ja määravaks sai liivakiht. Arvutustulemus on eriti tundlik liivakihi mooduli osas, kuna selle suurendamine vähendab arvutuslikke deformatsioone;
- Kokkuvõttes on liivakihtide deformatsiooni kontrollimine mingil määral küsitav, kuna kõikides katendilahendustes on üpriski paksud seotud kihid ja liivakihi kaugus seotud kihi alapinnast suhteliselt väike (210…250 mm). Praktikas eeldaks liivakihi deformeerumine selle, et kõigepealt peavad järgi andma peal olevad seotud kihid.
    - Märkus, selles valguses oleks kõige täpsemad viimased arvutused, kui määravaks on saadud seotud kihtide vastupidavus.

Lisa 3. Aalto ülikooli raport (eestikeelne tõlge lisas 3.1)

Optimaalse teekonstruktsiooni metoodika koostamise II etapp: Raportti mukaan lukien laboratoriokokeet, niiden analysointi sekä ehdotettujen rakenteiden kommentointi

Tilaaja: Sven Sillamäe TTK University of Applied Sciences Tallinna

Kirjoittajat: Leena Korkiala-Tanttu, professori, Henry Gustavsson yliopisto-opettaja Aalto-yliopisto

Sopimus 27.10.2017

1. Laboratoriokokeet ja tulosten analyysi

Laboratoriokokeet sisälsivät kolme routanousukoetta, jotka on yksityiskohtaisesti kuvattu liitteessä 1. Sen lisäksi tehtiin kolme pakkasen kestävyyskokeita. Testatut materiaalit olivat Analeman kalkkikivimurske pestynä ja pesemättömänä. Lisäksi testattiin Analeman kalkkikivimurskeen ja Eassalun hiekan yhdistelmää (50% +50%).

Routanousukokeet tehtiin noudattaen TPPT6 Menetelmäkuvausta ”Routanousukoe” (*alk.tiehallinto.fi/**tppt**/pdf/6-**routanousukoe**.pdf).* Näytteet valmistettiin tiivistämällä ne ICT-laitteistolla 3,95 barin paineessa. Taulukkoon 1 on koottu kolmen kokeet mittaustulokset routasellissä ennen ja jälkeen routarasituksen. Taulukossa on esitetty myös vastaavat kuivatiheydet sekä käytetyt tiivistyskierrokset. Tilaaja määritteli tavoitetiheystason (Analema pesemätön 2,18 ton/m^3; Analema + Eassalu 50+50% 1,97 - 2,0 ton/m^3; pesty Analema 2,04-2,05 ton/m^3) sekä tavoitevesipitoisuuden 10%.

Taulukko 1. Routanouskoenäytteiden perustiedot.

Name	Compaction ICT (rounds)	H(after compaction) mm	V(after compaction) cm3	m(wet), g	m(dry) g	w % (in compaction)	dry density g/cm3 (before freezing test)	m(wet) g after freezing test	w% (after freezing test)	H mm (after freezing)	V cm3 (after freezing test)	dry density g/cm3 (after freezing test)
Koe1-Unwashed Analema	57,00	100,00	785,40	1881,00	1710,00	10,00	2,18	1926,45	12,66	106,00	832,52	2,05
50%/50% Analema **Unwashed**+Eassalu Hk	36,00	98,00	769,69	1710,50	1555,00	10,00	2,02	1727,80	11,11	101,60	797,96	1,95
Analema Washed	64,00	98,00	769,69	1706,54	1551,40	10,00	2,02	1740,77	12,21	*103,00*	808,96	1,92

Taulukossa 2 on esitetty varsinaisia routanousutuloksia. Kokeet tehtiin 2,5 kPa pystysuuntaisella paineella. Tämä kuorma koostui männästä ja kuormituskehästä. Taulukossa 2 on määritetty routimiskerroin SP. Routimiskerroin (segregaatiopotentiaali) kuvaa materiaalin routanousuherkkyyttä SP_0. Liitteessä 1 on esitetty eri näytteiden valokuvia kokeen jälkeen sekä graafinen kuvaaja routanoususta kokeen aikana. Taulukossa 2 esitetyt routanousut 24 tunnin ja 96 tunnin päästä on määritetty jäädytyksen aloittamisesta lukien. Näytteellä 1 jään kiteytyminen alkoi vasta 38h tuntia jäädyttämisen aloituksesta ja em. arvot on laskettu siitä alkaen.

Taulukko 2. Routanousukokeiden tulokset sisältäen segregaatiopotentiaaliarvot sekä routanoust 24 tunnin ja 96 tunnin päästä jäädyttämisen alusta mm.

Name	SP (2,5kPa) [mm^2/Kh]	h(24h), [mm]	h(96h) [mm]
1.Pesemätön Analema kalkkikivi	1,2	3,76	5,83
2. Analema +Easslau hiekkaseos 50%+50%	1,0	2,47	3,49
3. Pesty Analema kalkkikivi	1,0	1,65	2,47

Kansainvälisen ISSMFE:n teknisen komitean TC8 (Frost in Geotechnical Engineering, Int. Symposium-Saariselkä. VTT 1989) ehdotuksen mukaan materiaali ei ole routimisherkkä, jos SP_0 < 0,5 mm^2/Kh. Jos SP_0 on välillä 0,5…1,6 mm^2/Kh materiaali voidaan luokitella lievästi routivaksi. Taulukossa 3 on esitetty Nurmikolun 2006 esittämä routimisherkkyyden arviointitaulukko, jossa on mukana myös ISSMGE:n kriteeri. Näiden kriteerien mukaan arvioituina pesemätön Analeman kalkkikivi on lievästi tai keskinkertaisesti routivaa. Samoin kalkkikivi-hiekkaseos voidaan luokitella lievästi tai keskinkertaisesti routivaksi. Pesty Analeman kalkkikivi voidaan luokitella lievästi routivaksi.

Taulukko 3. Routimisherkkyyden luokittelu (Nurmikolu 2006).

	Routimiskerroin SP_0 (mm^2/Kh)	**h_{24h} (mm)**	**h_{96h} (mm)**
Routimaton	< 0,5	< 0,6	< 1,2
Lievästi routiva	0,5-1,6	0,6-2,2	1,2–3,7
Keskinkertaisesti routiva	1,6–3,3	2,2–4,5	3,7–7,4
Erittäin routiva	>3,3	> 4,5	> 7,4

Tämä routivuuden luokittelu on menetelmänä teoreettinen. Nurmikolu (2006) ehdottaakin luokittelua käytännöllisen routimattomuuden avulla, jolloin tarkasteltaisiin vallitsevissa rakenteellisissa olosuhteissa sallittuja routanousuja ja niiden ylitysten seurauksia. Nurmikolu ehdottaa ratarakenteen rakennekerrosmateriaalien **käytännöllisen routimattomuuden rajoiksi routimiskertoimen (SP_0) arvoa 1,1 mm^2/Kh ja vastaavaa neljän vuorokauden routanousun arvoa 2,2 millimetriä.** (Nurmikolu, 2006). Tämän kriteerin mukaan Analeman pesty ja kalkkikivi – hiekkaseos olisivat routimattomia.

Pakkasenkestävyyskokeet tehtiin kolmelle eri materiaaleille. Kokeet tehtiin standardin SFS-EN 13673-1 mukaisesti, joka on yleinen rakennusmateriaaleille tehtävä koe. Pakkasrasituskoekita tehtiin 3 sarjaa, jossa kussakin 3 oli rinnakkaisnäytettä. Raportoitu tulos sisältää kolmen rinnakkaisen kokeen yhdistetyn tuloksen. Testatut materiaalit ovat (liite 2):

1) Eassalu + Analema 50/50 seos
    a. seokselle tehtiin vain kuivaseulonta ennen ja jälkeen kokeet (hienoainesta ei siis pesty pois ennen testiä)

2) Analema kalkkikivimurske
    a. Kuivaseulonta ennen pakkasrasitusta (hienoaineesta ei pesty pois ennen testiä)
    b. pesu + seulonta pakkasrasituksen jälkeen
3) Eassalu + Analema 50/50 seos
    a. pesu + seulonta ennen pakkasrasitusta
    b. pesu + seulonta pakkasrasituksen jälkeen

Lisäksi tehtiin toimitetulle Analemalle rakeisuusmääritys (Pesu + seulonta) (Liite 3). Rakeisuudet ovat melko lähellä toisiaan kaikissa tapauksessa. Rakennusmateriaalien hyväksyttävyyden kriteerinä käytetään yleensä massahäviöprosenttia. Tässä seurattiin erityisesti 2 mm ja 4mm seuloja. Kaikkien materiaalien kohdalla on havaittavissa kokeen kymmenen syklin aikana tapahtunutta massahäviötä. Kalkkikivi – hiekka seoksella massahävikit ovat luokkaa 8,6 – 11,6 % pesemättömälle ja pesemättömälle Analeman kalkkikiville 6,8 – 12,2 %. Pestylle kalkkikivimurskeen ja hiekan seokselle hävikki oli hieman pienempi 4,8 – 9,6 %. Pesemättömän Analeman kokeessa havaittu kasvanut hienoainesmäärä johtunee osin siitä, että kokeen jälkeen rakeisuus määritettiin pesuselonnalla. Tarkemmat koetulokset on esitetty liitteessä 2.

Analeman pesemättömälle kalkkikivelle tehtiin sekä kuiva- että märkäseulonnat (liite 3). Näistä rakeisuuskäyristä havaittiin, että hienoaineispitoisuus eli 0,063 mm hienommat rakeet oli märkäseulonnassa 15% ja kuivaseulonnassa 7%. Aiemmin Sven Sillamäen toimittamien tietojen perusteella kalkkikiven hienoainespitoisuus vaihtelee välillä 15-20%. Kokeiden suuren hienoainespitoisuuden vaihtelun perusteella voidaan päätellä, että kalkkikivi on herkästi erottuva materiaali, joten niiden käsittelyyn työmaalla kannattaa kiinnittää huomiota.

Aalto-yliopisto on seurannut Kirkkonummella Luoman seisakkeen lämpötilaprofiilia jatkuvasti rakennekerroksissa ja pohjamaassa useamman talven ajan (liite 4). Näiden Etelä-Suomen arvoja kuvaavien mittausten perusteella syvyydessä 200 – 500 mm on havaittu useita pakkassyklejä kahden talven aikana (2012-2013 ja 2013-2014). Koska kalkkikivimurske ei vaikuta täysin pakkasenkestävältä laboratoriossa tehtyjen 10 syklin pakkaskestävyyskokeiden perusteella, tulisi ko. materiaali pyrkiä sijoittamaan vähintään 600 mm syvyyteen rakenteeseen, jolloin pakkassyklien määrää voidaan vähentää merkittävästi.

Matalasta pengerratkaisusta tehtiin lisäksi routanousulaskelmat perustuen näihin laboratoriokoetuloksiin ja arvioihin muiden materiaalien routimiskertoimesta. Koska Pärnun alueen pakkaskertymä ei ollut tiedossa, laskelmat tehtiin kolmelle eri pakkasmäärälle F=10 000 Kh, F=15 000Kh ja F=25 000Kh. Routanousulaskelmat tehdään yleensä noin kerran 20 vuodessa toistuvalle pakkasmäärälle, jolloin Etelä-Suomessa laskennallinen pakkasmäärä on noin 25 000Kh. Tällöin roudan maksimi tunkeutumissyvyys kerran 20 – 30 vuodessa olisi noin 1,6 metriä, joten rakenteen kokonaispaksuuden tulisi olla noin 1,5 – 1,6 metriä, jotta vältyttäisiin liian suurilta routanousuilta. Ehdotetuilla matalilla penkereillä (1,24-1,25 m) routa voi kylminä talvina tunkeutua saviseen pohjamaahan aiheuttaen routanousua arviolta noin 50 - 80mm, riippuen rakenteesta ja pohjamaan routimisherkkyydestä. Tässä laskelmissa pohjamaa saven arvioitu routimiskerroin on arvioitu vaihtelevan välillä SP=5...10mm^2/Kh. Kalkkikivimurskeen lievä routivuus (SP_0=1mm^2/Kh) tierakenteessa aiheuttanee alle 20mm routanousun. Yksityiskohtaiset laskelmat on esitetty liitteessä 5.

Taulukko 4. Pärnun ohitustie. Routanousut [mm] eri pakkasmäärillä ja pohjamaan SP-arvoilla.

Rakenne / Pakkasmäärä	Pohjamaa(Savi) SP=10mm^2/Kh		Savi SP=5mm^2/Kh
	Matala penger (1,25 m)	Matala penger (1,24 m) Stab.savi SP = 2mm^2/Kh	Matala penger (1,24 m), Stab.savi SP = 2mm^2/Kh
F=10 000 Kh	2 mm	8 mm	8 mm
F=15 000 Kh	20 mm	18 mm	18 mm
F=25 000 Kh	58 mm	78 mm	54 mm

Johtopäätöksenä näistä laboratoriokokeista voidaan päätellä, että päällysrakennemateriaalina toimii parhaiten pesty kalkkikivi tai kalkkikivi – hiekkaseos. Koska materiaalit osoittivat jonkin verran rapautumisherkkyyttä pakkasenkestävyyskokeissa, materiaalien pitkäaikaiskestävyyden kannalta olisi parempaa, jos ne voitaisiin sijoittaa päällysrakennekerroksissa syvemmälle kuin 600 mm. Tämä arvio perustuu Etelä-Suomessa tehtyihin lämpötilamittauksiin, joiden mukaan kahden talven aikana tapahtuneet jäätymis-sulamissyklit ovat ulottuneet yli 500 mm syvyyteen.

2. Kohde, suunniteltu tie ja pohjaolosuhteet

Kyseessä oleva kohde on maantiellä E67 Talinna – Pärnu – Ikla Pärnun lähelle sijoittuva kaksiajoratainen maantie, jonka tiepenkereen leveys on 15 metriä ja jossa on 2 +1 kaistat. Ajoradat on erotettu toisistaan keskikaiteella. Tiellä varaudutaan tulevaan 2 + 2 kaistaratkaisuun siten, että luiskat rakennetaan nyt loiviksi (1:5). Lopullisen 2 + 2 kaistainen tie voidaan tällöin rakentaa luiskien päälle käyttämällä luiskakaltevuutena 1:4, jolloin tien peittämä alue ei kasva. Tilaaja Maanteeametin tavoitteena on etsiä optimaallista ratkaisua tämän tien perustamiseksi ja rakentamiseksi siten, että siinä käytetään hyväksi mahdollisimman paljon paikallisia materiaaleja.

Kohteesta, jonka pituus on noin 6 km, on tehty pohjatutkimuksia noin 150 m välein. Päätutkimusmenetelmä on olleet poraukset (47 kpl), joihin on liittynyt porausnopeuden mittaus, maalajien arviointi sekä häiriintynyt näytteenotto. Sen lisäksi kohteesta on tehty jonkin verran puristin-heijarikairauksia (23 kpl) ja 6 kpl siipikairauksia. Kohteen maanpinta on vaihdellut välillä noin +9 - +16 m merenpinnan yläpuolella. Kohteen pohjaolosuhteet ovat suhteellisen tasaiset. Pehmeiden kokoonpuristuvien kerrosten paksuus on arvioitu syvimmillään olevan noin 4 metriä. Pohjavesi on vaihdellut välillä 0 – 3,5 metrin syvyydessä maanpinnasta. (3. GE-2210 aruanne koos lisadega 2017).

Kuudesta näytteestä on määritetty laboratoriokokeiden avulla kokoonpuristuvuusindeksi C_c sekä palautuvan muodonmuutoksen indeksi C_s, konsolidaatiokerroin C_v sekä esikonsolidaatioaste σ_c. Ilmeisesti nämä näytteet ovat edustaneet vain ylimpiä savikerroksia, joten ne eivät kuvaa koko painuvan kerroksen materiaaleja. Näin ollen pehmeämpien kerrosten painumaparametrit on arvioitu kokemuksen perusteella. Kohteesta on varsin mittava määrä (yli 100 kpl) häiriintyneitä näytteenottoja, joista on määritetty rakeisuus, tiheys ja

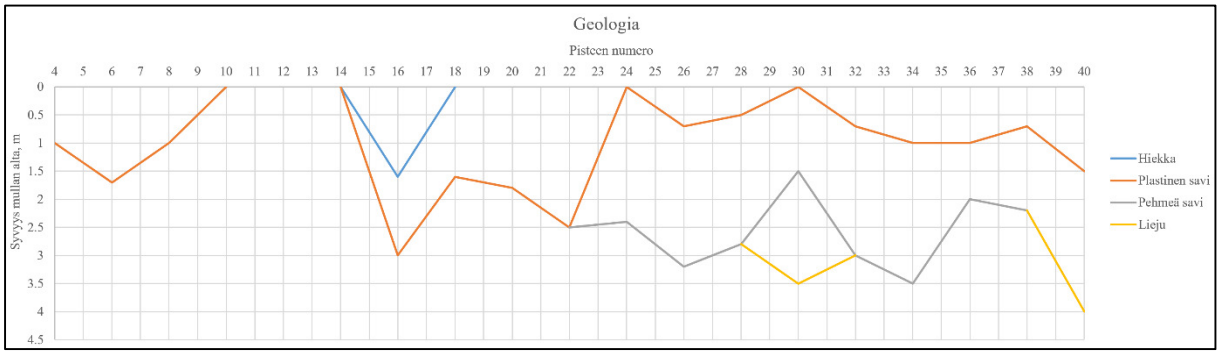
vesipitoisuus. Näitä tietoja sekä muita luokitusominaisuuksia on käytetty materiaaliominaisuuksien määrittämiseksi.

Kuudesta tutkimuspisteestä on lisäksi määritetty eri kerrosten suljettuja leikkauslujuuksia siipikairausten perusteella. Mittauksia on tehty 0,5 m välein. Siipikairaustuloksia on redusoitu kaikkia saman verran eli 0,8. Suomessa vastaava redusointi perustuu materiaalin vesipitoisuuteen tai juoksurajaan ja se voi vaihdella kerroksittain. Siipikairaustuloksista on havaittavissa, että ainakin pisteen TK40 siipikairaukset välillä 1-3,5 m (arvot 1-2 kPa) ovat epäonnistuneet. Myös TK31 syvyydellä 2,5 (arvo 3 kPa) ja TK26 syvyys 1,5m (6 kPa) maa on saattanut häiriintyä tai koe on ehkä muuten epäonnistunut.

Lisäksi raportissa on esitetty eri kerrosten lujuusarvoja ilmeisesti raportin laatijoiden oman kokemuksen, Das & Sobhan (2014) ja Eurokoodin 7 2-osan perusteella arvioituina. Kaikkiaan pohjatutkimusten määrä tuntuu kovin pieneltä kohteen vaativuuden ja epäonnistuneiden kokeiden määrän huomioon ottaen verrattuna esimerkiksi suomalaisiin ohjeisiin. Pohjatutkimuksissa ja niiden tulkinnassa luotetaan hyvin paljon paikalliseen kokemukseen. Kuvassa 1 on esitetty alueen pohjasuhteet pituusleikkauksena tutkimuspisteittäin. Maanpintaa ei ole esitetty. Poikkisuuntaan kaikissa poikkileikkauksissa on oletettu olevan homogeeniset olosuhteet.

Keskimäärin alueen pohjaolosuhteet ovat:

1. Ylin kerros on multaa, joka poistetaan
2. Paikoitellen ylimpänä kerroksena on hiekkaa, joka maksimisyvyys on 1,5 metriä
3. Plastinen savi (q_c = 0.5...2 MPa, W_n = 29.0...44.5%, W_L = 72.8%, W_p = 32.7%, n = 1.0, e = 50%, γ = 18.4 kN/m^3, C_u = 35 kPa, C_c = 0.47, C_r = 0.04, OCR = 10, C_v = 0.62 m^2/year,);
4. Pehmeä savi (q_c = 0.2...0.5 MPa, W_n = 42.2...65.4%, W_L = 69.0%, W_p = 33.1%, n = 1.51, e = 60.1%, γ = 16.6 kN/m^3, C_u = 15 kPa, C_c = 0.79, C_r = 0.07, OCR = 2, C_v = 0.74 m^2/year,);
5. Lieju (q_c < 0.1...0.2 MPa, W_n = 70.4...86.6%, W_L = 86.5%, W_p = 33.6%, n = 2.15, e = 68.3%, γ = 15.3 kN/m^3, C_u = 10 kPa, C_c = 1.33, C_r = 0.09, OCR = 2, C_v = 0.35 m^2/year,);
6. Alimpana maakerroksena on moreeni (q_c > 2 MPa, E = 30 MPa, γ = 22 kN/m^3, φ = 38º, c = 15 kPa.



Kuva 1. Kohteen pituussuuntainen geologia tutkimuspisteiden mukaan arvioituna. Syvyydet on arvioitu maanpinnan suhteen, joten maanpinnan korkeuksia ei tässä ole esitetty. Syvin kerros (saven alle jäävä materiaali) on moreeni.

Skepast & Puhkim ehdotuksessa esitetyissä painumalaskelmissa on selvä laskentavirhe. Laskelmiin pitäisi antaa kyllästyneen tilavuuspainon γ_{sat} kohtaan maamateriaalin kyllästynyt

arvo, joka pohjavedenpinnan alapuolella pitäisi olla sama kuin tilavuuspaino γ. Pohjaveden yläpuolella arvo voi olla jonkin verran suurempi kuin tilavuuspaino. Vaihtoehto on jättää ko. sarake täyttämättä, jolloin Geocalc käyttää tilavuuspainoa, josta pohjavedenpinnan alla vähennetään veden noste ja saadaan tehokas tilavuuspaino. Kyllästyneen tilavuuspainon pitäisi siis vaihdella välillä 15.3 – 18.8 kN/m^3. Nyt laskelmissa käytetyt arvot ovat vaihdelleet välillä 20 – 30 kN/m^3. Näin ollen maassa vallitseva jännitystila saa liian korkeita arvoja ja painumalaskelmat yliarvioivat painumaa erityisesti kohteissa, joissa on käytetty kiinteää arvoa esikonsolidaatiojännitykselle. Poikkileikkauksessa PK133+71 Skepast & Puhkim raportissa esitetty painumaksi noin 100 – 110 mm. Vertailulaskelma korjatuilla kyllästyneen maan tilavuuspainoarvoilla antoi n 25% pienemmän painuman, kuin Skepast&Puhkim -ehdotuksen mukaisilla arvoilla. Vertailulaskelmassa on käytetty pohjavedenpintaa noin -1,5 metriä maanpinnan alapuolella. Voidaan siis arvioida, että Skepast & Puhkim esittämät painumalaskelmat yliarvioivat tulevaa kokonaispainumaa noin 25 - 30%. Varsin yllättävää myös on, että laskelmissa on käytetty Ohde-Janbun painumalaskentamenetelmää, vaikka yhtä hyvin kokoonpuristuvuusmoduulin perustuvaa yksinkertaisempaa, eikä niin virheherkkää C_c-menetelmää olisi voitu käyttää, koska parametrit oli kuitenkin määritetty sen avulla.

ERC Konsultatsioonin painumalaskelmat oli ilmeisesti tehty Rocsciencen ohjelmalla. Tulosteista ei suoraan näy, millainen pohjamaan malli on ollut käytössä. Lasketut painumat ovat saaneet selvästi pienempiä arvoja kuin Skepast & Puhkimin arvot. Laskentatuloksissa huomiota herättää painumien jakaantuminen poikkileikkauksessa siten, että lähelle luiskaa syntyy epätasaista painumaa ja erikoisia kulmia. Yllättäen huippuarvot voivat olla myös lähellä luiskaa esimerkiksi PA30 2+2 poikkileikkauksessa. Tämä ei ole todennäköistä, koska kuitenkin kuormitus luiska-alueilla pienenee. Tosin kuvista ei näy, onko tässä kohtaa käytetty tarkempaa maanpinnan mallia, joka voisi osittain selittää nämä ”oudot” tulokset.

Skepast & Puhkim ehdotuksessa esitetyt stabiliteettilaskelmat näyttäisivät olevan oikein tehtyjä. He ovat laskeneet kokonaisvarmuuskertoimen F, jonka pitäisi olla suurempi kuin 1,5. ERC Konsultatsioonin stabiliteettilaskelmissa on jostain syystä käytetty jyrkempää luiskaa (arviolta 1:1,5). ERC Konsultatsioonin laskelmat on tehty käyttäen Virossa sovellettavia eurokoodin osavarmuuslukuja, jolloin varmuusluvun F tulee olla suurempi kuin 1 (F>1). Osavarmuusluvut ovat tehokkaalle koheesiolle ja leikkausvastukselle 1,25, suljetulle leikkauslujuudelle 1,4 ja vaihtuville kuormille (liikennekuorma) 1,3. Nämä seikat selittävät sen, miksi ERC:n laskelmissa on havaittavissa enemmän hajontaa ja pienempiä arvoja kuin Skepast & Puhkim. Positiivisena huomiona todettakaan, että ERC on esittänyt materiaaliparametrien herkkyystarkastelun. Yleisenä huomautuksena kuitenkin kumpiinkin laskelmiin, että Suomessa on tapana keskittyä näissä laskelmissa pääsääntöisesti kuvaamaan pohjamaan stabiliteettia. Joten pelkän rakennettavan penkereen sisäistä stabiliteetin laskelmia ei yleensä esitetä. Ne voidaan toki laskea, mutta ovat harvoin mitoittavia tai niin mielenkiintoisia.

Siipikairauskokeiden epäonnistuminen erityisesti pisteen TK40 alueella on huolestuttavaa siksi, että tällä alueella kohteen stabiliteetti on alhaisin. Molemmissa tehdyissä laskelmissa tässä kohtaa on käytetty varovaista kokemusperäistä arvoa 10 kN/m^2. Jolloin myös suunnitelmat tältä osin voivat jonkin verran konservatiivisia.

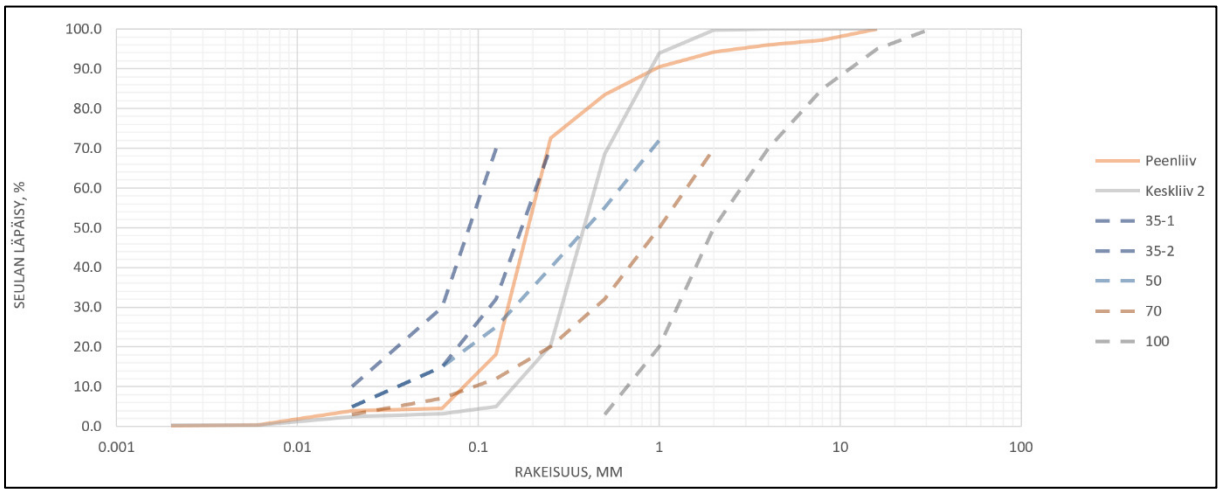
3. Ehdotettujen rakenteiden arviointi

Skepast & Puhkim sekä ERC Konsultatsiooni ovat Maanteeametin tilauksesta ehdottaneet erilaisia rakennevaihtoehtoja ko. kohteeseen, joilla parhaiten voitaisiin optimoida paikallisten

materiaalien käyttöä. Kohteeseen on esitetty sekä korkeata pengertä (2,33 m tai 1,75 m) tai matalaa pengertä (1,24 tai 1,25 m). Tiepenkereen tavoitekorkeudeksi on esitetty tilaajan vaatimuksena, että penkereen tulisi olla 1,2 metriä korkeampi kuin alueen maksimilumen korkeus on. Havaintojen mukaan maksimilumen korkeus alueella on ollut 550 mm esim. vuonna 1995, jolloin penkereen tulisi olla vähintään 1,75 metriä korkea, jotta vältyttäisiin lumen kinostumiselta. Etelä-Suomessa kinostumista on havaittu lähinnä alavilla mailla kohteissa, jossa on hyvin matala penger, tai tie on leikkauksessa.

Tien rakennekerrosten mitoituksessa kuormituskertaluvun (KKL) vertailukohtana oli 33 miljoonan standardiakselin ylitys. Ehdotetut rakenteet on suunniteltu huomioiden tämä, siksi rakennekerrosten yläosassa on paksut sidotut kerrokset. Kantavuuden parantamisessa toisessa ratkaisussa on ehdotettu myös pohjamaan yläosan stabilointia.

Lisäksi rakenteissa on käytetty kahta eri paikallista hiekkaa: ”keskliiv” ja Peenliiv”. ”Keskliiv”-hiekan laskennallinen moduuli Virossa on 105 MPa ja ”Peenliiv”-hiekan 90 MPa. Suomessa vastaavien hiekkojen laskennallinen moduuli (käytetään esim. Odemarkin menetelmässä) olisi 50 MPa (kuva 2). Syynä tähän on se, että suomalainen rakennekerrosten mitoitus perustuu kevätkantavuusajatteluun, eli että sitomattomille kerroksille käytetään kevätkantavuutta vastaavia arvoja. Tällöin materiaalin oletetaan olevaan märkää. Kuvan 2 mukaisesti molemmat materiaalit sattuisivat 50 MPa alueelle. ”Peenliiv” jopa 35 MPa alueelle, mutta hienoainesmäärä on pieni, joten valittu moduuli 50 MPa lienee oikeampi.



Kuva 2. ”Keskliiv” ja ”peenliiv” tyypilliset rakeisuuskäyrät verrattuna Suomen suodatinhiekkojen moduuleihin.

Pauli Kolisoja (2017) Tampereen Teknisestä Yliopistosta on arvioinut eri rakennevaihtoehtojen elinikää eli kuormituskestävyyttä sekä tehnyt Odemarkin menetelmän mukaisen kantavuusmitoituksen. Kuormituskestävyys ”Tierakenteen suunnittelu”-ohjeen mukaisilla kestävyysmalleilla käyttäen analyyttistä mitoitusta ja päällysteen osalta lämpötilaa +20°C antaa ehdotettujen rakenteiden kuormituskestävyydeksi arvoja välillä 1,8 – 13,7 miljoona ylitystä, joka on selvästi pienempi kuin tavoiteltu 33 miljoonaa. Kaikissa rakenteissa heikompana kerroksena oli rakenteissa käytetty hiekkakerros, jonka yläosan taipuma oli mitoittava. Odemarkin menetelmällä määritetyt kantavuusarvot vaihtelivat välillä 284 -504 MPa päällysteen päältä. Kummatkin menetelmät antoivat parhaat arvot ERC Konsultatsioonin matalapengervaihtoehdolle, seuraavaksi paras rakenne tämän arvon mukaan olisi vastaava korkea penger. Heikoimmat kantavuus ja kuormituskestävyysarvot laskettiin Skepast & Puhkim vaihtoehdolle 2. Syynä tähän lienee se, että rakennekerroksissa on käytetty paksuja

kerroksia hiekkaa, jonka mitoitusmoduuliarvo on näissä laskelmissa alhaisempi kuin ehdokkaat ovat käyttäneet.

Jos käytetään mitoituslämpötilana +10°C, muuttuvat kuormituskestävyysarvot selvästi paremmiksi. Tällöin vain Skepast & Puhkim vaihtoehto 2 kuormituskertaluku (5,7 miljoonaa ylitystä) jää alle 33 miljoonan. Laskelmissa ei ole otettu huomioon pohjamaan yläosan stabilointia, jonka on oletettu olevan epäoleellinen.

Laskenta on hyvin herkkä myös hiekan moduulille, eli jos hiekan moduulia kasvatetaan vastaamaan Virossa käytettyjä arvoja, saavutetaan tavoitearvot paremmin. Kolisoja toteaakin, että deformaatiotarkastelu on hieman kyseenalainen, koska ylimmät kerrokset ovat ensi sijassa sidottuja ja huonommin kantava hiekka sijoittuu varsin ylös rakenteessa. Tilannetta voisi parantaa ohuehko, mutta parempilaatuinen sitomaton kerros sidottujen alapuolella tai materiaalin stabilointi.

4. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tehtyjen laboratoriotutkimusten ja muiden arvioiden perusteella hyvä pengerkorkeus olisi noin 1,6 metriä, jolloin routanousut pysyisivät pieninä. Tällöin myös rakenteen lumen kinostumisvaara olisi melko pieni. Kokeissa testatuista materiaaleista voidaan suositella käytettäväksi Analeman pestyä kalkkikivimursketta tai Analeman kalkkikivimurskeen ja Eassalun hiekan 50 + 50% seosta. Materiaalien pitkäaikaiskäyttäytymisen kannalta olisi suositeltavaa sijoittaa materiaalit vähintään 600 mm syvyyteen.

Kalkkikivimurskeen tai kalkkikivimurskeen ja hiekan seosten stabilointi parantaisi todennäköisesti materiaalien taipumusta hienontua kuormituksen alaisena ja pienentää erottumis- ja routimisriskiä. Sen lisäksi materiaalin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet paranisivat. Ehdotan tätä jatkotutkimusaiheeksi.

Lähteet

Das, B.M., Sobhan, K. (2014). Principles of Geotechnical Engineering. USA: Global Engineering.

Kolisoja P. (2017) Laskentaraportti.

Onninen H. Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) määritys laboratoriossa. VTT 2001

Nurmikolu A. (2006). Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkkyys. Kokeellinen tutkimusosuus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2006. 170s. Helsinki 2006.

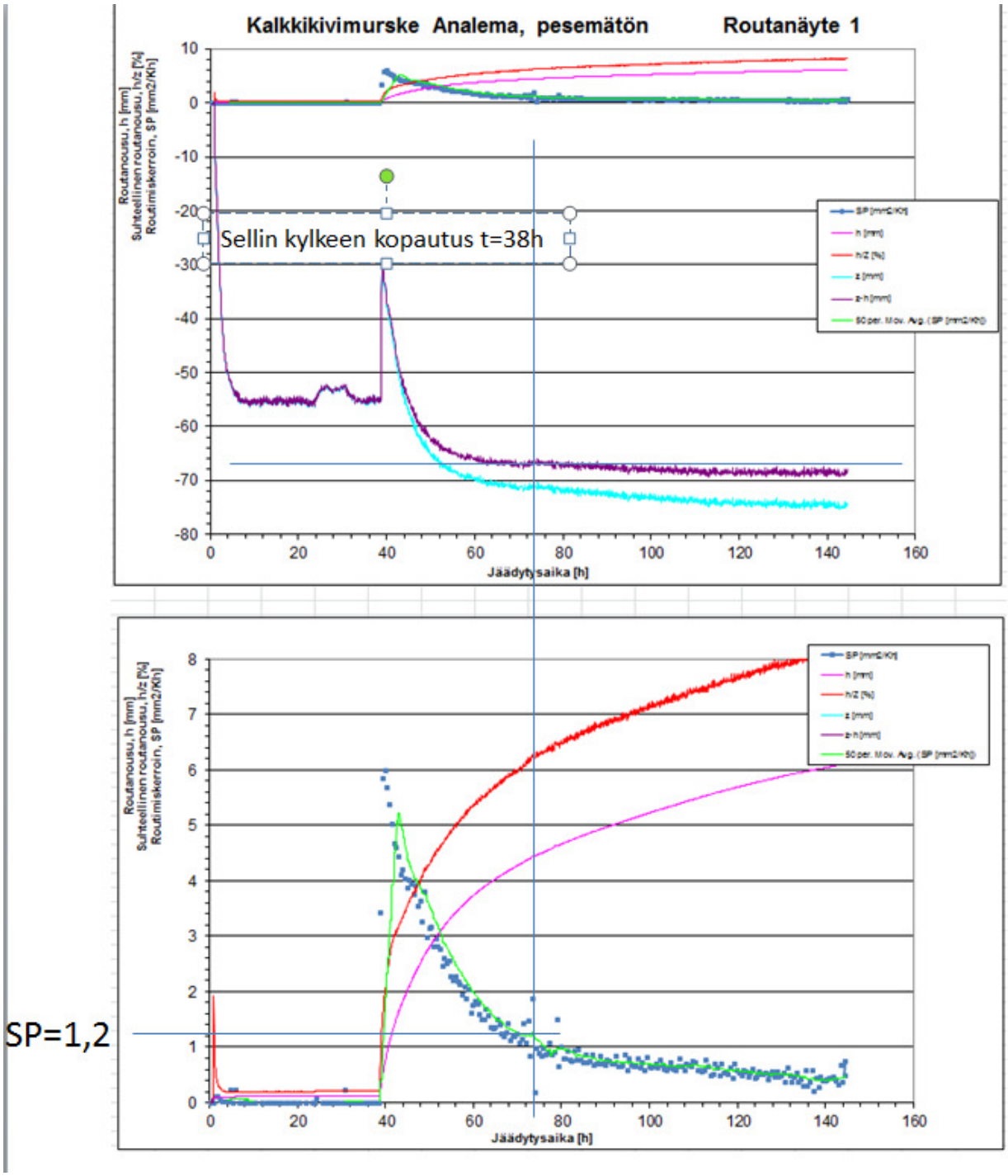
VTT Symposium 94. ISSMFE Technical committee on Frost TC-8. Work report 1985-1989. Frost in Geotechnical Engineering. Volume 1. International Symposium. Saariselkä, Finland 13-15 March 1989. Ed. H. Rathmayer. VTT, Espoo 1989.

LIITTEET:

1. Routanousukokeet 3 kpl
2. Jäädytys-sulatuskestävyyskokeet 3 kpl
3. Kuiva- ja pesuseulonta pesemättömästä Analeman kalkkikivimurskeesta
4. Luoman seisakkeen lämpötilahavainnot
5. Routanousulaskelmat

LIITE 1.

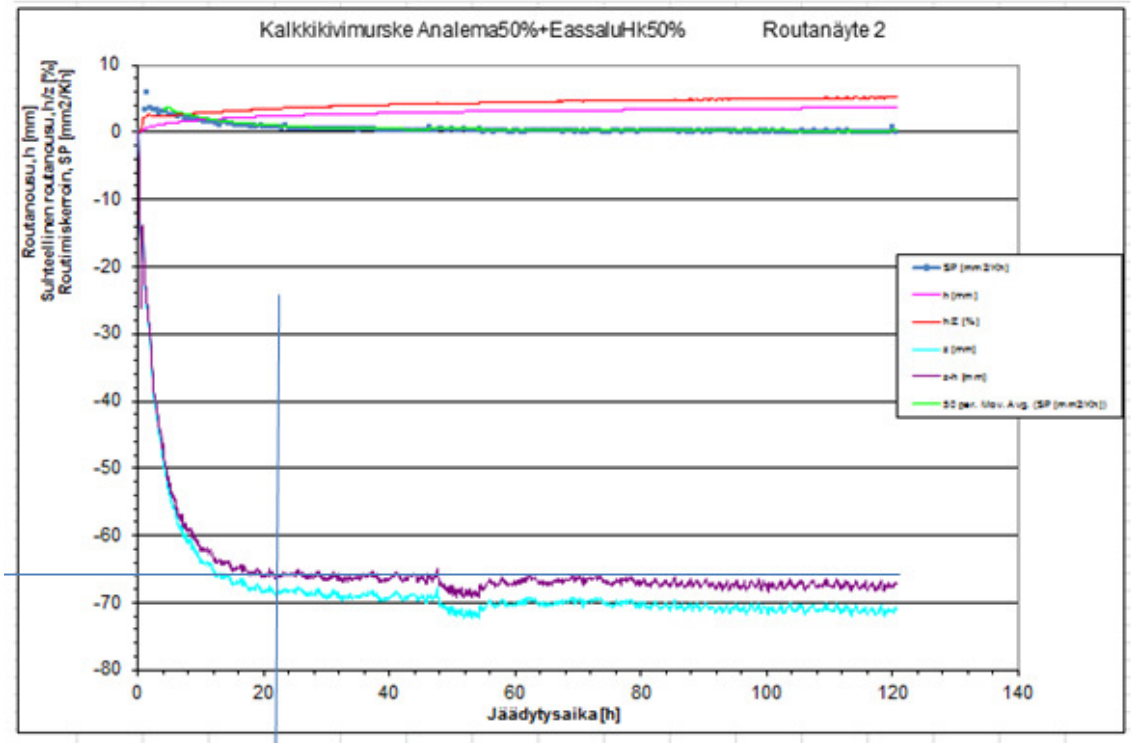
Analema pesemätön kalkkikivimurske. Näyte 1

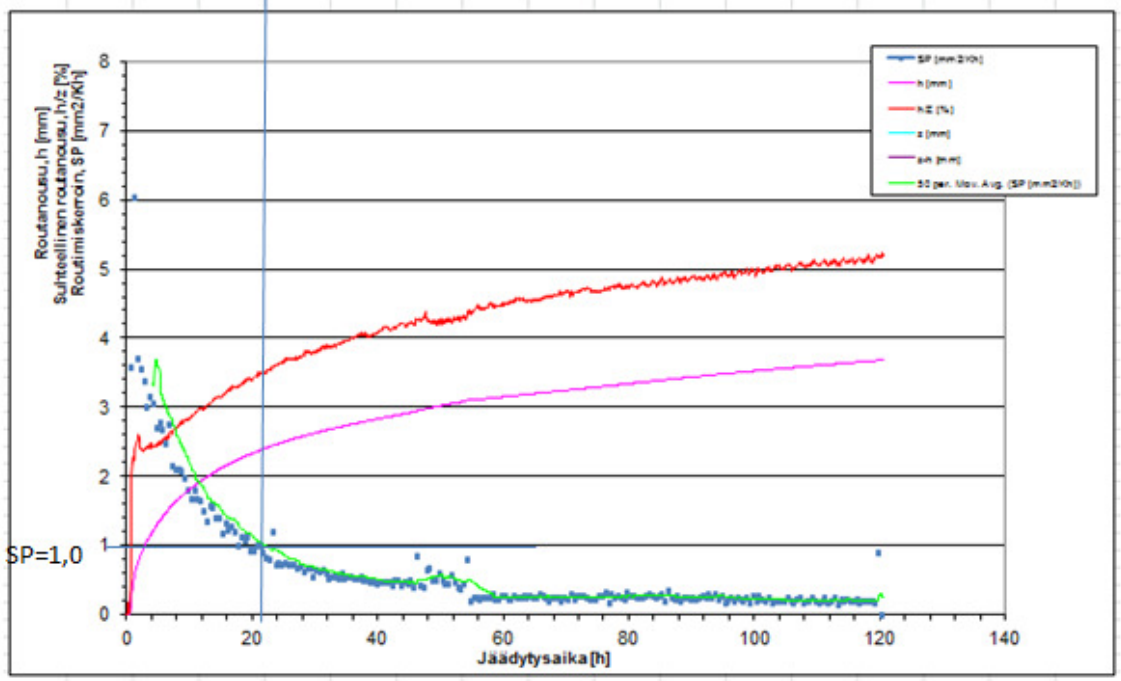


Jään kiteytyminen alkoi vasta, kun selliä koputettiin 38h-kohdalla! Routanousun arvot (24h) ja (96h) on määritetty em. ajan (38h on t=0) jälkeen. Loppukuva seuraavalla sivulla

HUAWEI P10
LEICA DUAL CAMERA

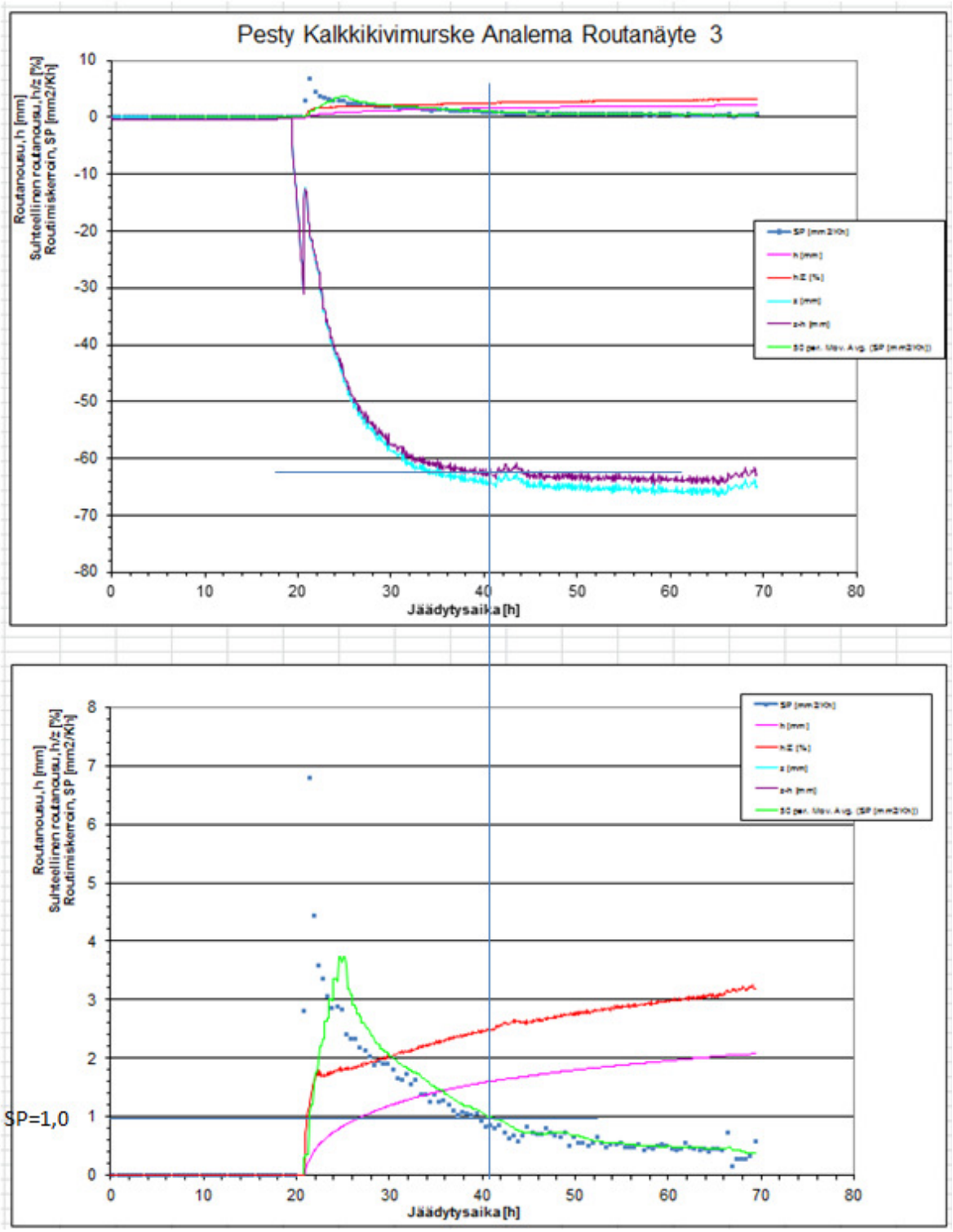
Analema kalkkikivimurske 50% + Eassalu hiekka 50%. Näyte 2





HUAWEI P10
LEICA DUAL CAMERA

Analema pesty kalkkikivimurske Näyte 3



(Jäädytys aloitettiin vasta n. 20h kohdalla)

Näytteen alaosa, joka ei ole jäässä, hajosi näytettä sellistä otettaessa, joten alaosan huokoskivi ja osa näytteestä on nostettu ylähuokoskiven päälle.

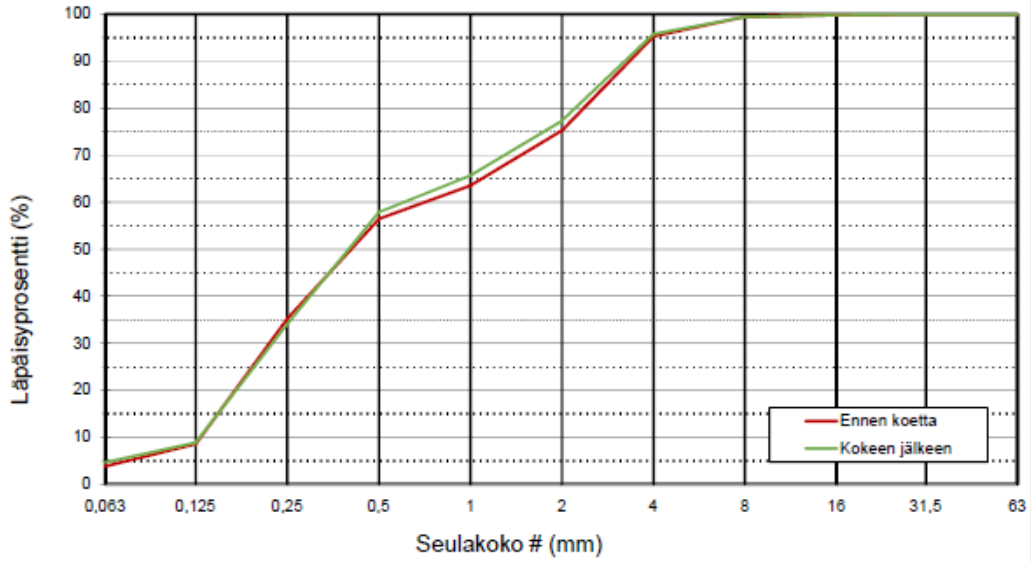
LIITE 2 JÄÄDYTYS-SULATUSKESTÄVYYS.

Eassalu hiekka 50% + Analema pesemätön 50%

RAPAUTUMINEN, Jäädytys-sulastuskestävyys SFS-EN 13673-1		Aalto-yliopisto Rakennustekniikan laitos		Testasuseloste: KH-172707-01
Näytteen tiedot: Eassalu + Analema 50/50	Koe 1 - 3	Vastaanotto päivä 25.10.2017	Testin suorituspäivä: Suorittaja:	7-20.11.2017 Otto Hedström
Käytetty menetelmä: Rapautumakoe	Kuivaseulonta, yhdistetty tulos		Allekirjoitus: Vastuuhenkilö:	Veli-Antti Hakala
Näytteiden 1-3, alkuperäinen massa 3000 g			Rapautumanäytteen massa 2996,9	

Seulonta	Kuivaseulonta	Kuivaseulonta
Kuiva kokonaismassa M_1 =	3000,0 g	2996,9 g
Kuiva massa pesun jälkeen M_2 =	- g	- g
Pesussa poistuneen hieno-aineksen kuiva massa (M_1 - M_2) =	- g	- g
Seulonnan arviointi	Tulos hyväksyttävä < 1 %	Tulos hyväksyttävä < 1 %

Seulan aukkokoko [mm]		Seulalle jäänyt massa Ennen koetta [g]	Kokeen jälkeen [g]	Massahäviöprosentti F [%]
63	R_1	0,0	0,0	-
31,5	R_2	0,0	0,0	-
16	R_3	5,7	5,3	-
8	R_4	11,8	11,8	-
4	R_5	124,7	108,6	11,6
2	R_6	602,0	554,3	8,6
1	R_7	348,5	348,4	-
0,5	R_8	214,3	234,0	-
0,25	R_9	636,3	713,6	-
0,125	R_{10}	800,4	754,5	-
0,063	R_{11}	141,1	126,5	-
Materiaali pohja-astiassa	P	112,1	123,04	-
Yhteensä	m	2996,9	2980,1	



Käyntiosoite:	Postiosoite:	Puhelin:	Telekopio:
R-talo	Aalto/ENG/R	+358-50-555 3789, yli-ins. Veli-Antti Hakala	
Rakentajanaukio 4	PL 12100	+358-50-350 3356, lab.ins.Jukka Piironen	Sähköposti:
02150 Espoo	00076 Aalto		etunimi.sukunimi@aalto.fi

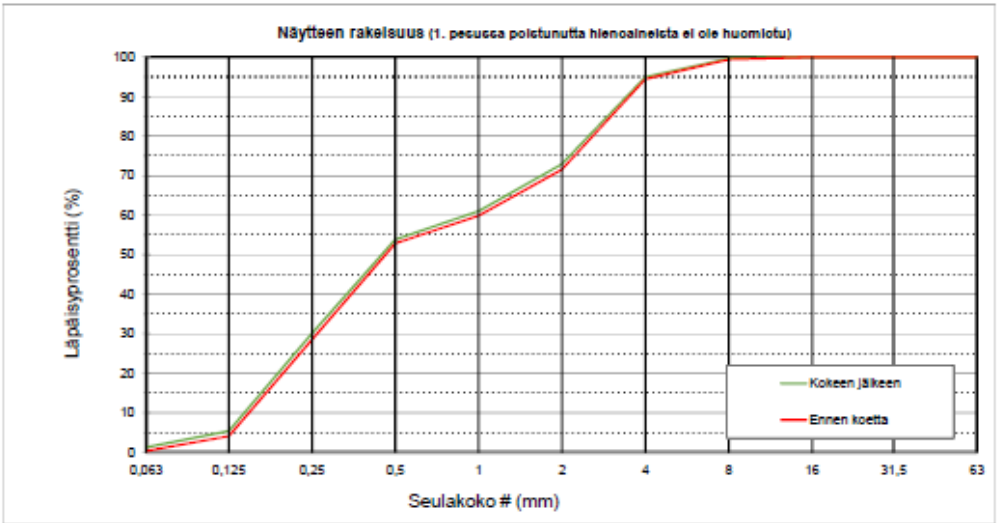
Eassalu hiekka 50% + Analema pesty (> #0,063mm) 50%

RAPAUTUMINEN, Jäädytys-sulastuskestävyys SFS-EN 1367-1		Aalto-yliopisto Rakennustekniikan laitos		Testausseloste: KH-171204-01
Asiakas: TTK University of Applied Sciences, Tallina Viro			Asiakkaan yhteyshenkilö: Sven Sillamäe	Sähköposti: sven@ttk.ee
Näytteen tiedot: Eassalu + Analema 50/50	Tunnus: 7 - 9	Vastaanottopäivä: 25.10.2017	Testin suorituspäivä: 21.11-4.12.2017 Testaaja:	Otto Hedström
Käytetty menetelmä: Rapautumakoe, standardista poikkeava raekokoalue # 0,063 - 16 mm, pesu ja seulonta ennen ja jälkeen jäädys-		Seulonta(SFS-EN 933-1): Kolmen yksittäisnäyteen yhdistetty tulos	Allekirjoitus: Vastuuhenkilö:	Veli-Antti Hakala

Näytteiden (3 kpl) alkuperäinen kokonaismassa	Rapautumanäytteen kokonaismassa
2990,3 g	2751,7 g

Seulonta	Pesu ja seulonta	Pesu ja seulonta
Kuiva kokonaismassa M_1 =	2990,3 g	2751,7 g
Kuiva massa pesun jälkeen M_2 =	2752,1 g	2724,4 g
Pesussa poistuneen hienoaineksen kuiva massa (M_1 - M_2) =	238,2 g	27,3 g
Arviointi ((M2-(Ri+P))/M2) <= 1 %	Tulos hyväksyttävä	Tulos hyväksyttävä

Seulan aukkokoko [mm]		Seulalle jäänyt massa Ennen koetta [g]	Kokeen jälkeen [g]	Massahäviöprosentti F [%]
63	R_1	0,0	0,0	-
31,5	R_2	0,0	0,0	-
16	R_3	0,0	0,0	-
8	R_4	16,6	9,5	-
4	R_5	136,5	128,9	9,6
2	R_6	629,4	606,5	4,8
1	R_7	321,7	327,5	-
0,5	R_8	192,8	198,0	-
0,25	R_9	670,0	652,7	-
0,125	R_{10}	673,1	681,1	-
0,063	R_{11}	102,6	112,9	-
Materiaali pohja-astiassa	P	9	6,2	
Yhteensä	m	2751,7	2723,3	
Hienoaineksen määrä		8,3 %	-	



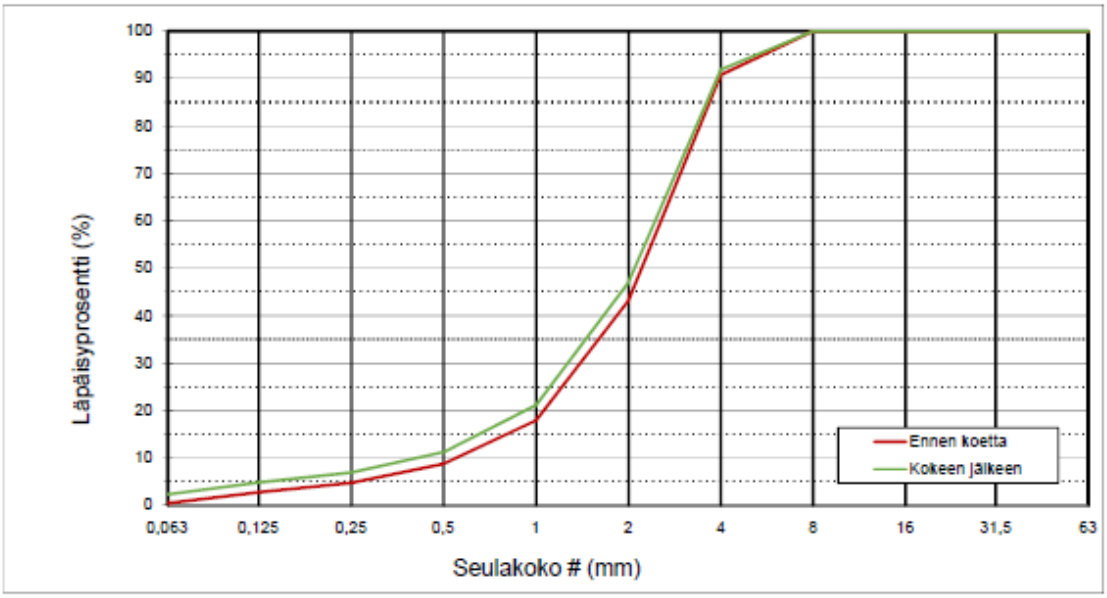
Käyntiosoite:	Postiosoite:	Puhelin:	Telekopio:
R-talo	Aalto/ENG/CE	+358-50-555 3789, yl-ins. Veli-Antti Hakala	
Rakentajanaukio 4	PL 12100	+358-50-350 3356, lab.ins. Jukka Piironen	Sähköposti:
02150 Espoo	00076 Aalto		etunimi.sukunimi@aalto.fi

Analema pesemätön kalkkikivi

RAPAUTUMINEN, Jäädytys-sulastuskestävyys SFS-EN 13673-1		Aalto-yliopisto Rakennustekniikan laitos		Testasuseloste: KH-171127-02
Näytteen tiedot: Analema	Koe 4 - 6	Vastaanotto päivä 25.10.2017	Testin suorituspäivä: Suorittaja:	9-24.11.2017 Otto Hedström
Käytetty menetelmä: Rapautumakoe	Pesu ja kuivaseulonta, yhdistetty tulos		Allekirjoitus: Vastuuhenkilö:	Veli-Antti Hakala
Näytteiden (3 kpl) alkuperäinen massa 3000,0 g			Rapautumanäytteen massa 3001,2	

Seulonta	Kuivaseulonta	Pesu ja seulonta
Kuiva kokonaismassa M_1 =	3000,0 g	3001,2 g
Kuiva massa pesun jälkeen M_2 =	- g	2943,5 g
Pesussa poistuneen hieno-aineksen kuiva massa (M_1 - M_2) =	- g	57,7 g
Seulonnan arviointi	Tulos hyväksyttävä < 1 %	Tulos hyväksyttävä < 1%

Seulan aukkokoko [mm]		Seulalle jäänyt massa Ennen koetta [g]	Kokeen jälkeen [g]	Massahäviöprosentti F [%]
63	R_1	0,0	0,0	-
31,5	R_2	0,0	0,0	-
16	R_3	0,0	0,0	-
8	R_4	0,0	0,0	-
4	R_5	276,9	243,0	12,2
2	R_6	1428,6	1346,8	6,8
1	R_7	756,5	776,7	-
0,5	R_8	274,8	298,0	-
0,25	R_9	120,6	128,7	-
0,125	R_{10}	59,2	63,0	-
0,063	R_{11}	70,8	76,2	-
Materiaali pohja-astiassa	P	13,8	10,6	
Yhteensä	m	3001,2	2943,0	



Käyntiosoite:	Postiosoite:	Puhelin:	Telekopio:
R-talo	Aalto/ENG/R	+358-50-555 3789, yli-ins. Veli-Antti Hakala	
Rakentajanaukio 4	PL 12100	+358-50-350 3356, lab.ins.Jukka Piironen	Sähköposti:
02150 Espoo	00076 Aalto		etunimi.sukunimi@aalto.fi

LIITE 3 RAKEISUUSKÄYRÄ

Analema pesemätön, pesuseulonta

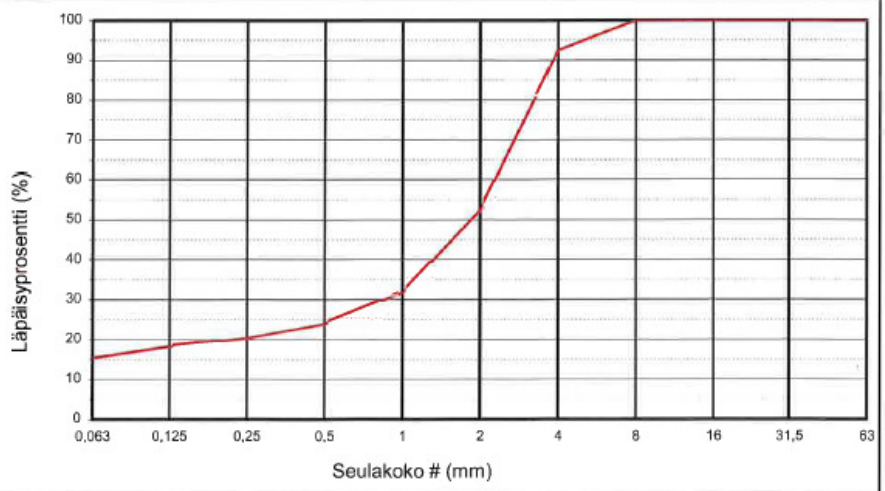
RAKEISUUS. SEULONTAMENETELMÄ SFS-EN 933-1	Aalto-yliopisto Rakennustekniikan laitos		Testasuseloste: KH-171129-01
Asiakas: TTK University of Applied Sciences, Tallina Viro		Asiakkaan yhteyshenkilö: Sven Sillamäe	Sähköposti: sven@tktk.ee
Näytteen tiedot: Analema	Koe 1	Vastaanotto päivä 25.10.2017	Testin suorituspäivä: 28-29.11.2017
			Suorittaja: Otto Hedström
Käytetty menetelmä: Pesu ja seulonta			Allekirjoitus: Vastuuhenkilö: Veli-Antti Hakala

Kuiva kokonaismassa M_1 =	1512,6 g	Tuloksen arviointi	
Kuiva massa pesun jälkeen M_2 =	1288 g	$(M_2$-(Ri+P))/M_2	0,0 %
		Tulos hyväksyttävä < 1%	
Pesussa poistuneen hieno-aineksen kuiva massa (M_1 - M_2) =	224,6 g		

Seulan aukkokoko [mm]	Seulalle jääneen materiaalin massa R_i	[g]	Seulalle jäänyt materiaali $100 \times R_i / M_1$ [massa-%]	Yhteenlaskettu läpäisy-% 100 - sum($100 \times R_i / M_1$) [massa-%]
63	R_1	0,0	0,0	100
31,5	R_2	0,0	0,0	100
16	R_3	0,0	0,0	100
8	R_4	0,0	0,0	100
4	R_5	113,9	7,5	92
2	R_6	606,8	40,1	52
1	R_7	312,3	20,6	32
0,5	R_8	117,6	7,8	24
0,25	R_9	55,0	3,6	20
0,125	R_{10}	30,6	2,0	18
0,063	R_{11}	43,5	2,9	15
Materiaali pohja-astiassa	P	7,7		

Hienoaineksen läpäisy-% 0,063 mm seulalla f=[(M_1-M_2)+P]/M1 tai f=P/M1 15,4 %

sum (R_i) + P = 1287,4 Huomautuksia:



Käyntiosoite: R-talo Rakentajanaukio 4 02150 Espoo

Postiosoite: Aalto/ENG/R PL 12100 00076 Aalto

Puhelin: +358-50-555 3789, yli-ins. Veli-Antti Hakala +358-50-350 3356, lab.ins.Jukka Piironen

Telekopio:

Sähköposti: etunimi.sukunimi@aalto.fi

Analema pesemätön, kuivaseulonta

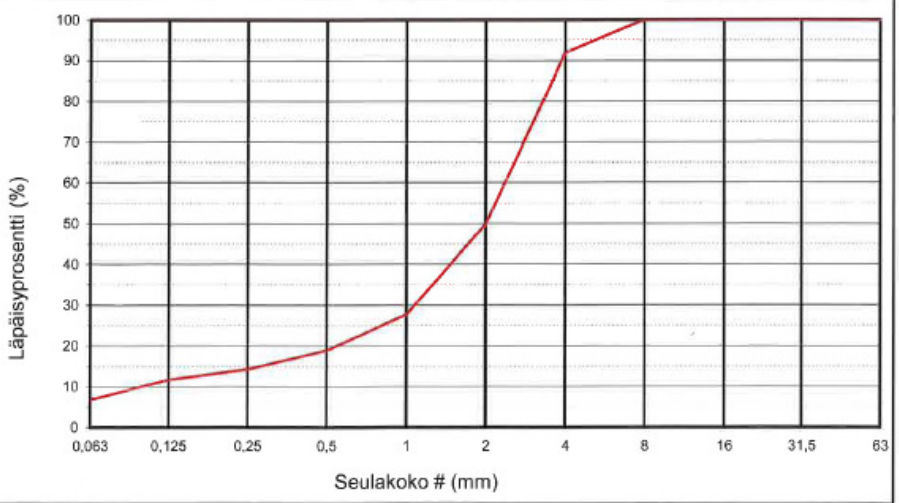
RAKEISUUS. SEULONTAMENETELMÄ SFS-EN 933-1		Aalto-yliopisto Rakennustekniikan laitos		Testasuseloste: KH-171129-02
Asiakas: TTK University of Applied Sciences, Tallina Viro			Asiakkaan yhteyshenkilö: Sven Sillamäe	Sähköposti: sven@tktk.ee
Näytteen tiedot: Analema	Koe 1	Vastaanotto päivä 25.10.2017	Testin suorituspäivä: Suorittaja:	28-29.11.2017 Otto Hedström
Käytetty menetelmä:	Kuivaseulonta		Allekirjoitus: Vastuuhenkilö:	Veli-Antti Hakala

Kuiva kokonaismassa M_1 =	1529,2 g	Tuloksen arviointi $(M_1-(Ri+P))/M_1$	-0,3 %
Kuiva massa pesun jälkeen M_2 =	- g	Tulos hyväksyttävä < 1% $(M_2-(Ri+P))/M_2$	-
Pesussa poistuneen hieno-aineksen kuiva massa (M_1 - M_2) =	- g		

Seulan aukkokoko [mm]	Seulalle jääneen materiaalin massa R_i	[g]	Seulalle jäänyt materiaali $100 \times R_i / M_1$ [massa-%]	Yhteenlaskettu läpäisy-% $100 - \text{sum}(100 \times R_i / M_1)$ [massa-%]
63	R_1	0,0	0,0	100
31,5	R_2	0,0	0,0	100
16	R_3	0,0	0,0	100
8	R_4	0,0	0,0	100
4	R_5	123,7	8,1	92
2	R_6	642,0	42,0	50
1	R_7	339,0	22,2	28
0,5	R_8	136,2	8,9	19
0,25	R_9	69,2	4,5	14
0,125	R_{10}	40,0	2,6	12
0,063	R_{11}	75,2	4,9	7
Materiaali pohja-astiassa	P	99,3		

Hienoaineksen läpäisy-% 0,063 mm seulalla f=[(M_1-M_2)+P]/M1 tai f=P/M1 6,5 %

sum (R_i) + P = 1524,6 Huomautuksia:



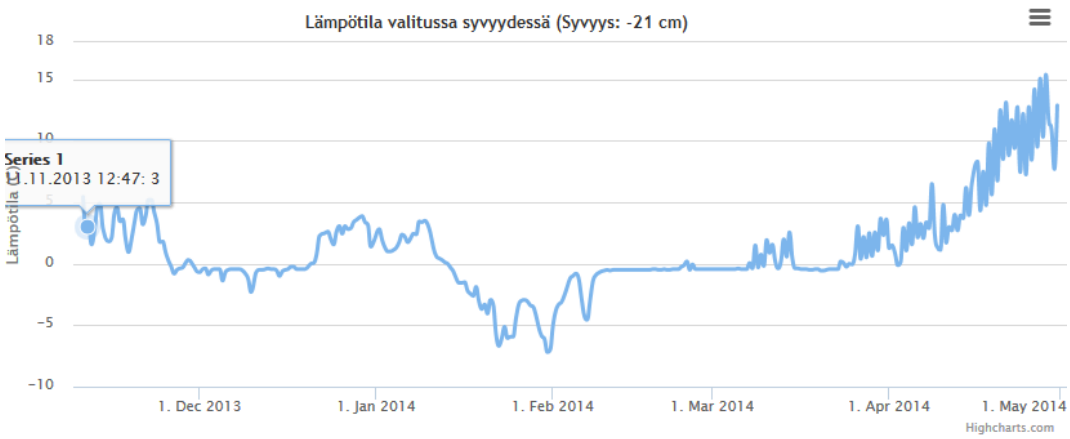
Käyntiosoite:	Postiosoite:	Puhelin:	Telekopio:
R-talo	Aalto/ENG/R	+358-50-555 3789, yli-ins. Veli-Antti Hakala	
Rakentajanaukio 4	PL 12100	+358-50-350 3356, lab.ins.Jukka Piironen	Sähköposti:
02150 Espoo	00076 Aalto		etunimi.sukunimi@aalto.fi

LIITE 4 LUOMAN SEISAKKEEN (KIRKKONUMMI, UUSIMAA) LÄMPÖTILAPROFIILIT JA PAKKASSYKLIEN MÄÄRÄ TALVINA 2012 – 2013 JA 2013-2014

Pakkassyklien lukumäärä pintaosissa syvyydellä 200 mm – 500 mm (5-11kpl/vuosi) huomattavasti suurempi kuin syvemmällä. Talvina 2012-2013 ja 2013-2014 routa tunkeutui vain yhden kerran 600 mm syvyyteen (1-sykli/vuosi).

Pakkassyklien lukumäärä eri syvyyksissä kahtena talvena Luomassa

Syvyys: **Talvi**	**0,7m**	**0,6m**	**0,5m**	**0,4m**	**0,3m**	**0,2m**
Talvi 2012-2013 (F17000Kh)	1	1	1	1	4	9
Talvi 2013-2014 (F=7500Kh)	1	1	5	8	8	11



LIITE 5 ROUTANOUSULASKELMAT

Pärnun ohitustie. Routanousun laskenta SSR-mallilla.

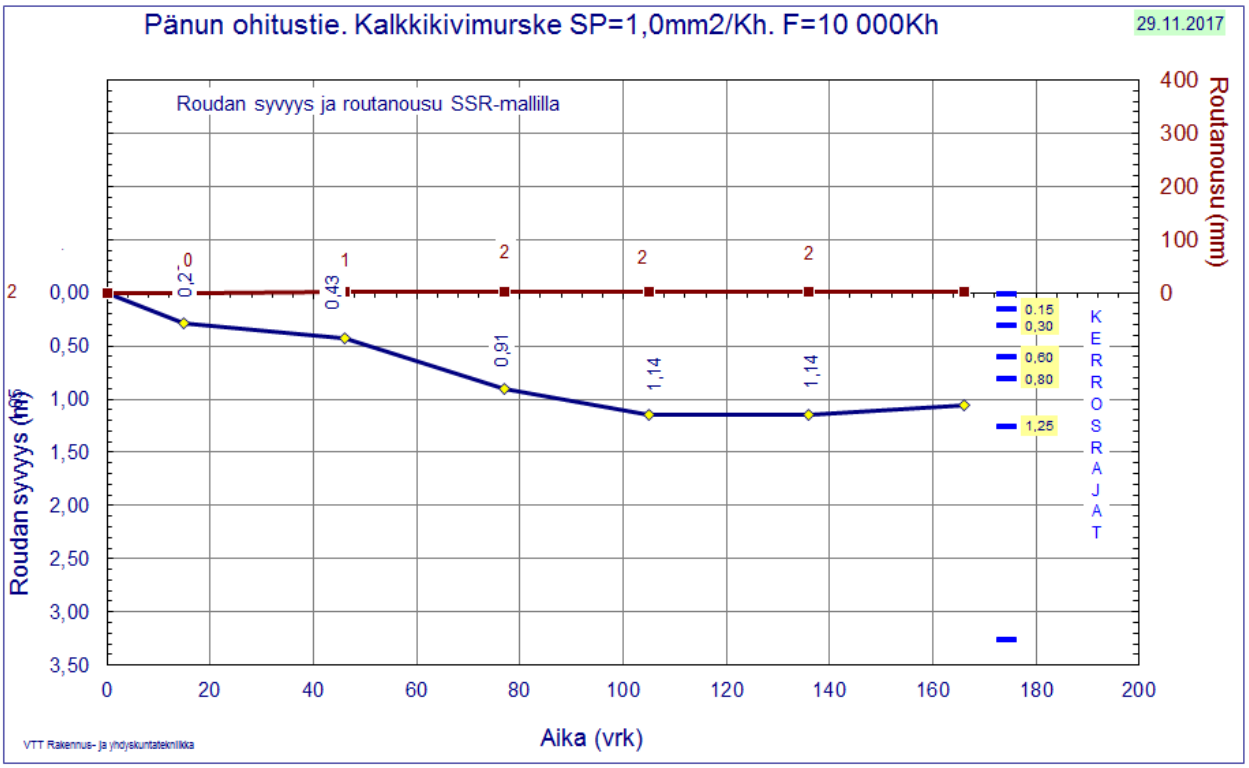
1. **Rakenne 1: Matala penger 1 1,25cm**

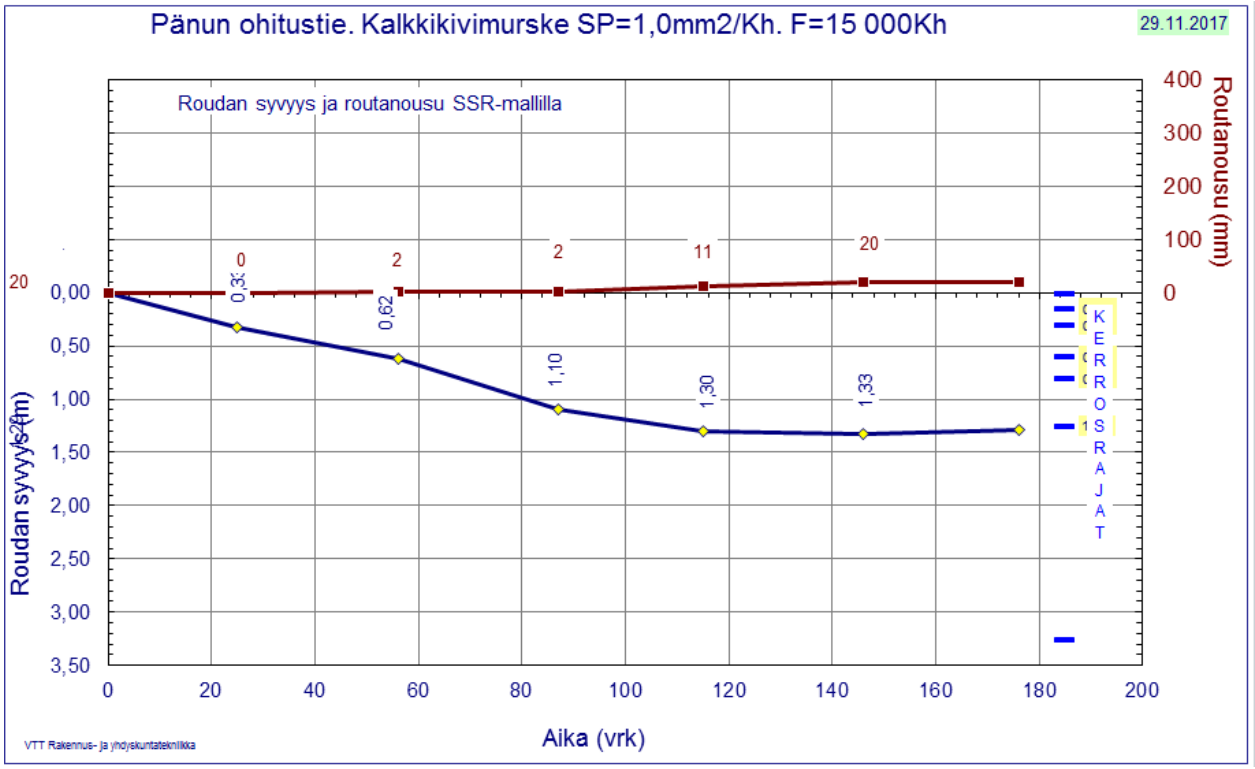
Matala penger 1 (125 cm)
4 cm SMA
4 cm AC 16 bin
7 cm AC 32 base
15 cm komposiittistabilointi
30 cm kalkkikivimurske (16...64 mm)
Suodatinkangas
20 cm "keskliiv" (k = 0.5 m/ööp)
45 cm "peenliiv" (k = 0.2 m/ööp)

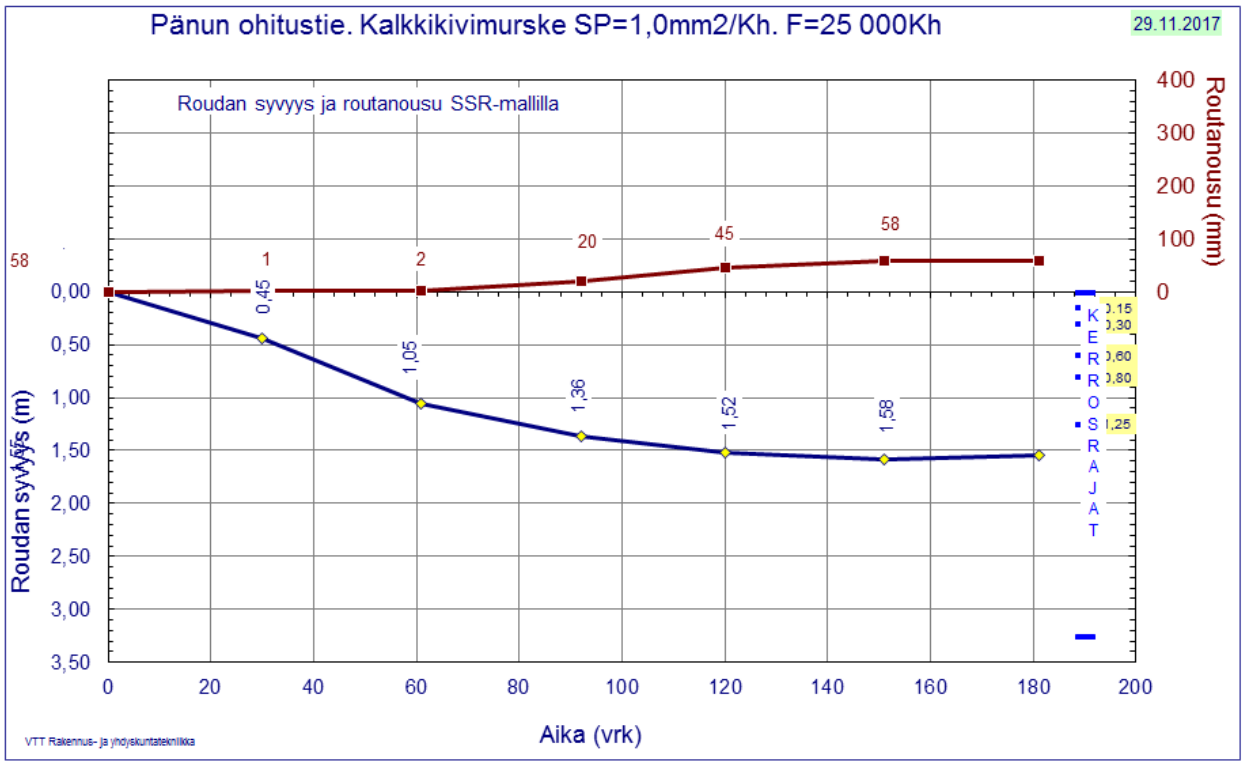
Kerroksen nro / nimi /materiaali	Kerros-paksuus (m)	Kuiva-tiheys (tn/m³)	Vesipi-toisuus (paino-%)	Savipi-toisuus (%)	Routimis-kerroin (SP) 0-kuormalla (mm²/Kh)	Jäätymis-lämpö (Wh/m³)	Jäätyneen tilan lämmön-johtavuus (W/Km)	Sulan tilan lämmön-johtavuus (W/Km)	Anna Kiinto-tiheys (tn/m³)	Kerroksen alapinnan syvyys	Märkä-tiheys (tn/m³)	Kyllästys-aste (%)	Tilavuus-vesipitoi-suus (%)	Kerrosra-javiivojen vaakasijainti tuloskuvassa (h)	Laskenta-kauden maksimi-pituus:	
Ab	0,15	2,40	0,5	0,0	0,0	1116,0	1,329	0,859	2,46	0,15	2,41	**49,2**	1,2	184,8	176	vrk
Kompstab	0,15	2,00	2,0	0,0	0,0	3720,0	1,071	1,562	2,67	0,30	2,04	**15,9**	4,0	184,8	Tästä 105%	
Kalkkikivi	0,30	2,00	10,0	0,0	1,0	18600,0	3,502	2,814	2,67	0,60	2,20	**79,7**	20,0	184,8	**184,8**	vrk
Suodatin 1	0,20	1,80	4,0	0,0	0,0	6696,0	1,118	1,576	2,67	0,80	1,87	**22,1**	7,2	184,8	Yllä oleva	
Suodatin 2	0,45	1,80	8,0	0,0	0,0	13392,0	1,917	1,980	2,67	1,25	1,94	**44,2**	14,4	184,8	kopioituu	
Savi	2,00	1,60	24,7	25,0	10,0	36753,6	3,466	1,979	2,67	3,25	2,00	**98,6**	39,5	184,8	O-sarak-	
									2,67					184,8	keeseen	
									2,67					184,8	ellei	
									2,67					184,8	muuta	
									2,67					184,8	haluta.	
									2,67					184,8		

Rakenne 1: Matala penger 1 1,25cm.

Kalkkikivimurskemurske: SP=1,0mm2/Kh. Pohjamaa savi : SP=10 mm2/Kh






Pänun ohitustie. Kalkkikivimurske SP=1,0mm2/Kh. F=25 000Kh
29.11.2017
Roudan syvyys ja routanousu SSR-mallilla
Routanousu (mm)
400
300
200
100
0
58
1
2
20
45
58
0,45
1,05
1,36
1,52
1,58
Roudan syvyys (m)
0,00
0,50
1,00
1,50
2,00
2,50
3,00
3,50
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
Aika (vrk)
KERROSRAJAT
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2. Rakenne Matala penger (124cm)

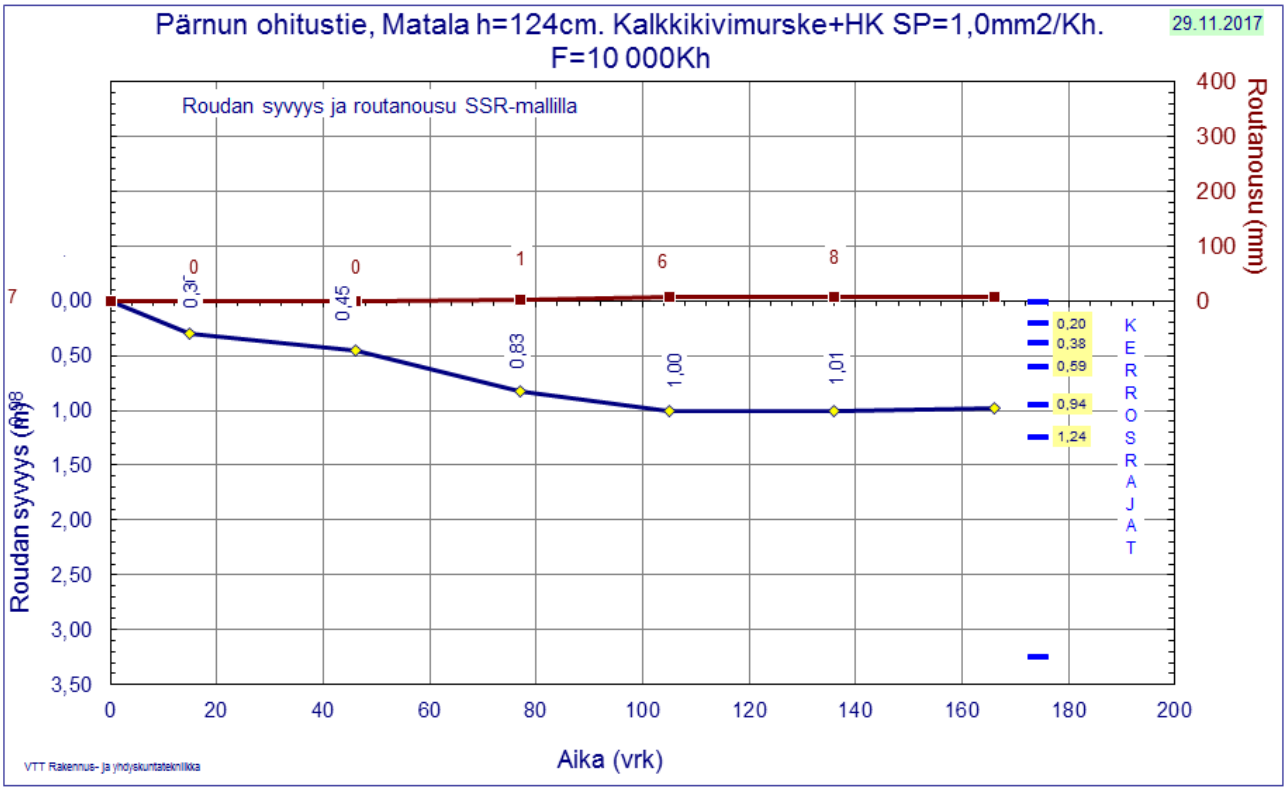
Matala penger (124 cm)
4 cm SMA
4 cm AC bin
12 cm AC base
18 cm KS32 (uusista materiaaleista)
21 cm kalkkikivimurske (LA35)
35 cm 50/50 sekotus kalkkikivijäte/luonnonhiekka
30 cm saven stabilointi (akrüülipolümeeri tai sementtistabilointi)

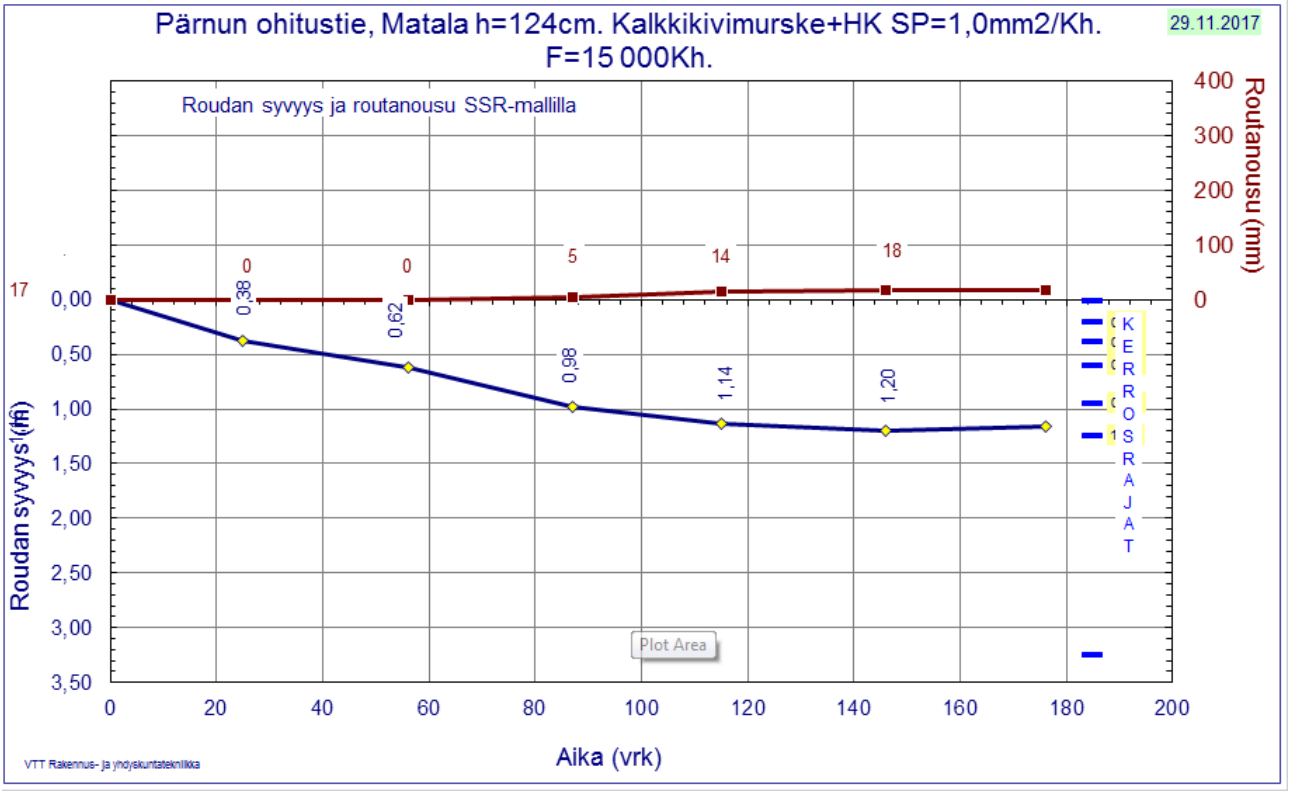
SSR- laskennan **rakenne**-lähtötietojen antaminen

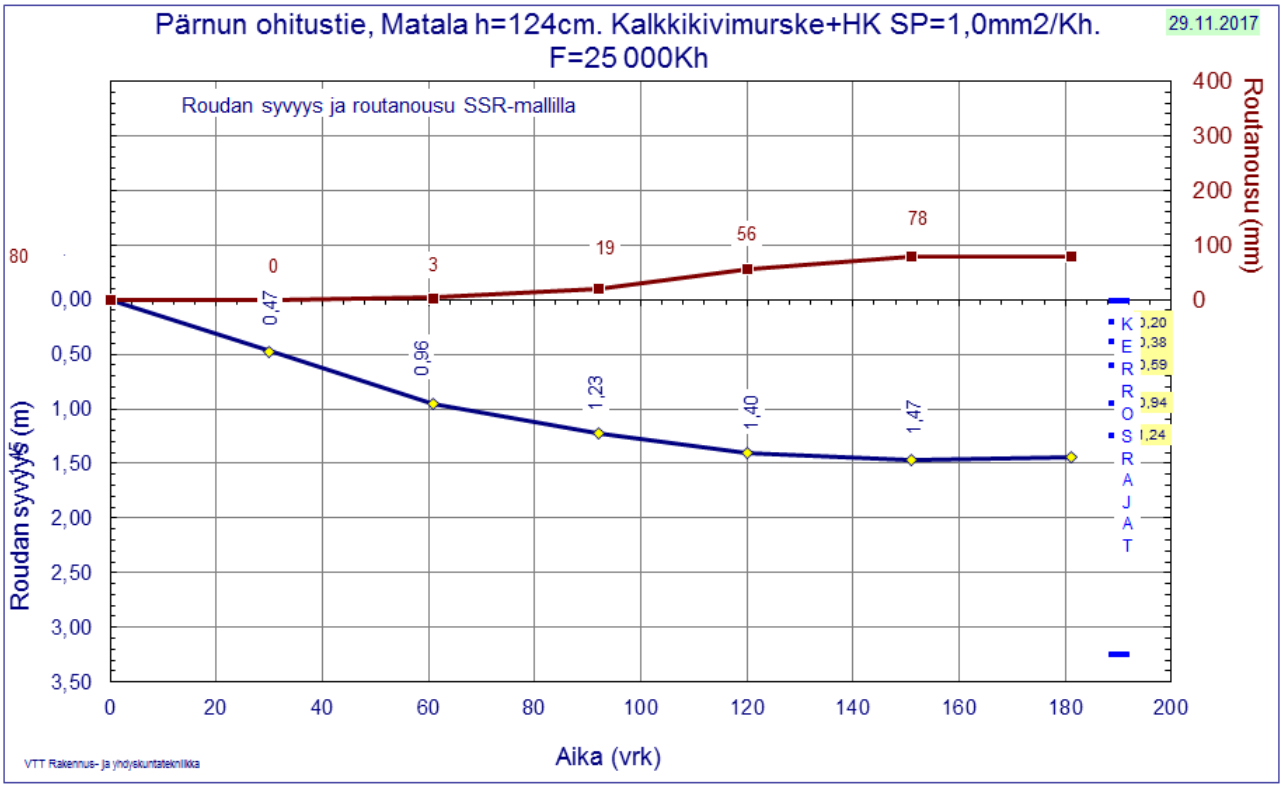
Täytä keltaisia soluja

Hakemisto-polku ja tiedosto:	T:\RAINER\SSR\xls\Temmes99.ssr	Täytä rakenteen kerrosmäärä
Nimi:	Pärnun ohitustie, Matala h=124cm. Kalkkikivimurske+HK SP=1,0mm2/Kh. F=25 000Kh	6
Kohde	Tiheydet ja vesipitoisuudet kokemusperäisesti arvioiden.	

Anna tiedot tai hae vanhasta tiedostosta **Tiedosto**-näppäimellä						Anna tiedot tai laske **H** tai **K**-näppäimellä			APUSARAKKEITA mm. kerrosrajojen ja kyllästysasteen laskemista ja tarkistamista sekä kerrosrajaviivojen piirtämistä (tuloskuva) varten							
Kerroksen nro / nimi /materiaali	Kerros-paksuus	Kuiva-tiheys	Vesipi-toisuus	Savipi-toisuus	Routimis-kerroin (SP) 0-kuormalla	Jäätymis-lämpö	Jäätyneen tilan lämmön-johtavuus	Sulan tilan lämmön-johtavuus	**Anna** Kiinto-tiheys	Kerroksen alapinnan syvyys	Märkä-tiheys	Kyllästys-aste	Tilavuus-vesipitoi-suus	Kerrosra-javiivojen vaakasijainti tuloskuvassa	Laskenta-kauden maksimi-pituus:	
	(m)	(tn/m³)	(paino-%)	(%)	(mm²/Kh)	(Wh/m³)	(W/Km)	(W/Km)	(tn/m³)		(tn/m³)	(%)	(%)	(h)		
Ab	0,20	2,40	0,5	0,0	0,0	1116,0	1,329	0,859	2,46	0,20	2,41	**49,2**	1,2	190,1	181	vrk
KS32	0,18	2,00	2,0	0,0	0,0	3720,0	1,071	1,562	2,67	0,38	2,04	**15,9**	4,0	190,1	Tästä 105%	
Kalkkikivi	0,21	2,00	10,0	0,0	0,0	18600,0	3,502	2,814	2,67	0,59	2,20	**79,7**	20,0	190,1	**190,1**	vrk
KK+Hk 50/50	0,35	1,80	8,0	0,0	1,0	13392,0	1,917	1,980	2,67	0,94	1,94	**44,2**	14,4	190,1	Yllä oleva	
stab-savi	0,30	1,80	20,0	0,0	2,0	33480,0	2,369	2,056	2,67	1,24	2,16	**110,5**	36,0	190,1	kopioituu	
Savi	2,00	1,60	24,7	25,0	10,0	36753,6	2,135	1,661	2,67	3,24	2,00	**98,6**	39,5	190,1	O-sarak-	
									2,67					190,1	keeseen	
									2,67					190,1	ellei	
									2,67					190,1	muuta	
									2,67					190,1	haluta.	
									2,67					190,1		


Pärnun ohitustie, Matala h=124cm. Kalkkikivimurske+HK SP=1,0mm2/Kh.
F=10 000Kh
29.11.2017
Roudan syvyys ja routanousu SSR-mallilla
Roudan syvyys (m)
Routanousu (mm)
Aika (vrk)
0,20
0,38
0,59
0,94
1,24
KERROSRAJAT
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka


Pärnun ohitustie, Matala h=124cm. Kalkkikivimurske+HK SP=1,0mm2/Kh.
F=15 000Kh.
29.11.2017
Roudan syvyys ja routanousu SSR-mallilla
Roudan syvyys (m)
Routanousu (mm)
Aika (vrk)
KERROSRAJAT
Plot Area
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka


Pärnun ohitustie, Matala h=124cm. Kalkkikivimurske+HK SP=1,0mm2/Kh.
F=25 000Kh
29.11.2017
Roudan syvyys ja routanousu SSR-mallilla
Routanousu (mm)
Roudan syvyys (m)
Aika (vrk)
0
3
19
56
78
0,47
0,96
1,23
1,40
1,47
KERROSRAJAT
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Matala penger 124cm. Pohjamaasaven SP=5mm2/Kh:

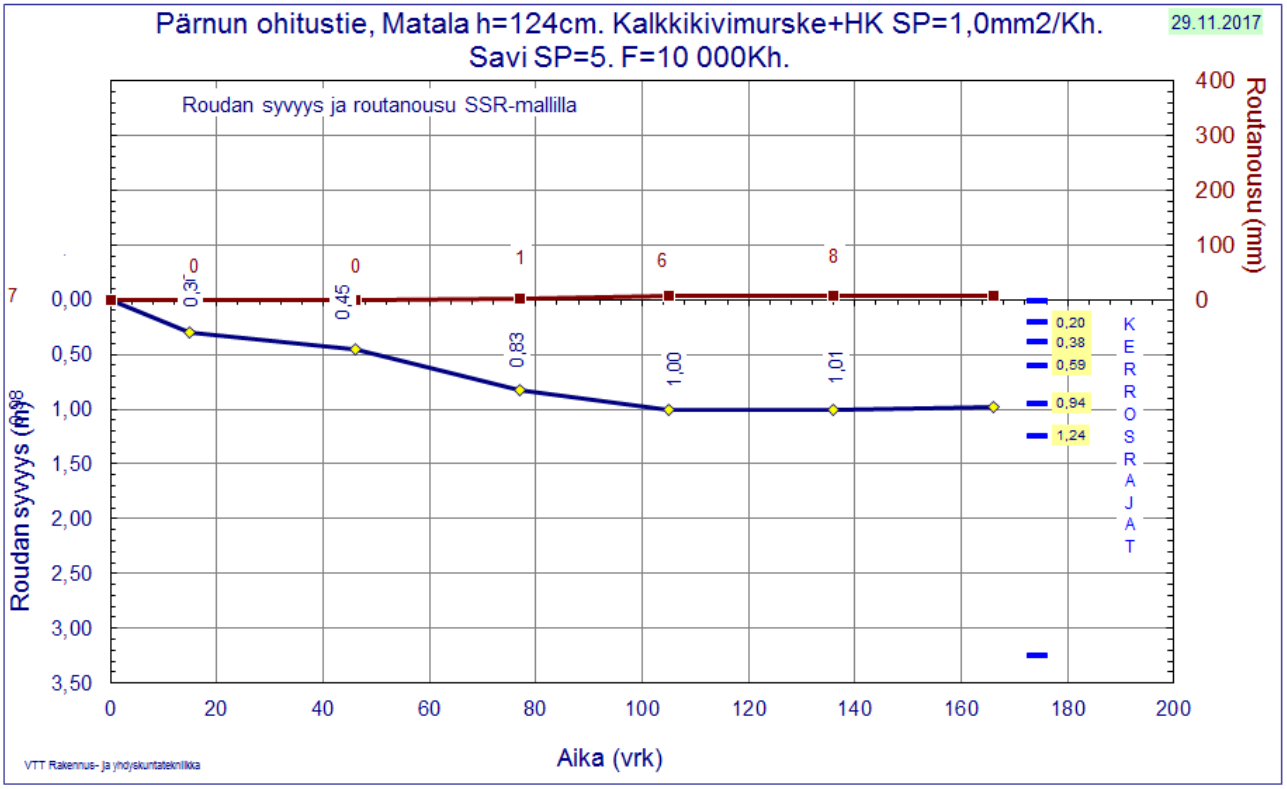
SSR- laskennan **rakenne**-lähtötietojen antaminen

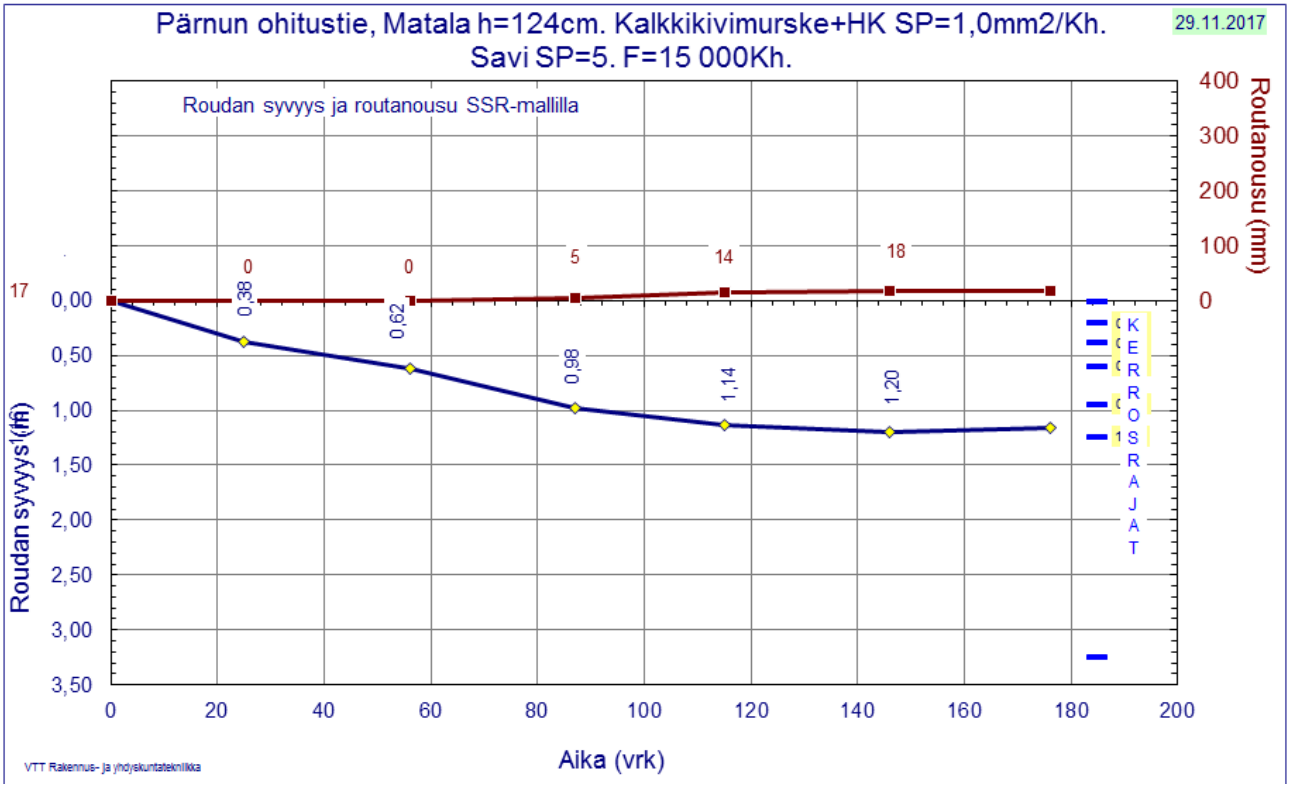
Täytä keltaisia soluja

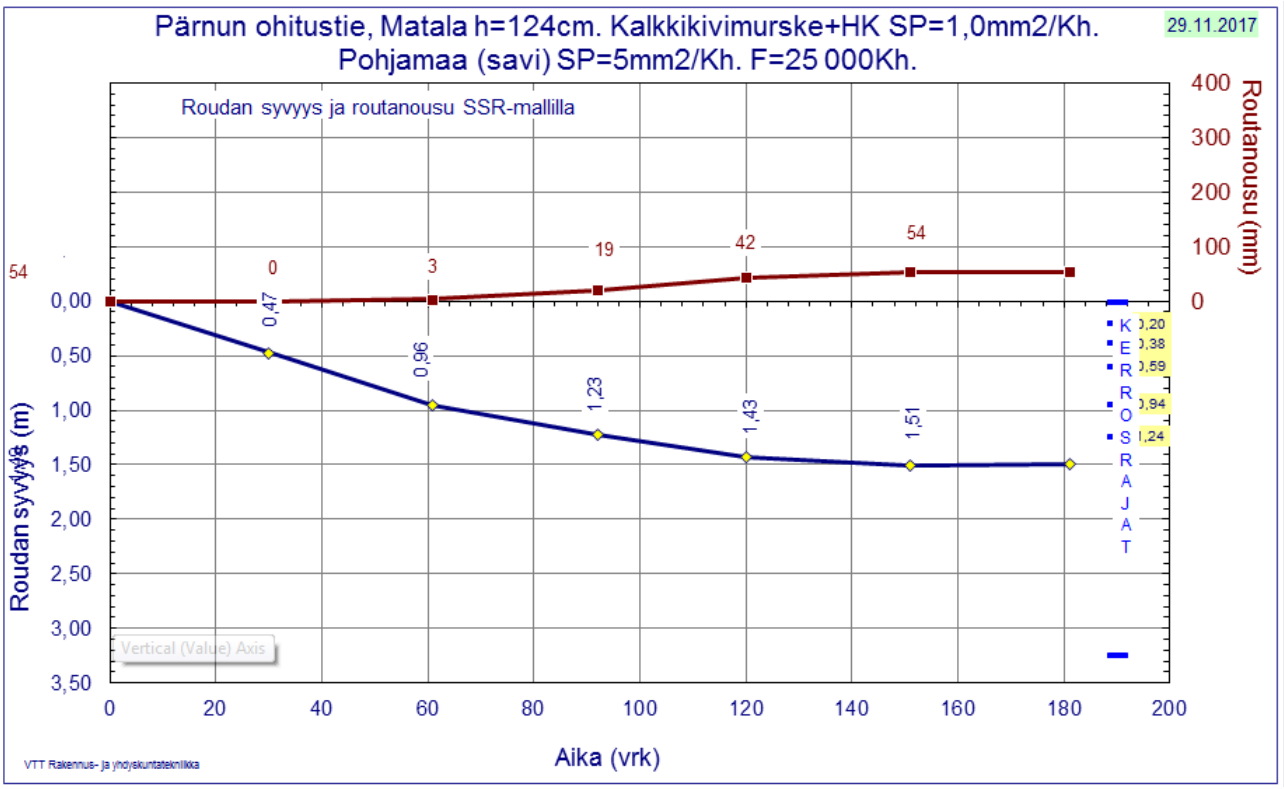
Hakemisto-polku ja tiedosto:	T:\RAINER\SSR\xls\Temmes99.ssr	Täytä rakenteen kerrosmäärä
Nimi:	Pärnun ohitustie, Matala h=124cm. Kalkkikivimurske+HK SP=1,0mm2/Kh. Savi SP=5.	6
Kohde	Tiheydet ja vesipitoisuudet kokemusperäisesti arvioiden.	

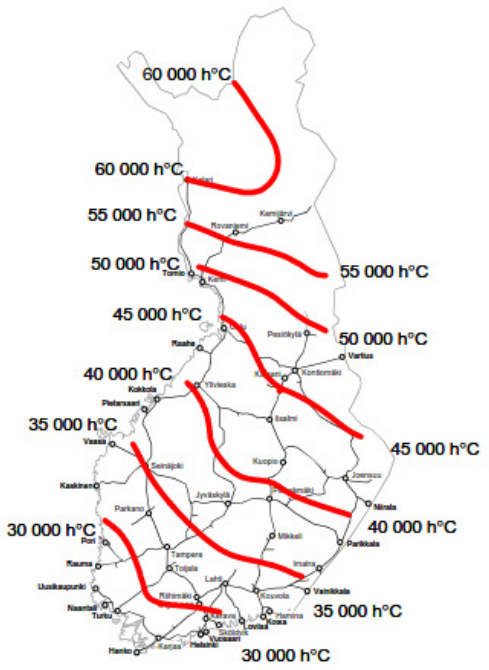
Anna tiedot tai hae vanhasta tiedostosta **Tiedosto**-näppäimellä | Anna tiedot tai laske **H** tai **K**-näppäimellä | APUSARAKKEITA mm. kerrosrajojen ja kyllästysasteen laskemista ja tarkistamista sekä kerrosrajaviivojen piirtämistä (tuloskuva) varten

Kerroksen nro / nimi /materiaali	Kerros-paksuus (m)	Kuiva-tiheys (tn/m³)	Vesipi-toisuus (paino-%)	Savipi-toisuus (%)	Routimis-kerroin (SP) 0-kuormalla (mm²/Kh)	Jäätymis-lämpö (Wh/m³)	Jäätyneen tilan lämmön-johtavuus (W/Km)	Sulan tilan lämmön-johtavuus (W/Km)	**Anna** Kiinto-tiheys (tn/m³)	Kerroksen alapinnan syvyys	Märkä-tiheys (tn/m³)	Kyllästys-aste (%)	Tilavuus-vesipitoi-suus (%)	Kerrosra-javiivojen vaakasijainti tuloskuvassa (h)	Laskenta-kauden maksimi-pituus:	
Ab	0,20	2,40	0,5	0,0	0,0	1116,0	1,329	0,859	2,46	0,20	2,41	**49,2**	1,2	174,3	166	vrk
KS32	0,18	2,00	2,0	0,0	0,0	3720,0	1,071	1,562	2,67	0,38	2,04	**15,9**	4,0	174,3	Tästä 105%	
Kalkkikivi	0,21	2,00	10,0	0,0	0,0	18600,0	3,502	2,814	2,67	0,59	2,20	**79,7**	20,0	174,3	**174,3**	vrk
KK+Hk 50/50	0,35	1,80	8,0	0,0	1,0	13392,0	1,917	1,980	2,67	0,94	1,94	**44,2**	14,4	174,3	Yllä oleva	
stab-savi	0,30	1,80	20,0	0,0	2,0	33480,0	2,369	2,056	2,67	1,24	2,16	**110,5**	36,0	174,3	kopioituu	
Savi	2,00	1,60	24,7	25,0	5,0	36753,6	2,135	1,661	2,67	3,24	2,00	**98,6**	39,5	174,3	O-sarak-	
									2,67					174,3	keeseen	
									2,67					174,3	ellei	
									2,67					174,3	muuta	
									2,67					174,3	haluta.	
									2,67					174,3		

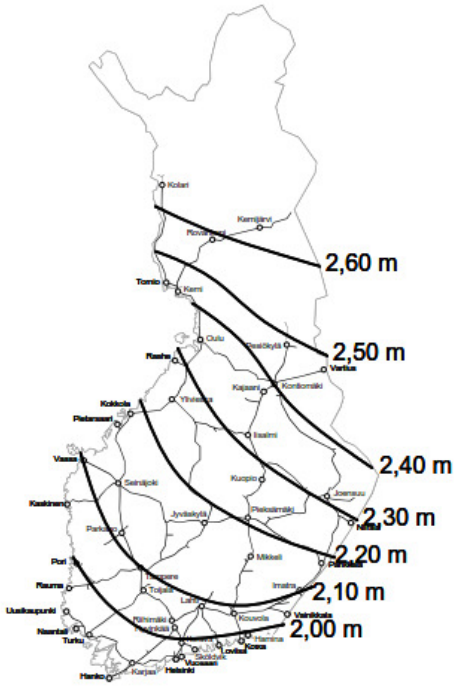



Pärnun ohitustie, Matala h=124cm. Kalkkikivimurske+HK SP=1,0mm2/Kh.
Savi SP=5. F=15 000Kh.
29.11.2017
Roudan syvyys ja routanousu SSR-mallilla
Routanousu (mm)
Roudan syvyys (m)
Aika (vrk)
0
0
5
14
18
17
0,38
0,62
0,98
1,14
1,20
KERROSRAJAT
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka


Pärnun ohitustie, Matala h=124cm. Kalkkikivimurske+HK SP=1,0mm2/Kh.
Pohjamaa (savi) SP=5mm2/Kh. F=25 000Kh.
29.11.2017
Roudan syvyys ja routanousu SSR-mallilla
Routanousu (mm)
Roudan syvyys (m)
Aika (vrk)
0
3
19
42
54
54
0,47
0,96
1,23
1,43
1,51
KERROSRAJAT
Vertical (Value) Axis
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



Kuva 8. Kerran 20 vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä F20 (h°C) kauden 1978-2007 ilman lämpötilahavaintojen perusteella.vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä F5 (h°C) kauden 1978-2007 ilman lämpötilahavaintojen perusteella.



Kuva 1. Routimattoman radan rakennekerrosten kokonaispaksuus (perustuu ilmastotilastoihin kaudelta 1978–2007).

Lisa 3.1. Aalto ülikooli raporti eestikeelne tõlge

Optimaalse tee konstruktsiooni metoodika koostamise II etapp: raport, sh laborikatsed, nende analüüs koos koostatud teekonstruktsiooni lahenduste kommentaaridega.

Tellija: Sven Sillamäe, TTK University of Applied Sciences, Tallinn

Koostajad: prof. Leena Korkiala-Tanttu, Henry Gustavsson (Aalto ülikooli õppejõud)

1. Laborikatsed ja tulemuste analüüs

Laborikatsed sisaldasid kolme külmakerketesti, mille detailid on lisas 1. Lisaks nendele tehti kolm külmakindluse testi. Katsetatud materjalid olid pestud ja pesemata Analema paekivisõelmed. Lisaks katsetati Analema paekivisõelmete ja Eassalu liiva segu (50%+50%).

Külmakerketestid tehti järgides TPPT6 kirjeldust „Routanousukoe“ (*alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/6-routanousukoe.pdf)*. Proovikehade valmistamiseks kasutati güraatortihendajat 3.95 bar rõhu juures. Tabelis 1 on kokkuvõte kolme proovikeha mõõtmistulemustest enne ja pärast külmakerkekatset. Tellija andis ette nii tiheduse (Analema pesemata sõelmed 2.18 Mg/m^3, Analema + Eassalu 50+50% 1.97…2.0 Mg/m^3, pestud Analema sõelmed 2.04…2.05 Mg/m^3) kui veesisalduse 10%.

Tabel 1. Külmakerketesti katseandmed

Name	Compaction ICT (rounds)	H(after compaction) mm	V(after compaction) cm3	m(wet), g	m(dry) g	w % (in compaction)	dry density g/cm3 (before freezing test)	m(wet) g after freezing test	w% (after freezing test)	H mm (after freezing)	V cm3 (after freezing test)	dry density g/cm3 (after freezing test)
Koe1-Unwashed Analema	57,00	100,00	785,40	1881,00	1710,00	10,00	2,18	1926,45	12,66	106,00	832,52	2,05
50%/50% Analema **Unwashed**+Eassalu Hk	36,00	98,00	769,69	1710,50	1555,00	10,00	2,02	1727,80	11,11	101,60	797,96	1,95
Analema Washed	64,00	98,00	769,69	1706,54	1551,40	10,00	2,02	1740,77	12,21	*103,00*	808,96	1,92

Tabelis 2 on esitatud külmakerketesti katsetulemused. Katsed tehti 2.5 kPa vertikaalsuunalise koormuse all, mis tulenes katseseadme enda konstruktiivsest kaalust. Tabelis 2 on esitatud külmakerkeindeks SP_0, mis kirjeldab materjali külmakerkelisust. Lisas 1 on eri proovikehade fotod katse järgselt koos graafiline külmakerke kujunemisega alates katse algusest. Tabelis 2 on esitatud külmakerked 24 ja 96 tunni möödudes alates külmutamise algusest. Proovikehal 1 algas jääläätsede moodustumine alles 36 h külmutamise algusest ja esitatud väärtused on arvutatud alatest sellest.

Tabel 2. Külmakerkekatsete tulemused, mis sisaldavad külmakerkeindeksit ja külmakerke suurust 24 ja 96 h peale külmutamise algust.

Proovikeha	SP (2,5kPa) [mm^2/Kh]	h(24h), [mm]	h(96h) [mm]
1. Analema paekivisõelmed	1,2	3,76	5,83
2. Analema + Easslau segu 50%+50%	1,0	2,47	3,49
3. Pestud Analema paekivisõelmed	1,0	1,65	2,47

Rahvusvahelise ISSMFE tehnilise komitee TC8 (*Frost in Geotechnical Engineering, Int. Symposium – Saariselkä. VTT 1989*) ettepaneku kohaselt ei ole materjal külmakerkeline, kui SP_0 < 0.5 mm^2/Kh. Kui SP_0 on vahemikus 0.5...1.6 mm^2/Kh, liigitlub materjal vähe külmakerkeliseks. Tabelis 3 on näidatud Nurmikoulu 2006 esitatud külmakerkelisuse kriteeriumid, mis sisaldab ka ISSMGE väärtusi. Tabelis 3 alusel on Analema pesemata paekivisõelmed ja sõelmete-liiva segu vähe või keskmiselt ning pestud sõelmed vähe külmakerkelised.

Tabel 3. Külmakerkelisuse liigitus (Nurmikoulu 2006)

	SP_0 (mm^2/Kh)	**h_{24h} (mm)**	**h_{96h} (mm)**
Külmakerkekindel	< 0,5	< 0,6	< 1,2
Vähe külmakerkeline	0,5…1,6	0,6…2,2	1,2…3,7
Keskmiselt külmakerkeline	1,6…3,3	2,2…4,5	3,7…7,4
Väga külmakerkeline	> 3,3	> 4,5	> 7,4

Tabeli 3 liigitus on teoreetiline. Nurmikoulu 2006 soovitab liigitust selle alusel, kuidas toimub külmakerge tegelikus teekatendis. Sellisel juhul on praktiliselt külmakerkeohutu materjal taoline, mille SP_0 on kuni 1.1 mm^2/Kh ja 96 h külmakerge 2.2 mm. Selle kriteeriumi alusel on Analema pestud paekivisõelmed ja sõelmete-Eassalu liiva segu külmakerkekindlad.

Külmakindluse testid tehti rakendades EVS-EN 13673-1 põhimõtteid. Kokku sooritati kolm seeriat (lisa 2):

1. Eassalu liiv + Analema paekivisõelmed 50/50
    a. segule tehti vaid kuivsõelumine enne ja pärast katset (peenosist ei pestud enne katset ära)
2. Analema paekivisõelmed
    a. enne katset tehti kuivsõelumine (peenosist ei pestud enne katset ära)
    b. pärast katset tehti märgsõelumine (pesu + sõelumine)
3. Eassalu liiv + Analema paekivisõelmed 50/50
    a. pesemine + sõelumine enne katset;
    b. pesemine + sõelumine pärast katset

Lisaks tehti Analema sõelmetele terakoostise määramine (pesemine + sõelumine, lisa 3).

Sõelkõverad olid kõikide katsete puhul väga lähedased. Ehitusmaterjalide kvaliteedikriteeriumiks on antud juhul massikadu. Katse järgselt jälgiti eelkõige 2 ja 4 mm sõelasid. Kõikide materjalide osas oli peale kümmet külmatsüklit võimalik näha materjali peenenemist (massikadu). Pesemata sõelmete-liiva segu massikaod olid 8.6…11.6 % ning pesemata sõelmetel vahemikus 6.8…12.2%. Pestud sõelmete ja liiva segu puhul oli massikadu veidi väiksem vahemikus 4.8…9.6%. Pesemata Analema sõelmete katsetuses suurenenud peenosiste sisalduse kasv tuleneb tõenäoliselt sellest, et katse järgselt määrati sõelkõver märgsõelumisega. Täpsed katsetulemused on esitatud lisas 2.

Analema pesemata paesõelmetele tehti nii kuiv- kui märgsõelumine (lisa 3). Nendest sõelkõveratest järeldati, et peenosisesisaldus (osised alla 0.063 mm) oli märgsõelumisel 15% ja kuivsõelumisel 7%. Varasemalt oli teada, et sõelmete peenosisesisaldus on vahelikus 15…20% (märkus, see tulenes kuhjast võetud proovi terakoostisest aastast 2014). Proovikehade suure peenosisesisalduse varieeruvuse põhjal võib järeldada, et paekivisõelmed on segregeeruvad, mistõttu tuleb sellele töömaal töötades pöörata erilist tähelepanu.

Aalto ülikool on jälginud Kirkkonummel Luoma parkimisplatsi katendikihtide temperatuuriprofiile mitme talve jooksul (lisa 4). Nende Lõuna-Soome piirkonda iseloomustavate mõõtmistulemuste põhjal on sügavuses 200…500 mm täheldatud külmumistsükleid kahe talve jooksul (2012-2013 ja 2013-2014). Kuna paekivisõelmed ei ole laboris tehtud külmakindluse testi põhjal täiesti külmakindlad, tuleks materjal paigaldada vähemalt 600 mm sügavusse teekattest, et külmumistsüklite arvu saaks oluliselt vähendada (kommentaariks, jälgimiste alusel külmus sellisel sügavusel pinnas talve jooksul vaid korra ega toimunud mitmeid külmumis-sulamistsükleid).

Etteantud tööde madalate muldkehade katendilahenduste põhjal tehti külmakerketesti tulemusi ära kasutades külmakerkearvutused. Kuna Pärnu piirkonna külmaandmed ei ole teada, tehti külmakerkearvutused kasutades kolme eri külmamäära, F = 10´000 Kh, F = 15´000 Kh ja F = 25´000 Kh. Külmakerkearvutused tehakse tavaliselt umbes korra 20 aasta jooksul korduvale külmamäärale, mis Lõuna-Soomes on umbes 25´000 Kh, mis tähendab, et külmumissügavus on umbes 1.6 m, mis eeldab, et teekonstruktsiooni kogupaksus oleks umbes 1.5…1.6 m vältimaks liiga suuri külmakerkeid. Soovitatud madalate muldkehade (1.24 – 1.25 m) korral võib jäätumine külmade talvede korral tungida savisesse aluspinnasesse põhjustades 50…80 mm suuruse külmakerke sõltudes teekonstruktsioonist ja pinnase külmakerkelisusest. Antud arvutustes arvestati, et savi külmakerkeindeks SP on vahemikus 5…10 mm^2/Kh. Paekivisõelmete vähene külmakerkelisus (SP_0 = 1 mm^2/Kh) põhjustab teekatendis alla 20 mm külmakerke. Täpsemad üksikasjad on esitatud tabelis 4 ja lisas 5.

Tabel 4. Are ümbersõit. Külmakerked (mm) eri külmamäärade ja savipinnase külmakerkeindeksitega (SP)

Konstruktsioon / Külmamäär	Aluspinnas (savi) SP=10 mm^2/Kh		Savi SP=5 mm^2/Kh
	Madal muldkeha (1,25 m)	Madal muldkeha (1,24 m) koos stab. savi SP = 2 mm^2/Kh	Madal muldkeha (1,24 m) koos stab. savi SP = 2 mm^2/Kh
F=10 000 Kh	2 mm	8 mm	8 mm
F=15 000 Kh	20 mm	18 mm	18 mm
F=25 000 Kh	58 mm	78 mm	54 mm

Kokkuvõttena tehtud laborikatsetest võib järeldada, et muldkeha ehitamiseks toimib kõige paremini pestud paekivisõelmed või paekivisõelmete ja liiva segu. Kuna materjalid olid külmakindluse testi tulemusel mingil määral külmakartlikud, on nende pikaajalise säilimise huvides parem, kui need paikneksid vähemalt 600 mm sügavusel teekattest. See soovitus põhineb Lõuna-Soomes tehtud temperatuurimõõtmistele, mille alusel kahe talve jooksul on jäätumis-sulamistsüklid ulatunud üle 500 mm sügavusele.

2. Paikkond ja projekteeritud teekonstruktsioon

Käsitletav objekt on maanteel E67 Tallinn – Pärnu – Ikla Pärnu lähedal asetsev kahesuunaline maantee, mille laius on 15 m ja kus on 2+1 sõidurajad, mis on omavahel eraldatud piirdega. Teel planeeritakse 2+2 olukorda sellega, et nõlvad ehitatakse algselt laugemana (1:5). Lõplik 2+2 saadakse ehitada seega nõlvade arvelt, et alles jääks nõlvus 1:4, mis tähendab, et tee alla jääv maa-ala ei lähe enam laiemaks. Tellija Maanteeameti soov on leida optimaalset lahendust kirjeldatud tee rajamiseks nii, et selles kasutataks võimalikult palju kohalikke materjale.

Paikkonnast, mille pikkuseks on umbes 6 km, on tehtud pinnaseuuringuid umbes 150 m vahemaa tagant. Peamiseks uuringumeetodiks on olnud puurimine (47 tk), kuhu on kuulunud puurimiskiiruse mõõtmine, pinnasekihtide eraldamine ja proovivõtt. Lisaks on tehtud mingil määral penetratsiooni- (23 tk) ja tiivikkatseid (6 tk). Piirkonna maapinna kõrgus on vaheldunud umbes +9…+16 m merepinnast ülalpool ja pinnaseolud on olnud suhteliselt tasased. Pehmete, kokkusurutavate kihtide paksus on hinnatud kõige sügavamas kohas umbes 4 m. Pinnasevesi on olnud 0…3.5 m sügavusel maapinnast.

Kuuest proovist on määratud laborikatsete abil kompressiooniindeks C_c, dekompressiooniindeks C_s, konsolidatsioonimoodul C_v ja ületihenemismäär σ_c. Nähtavasti kirjeldavad need proovid vaid ülemist savikihti, mistõttu need ei iseloomusta kõiki kokkusurutavate kihtide materjale. Seetõttu on pehmemate kihtide vajumiparameetrid leitud kogemuste põhjal. Piirkonnast on suur hulk (üle 100 tk) rikutud struktuuriga proove, millest on määratud lõimis, tihedus ja veesisaldus. Kõige eelneva põhjal on määratud materjalide omadused.

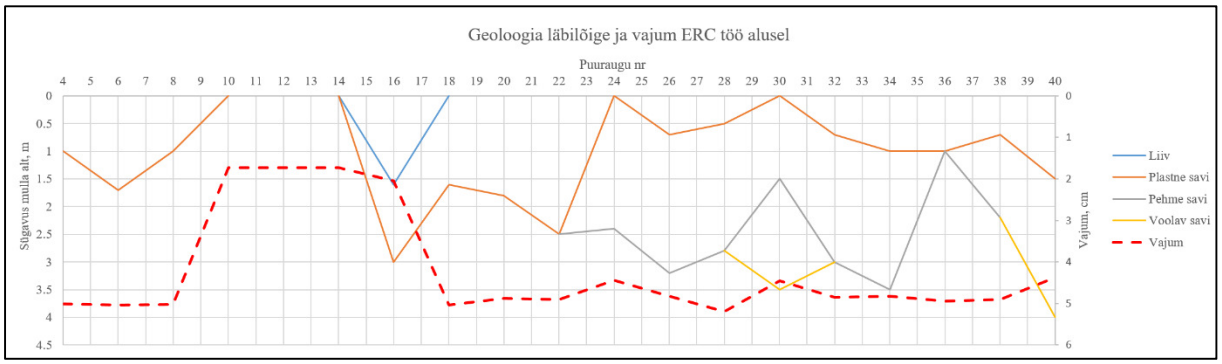
Kuuest uuringupunktist on tiivikkatsega määratud dreenimata nihketugevused. Mõõtmised on tehtud iga 0.5 m tagant (sügavuses). Kõiki tiivikkatsetulemusi on redutseeritud sama konstandiga kasutades arvu 0.8. Soomes tuleneb redutseerimiseks kasutatav väärtus materjali veesisaldusest või voolamispiirist ja see võib eri kihtides vahelduda. Tiivikkatse tulemustest nähtub, et TK40 väärtused vahemikus 1…3.5 m (tulemused 1 – 2 kPa) on ebaõnnestunud. Ka TK31 sügavuses 2.5 m (tulemus 3 kPa) ja TK26 sügavuses 1.5 m (6 kPa) oli pinnas kas rikutud või olid mõõtmised muul moel ebaõnnestunud.

Lisaks on raportis esitatud eri kihtide tugevusomaduste leidmisel arvestatud tõenäoliselt koostaja omi kogemusi, Das & Sobha (2014) ja Eurokood 7 teist osa. Kokkuvõttes on pinnaseuuringute maht väike võrreldes näiteks Soome juhenditega arvestades paikkonna nõudlikkust ja ebaõnnestunud katsete arvu. Pinnaseuuringutes ja nende tõlgendamisel loodetakse palju kohalikele kogemustele. Joonisel 1 on esitatud piirkonna pinnaseolud pikiprofiilil uuringupunktidena. Maapinna kõrgust ei ole näidatud. Põiksuunas on kõikides punktides oletatud olevat homogeensed olud.

Ala keskmised pinnaseolud on (märkuseks, siin on kasutatud ERC tööst leitud omadusi):

7. Pealmine kiht on muld, mis eemaldatakse;
8. Kohati on järgmiseks kihiks liiv, mille maksimumpaksus on 1.5 m;
9. plastine savi (q_c = 0.5...2 MPa, W_n = 29.0...44.5%, W_L = 72.8%, W_p = 32.7%, n = 1.0, e = 50%, γ = 18.4 kN/m^3, C_u = 35 kPa, C_c = 0.47, C_r = 0.04, OCR = 10, C_v = 0.62 m^2/year,);
10. pehme savi (q_c = 0.2...0.5 MPa, W_n = 42.2...65.4%, W_L = 69.0%, W_p = 33.1%, n = 1.51, e = 60.1%, γ = 16.6 kN/m^3, C_u = 15 kPa, C_c = 0.79, C_r = 0.07, OCR = 2, C_v = 0.74 m^2/year,);

11. voolav savi (q_c < 0.1...0.2 MPa, W_n = 70.4...86.6%, W_L = 86.5%, W_p = 33.6%, n = 2.15, e = 68.3%, γ = 15.3 kN/m^3, C_u = 10 kPa, C_c = 1.33, C_r = 0.09, OCR = 2, C_v = 0.35 m^2/year,);
12. kõige alumine kiht on moreen (q_c > 2 MPa, E = 30 MPa, γ = 22 kN/m^3, φ = 38º, c = 15 kPa.



Joonis 1. Paikkonna pikisuunalised pinnaseolud arvestades uuringupunkte. Sügavused on arvestatud maapinna suhtes, mistõttu selle kõrgusarve ei ole siinkohal esitatud. Kõige sügavam kiht (savi all) on moreen.

Škepast&Puhkim töös esitatud vajumiarvutustes on selge arvutusviga. Arvutustes tuleks anda veeküllastunud mahumassi γ_{sat} kohas pinnase veeküllastunud väärtus, mis pinnaseveest allpool peaks olema sama, kui mahumass γ. Pinnaseveetasemest ülalpool γ_{sat} väärtus võib olla suurem, kui γ. Variantideks on arvutusprogrammis jätta γ_{sat} koht täitmata, misjärel Geocalc kasutab mahumassi, millest veepinnast allpool arvestatakse vee üleslükkejõud saades efektiivne mahumass. Veeküllastunud mahumass pidanuks olema seega vahemikus 15.3...18.8 kN/m^3, kuid arvutustes on kasutatud väärtusi 20...30 kN/m^3. Nii on saadud liiga suured pinge väärtused ja vajumiarvutustes on vajumi suurus ülehinnatud eriti nendes kohtades, kus on kasutatud konsolideerumispinge konstantset väärtust. PK 133+71 ristlõike osas on Škepast&Puhkim aruandes saadud vajumiks umbes 100...110 mm, kuid võrdlusarvutus korrigeeritud veeküllastunud mahumassidega andis ca 25% väiksema väärtuse. Seega võib arvestada, et Škepast&Puhkim vajumiarvutused ülehindavad koguvajumit ca 25...30%. Üllatav on ka see, et arvutustes on kasutatud Ohde-Janbu arvutusmetoodikat, kuigi oleks võinud kasutada lihtsamat ja mitte nii veaaldist C_c metoodikat, kuna parameetrid leitakse kokkuvõttes ikkagi selle abil.

ERC Konsultatsiooni vajumiarvutused on tõenäoliselt tehtud Rocscience programmiga. Tulemustest ei näe otseselt, milline pinnasemudel on olnud kasutusel. Arvutatud vajumid on selgelt väiksemad, kui Škepast&Puhkim väärtused. Arvutustulemustes äratab tähelepanu vajumite jaotumine ristlõikes nii, et nõlva lähedale tekib ebaühtlane vajum ja erilised kühmud. Üllatuslikult on suurim vajum kohati samuti nõlva läheduses, näiteks PA30 2+2 puhul. See ei ole tõenäoline, kuna koormus nõlvale lähenedes väheneb. Arvutustulemuste väljavõttelt ei näe, kas kasutusel on olnud näiteks täpsem maapinna mudel, mis selgitaks „imelikke“ tulemusi.

Škepast&Puhkim töös tehtud stabiilsusarvutused näivad olevat korrektsed. Kasutatud on tingimust, et F > 1.5. ERC Konsultatsiooni stabiilsusarvutustes on mingil põhjusel kasutatud järsku nõlva (numbriliselt 1:1.5). ERC Konsultatsiooni arvutused on tehtud kasutades Eestis rakendatavaid Eurokoodi osavarutegureid ja seega F > 1. Osavarutegurid on efektiivnidususele ja -sisehõõrdenurgale 1.25, dreenimata nihketugevusele 1.4 ja muutuvkoormusele (liikluskoormus) 1.3. Need tegurid selgitavad selle, et ERC arvutustes on märgata rohkem hajuvust ja väiksemaid (stabiilsus)arve. Positiivse poole pealt tuleb märkida,

et ERC on esitanud materjaliparameetrite tundlikkuse (*mõiste?*) analüüsi. Üldise märkusena mõlema töö osas, et Soomes on tavaks keskenduda arvutustes peamiselt aluspinnase stabiilsusele, mistõttu ehitatava muldkeha seesmist stabiilsust tavaliselt ei esitata. Need võib küll arvutada, kuid tegemist on harva kasutatavate tulemustega ja on vähe huvipakkuvad.

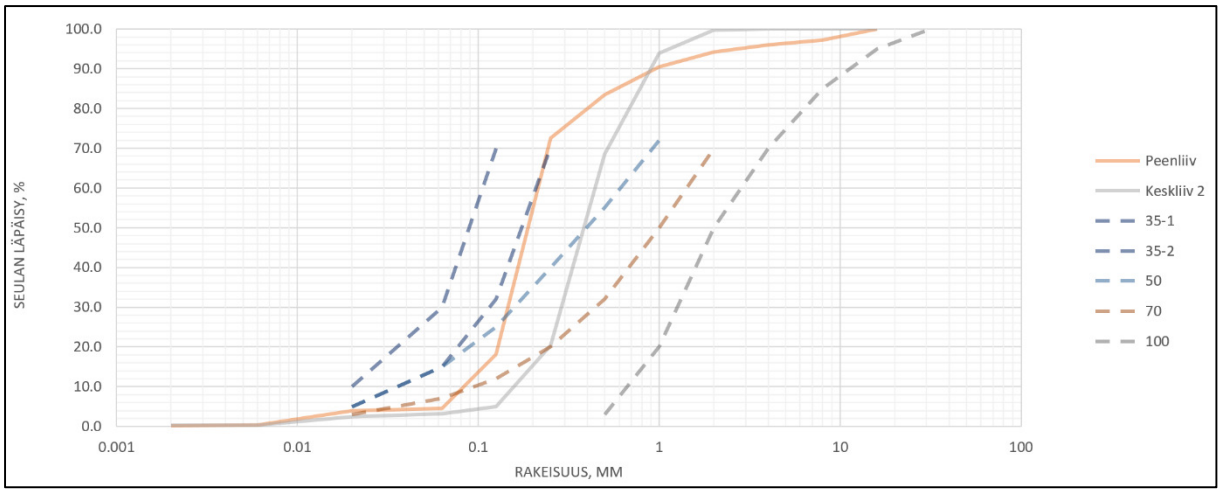
Tiivikkatse ebaõnnestumine eriti punktis TK40 on murettekitav seetõttu, et sellel alal on arvutatud stabiilsus madalaim. Mõlemas tehtud arvutuses on selles kohas kasutatud konservatiivset kogemuslikku väärtust (dreenimata nihketugevusele) 10 kN/m^2. Seega mõlemad arvutused võivad olla siinkohal mõnevõrra konservatiivsed.

3. Ettenähtud teekatendid

Nii Škepast&Puhkim kui ERC Konsultatsiooni on Maanteeameti tellimusest lähtudes pakkunud eri katendivariante, millega saaks optimeerida kohalike materjalide kasutust. Objektile on esitatud nii kõrgeid (2.33 või 1.75 m) kui madalaid (1.24 või 1.25 m) muldkehasid. Kõrgete muldkehade osas on lähtutud tellija nõudest, et selle kõrgus oleks 1.2 m üle piirkonna maksimaalse lumekihi paksuse. Jälgimise põhjal on lumekihi maksimaalne paksus olnud 550 mm näiteks aastal 1995, mil muldkeha kõrgus peaks olema vähemalt 1.75 m vältimaks tuisuvaalude teket teele. Lõuna-Soomes on tuisuprobleemi täheldatud eelkõige avatud maastikuga kohtades seal, kus on väga madalad muldkehad või kui tee on süvendis.

Tee katendikihtide arvutamisel on lähteparameetriks olnud 33 miljoni standardtelje ülesõit (märkus, see tuleb ERC töö arvutusest Rootsi meetodi alusel). Soovitatud katendid on projekteeritud seda arvestades, mistõttu paiknevad ülaosas paksud seotud kihid. Ühes lahenduses on soovitatud ka olemasoleva pinnase ülaosa stabiliseerimist.

Lisaks sisaldub teekonstruktsioonis kahte kohalikku liiva: „keskliiv“ ja „peenliiv“. „Keskliiva“ arvutuslik moodul Eestis on 105 MPa ja „peenliival“ 90 MPa. Soomes oleks vastavate liivade arvutuslik moodul 50 MPa (joonis 2). Põhjus on selles, et Soome arvutusmetoodika põhineb kevadistele kandevõimetele ehk sideainega sidumata kihtide osas kasutatakse kevadisi mooduleid, mil materjal oletatakse olevat märg. Joonise 2 kohaselt mõlemad materjalid satuvad 50 MPa alale. „Peenliiv“ satub isegi 35 MPa alale, kuid kuna peenosisesisaldus on madal, on 50 MPa korrektsem.



Joonis 2. ”Keskliiv” ja ”peenliiv” tüüpilised terakoostised võrrelduna Soome dreenliivade moodulitega.

Pauli Kolisoja (2017) Tampere Tehnikaülikoolist on hinnanud esitatud katendite eluiga ehk vastupidavust koormusele ja teinud arvutuse ka Odemarki meetodiga. Vastupidavus koormusele on leitud juhendi ”Tienrakenteen suunnittelu” järgse mudeliga kasutades

analüütilist arvutust. Kui sideainega seotud kihtide temperatuuriks on +20 ºC, saadakse katendite vastupidavuseks vahemik 1.8...13.7 milj. tsüklit, mis on selgelt väiksem, kui 33 milj. Kõikides konstruktsioonides sai määravaks liivakihi deformatsioon. Odemarki meetodiga saadi kandevõimeteks vahemik 284...504 MPa olenevalt vaadeldud konstruktsioonist. Mõlemad meetodid andsid suuremad väärtused ERC Konsultatsiooni madala muldkehaga variandile, järgmiseks tugevam oli sama meeskonna kõrge muldkehaga variant. Kõige madalam kandevõime ja vastupidavus koormusele leiti Škepast&Puhkim katendivariandile 2, mille põhjuseks on paksude liivakihtide olemasolu, mille moodul Soomes on madalam, kui töödes oldi arvestatud.

Kasutades seotud kihtide temperatuurina +10 ºC, muutuvad koormustaluvused oluliselt paremaks. Sellisel juhul vaid Škepast&Puhkim katendivariant 2 koormusele vastupidavus (5.7 milj.) jääb alla 33 milj. Arvutustes ei ole võetud arvesse savipinnase stabiliseerimist, kuna see on katendi vastupidavust silmas pidades ebaoluline.

Arvutused on selgesti tugevalt mõjutatavad liiva moodulist ehk kui kasutatakse (sarnaselt Eestile) suuremat väärtust, saadakse ka arvutuslikult tugevamad katendid. Kolisoja nendib, et kontrollarvutus on veidi küsitav, kuna katendi ülaosas on eelkõige seotud kihid ja liiv paikneb võrdlemisi kõrgel. Olukorda võiks parandada suhteliselt õhuke, kuid kõrgema kvaliteediga sideainega sidumata kiht seotud kihtide all või materjali stabiliseerimine.

4. Kokkuvõte

Tehtud laborikatsetuste ja muude hinnangute põhjal oleks heaks muldkeha (teekonstruktsiooni) kõrguseks umbes 1.6 m, millega külmakerked püsivad väikestena. Nii on ka tuisuohtlikkus suhteliselt madal. Katsetatud materjalidest võib soovitada kasutamiseks Analema pestud paekivisõelmeid või Analema paekivisõelmete ja Eassalu liiva 50+50% segu. Materjalide pikaealisuse huvides on soovitatav, et need paigaldataks vähemalt 600 mm sügavusele teekattest.

Pakivisõelmete või sõelmete-liiva segude stabiliseerimine parandaks tõenäoliselt materjalide kalduvust peeneneda koormuse all ning vähendab segregeerumise ja külmakerkeriski. Lisaks suureneb materjali tugevus- ja deformeerumisomadused. Stabiliseerimine on teema, mida võiks käsitleda jätku-uuringus.

Lisa 4. Mait Metsa (PhD) seisukoht

GEOENGINEERING

V.a. hr. S. Sillamäe

HINNANG 07.11.2017 nr 132

Käsitleb : Geotehnilisi probleeme Riigihanke 178804631840. Are möödasõit Ringtee № 4.

Kasutatud materjalid :

1. Hankedokumendid. Lisa 3. Geoloogiliste uuringute teostamine.
2. REIB töö GE-2210.
3. ERC Konsultatsiooni OÜ. Leping nr. 17-00120/010. Aruanne ERC -25/2017
4. Aruanne GEOLEP T-4 Are ümbersõidu katseobjekt. Geotehniliste arvustuste raport.

Analüüsitud projektides on jõutud erinevate tulemusteni. Vajumiste erinevus on 3 korda ja projekteeritud nõlvade osas ligi 10°.

Tekkinud olukord on tekkinud tellija geotehnilise pädevuse tõttu. Tellija on esitanud ebapädeva ülesande uuringu tegijale, kiitnud aruande heaks ja esitanud selle lõpliku tõena projekteerijale. Kuna aruanne ei sisalda projekti koostamiseks vajalikke andmeid, on projekteerijad need andmed ise „leidnud" ja tuginedes nendele projekteerinud. Lõpptulemus on mõlemal juhul rahuldav – tee on võimalik rajada ja muldkeha püsivusel on küllaldane tagavara. See satub kokku Eesti teedeehitajate senise kogemusega samalaadsetes oludes, mis on siiani üldiselt positiivne.

Nõlvade arvutamisel on C_u väärtusena kasutatud nihketugevust 10 kPa. Arvu olemus jääb kahjuks tumedaks ja tuletada ta uuringutulemustest on keeruline. Meelevaldselt grupeerides annavad tiivikkatsed järgmise pildi :

Dreenimata nihketugevus kPa 60 ... 90 - 6 korda
Dreenimata nihketugevus kPa 20 ... 60 - 10 korda
Dreenimata nihketugevus kPa 5 ... 20 - 9 korda
Dreenimata nihketugevus kPa 1,6 ... 5 - 7 korda

Tulemused alla 5 kPa saadi TK-40 tegemisel. Kas tegemist on veaga nagu arvab ERC või on tegemist tõesti väga nõrga pinnasega? Selles oleks tulnud veenduda täiendavate uuringutega (täiendavad välikatsed ja laboris dreenimata konsolideerimata nihketugevuse määrangud). Kui pinnas on nõrk, on vaja ta levikuala määratleda, sest sellel alal tüüplahendused ei sobi.

GEOLEP on nõlva arvutanud ringsilindri klassikalise arvutusskeemiga. Kõik lihkepinnad läbivad savide alumise osa ja tänu sellele annab arvutus tegelikust suuremad varuteguri väärtused. Käesoleval juhul kui nihketugevus on 10 kPa, ei oma see tähtsust. Saadud nõlvakalle 1:3 vastab maalihete käigus formeerunud nõlvadele. Maalihked on toimunud sarnastes geotehnilistes oludes viimase 30 aasta jooksul Pärnu ja Sauga jõe kallastel Pärnu linnapiirist ülesvoolu.

Järsem nõlv 1:2 on soovitatud ERC arvutuste põhjal. See vajab tõestust arvutustega, mis võtavad arvesse tegeliku geoloogilise lõike ja kõikide savikihtide tegeliku nihketugevuse, mis on määratud antud alal tiivikkatsetega või laborikatsetega (dreenimata-konsolideerumata teim). Korrelatsioonid veesisalduse ja dreenimata nihketugevuse vahel, mis on suurepärased Pärnu linna territooriumil antud alal ei tööta.

OÜ Geoengineering reg kood 11295895
Postkast 77 Pärnu Postkontor 80051 a/a EE882200221033763973 SWEDbank
Telefon +372 5019567
geoengi@hot.ee

GEOENGINEERING

Vajumiste arvutamiseks geotehniline aruanne arvutusparameetreid ei anna. Milliseid parameetreid on kasutanud GEOLEP jääb saladuseks ja anda hinnang saadud tulemustele on keeruline. Kui on kasutatud Soomes koostatud korrelatsioone, siis need Pärnu viirsavide jaoks on ebasobivad ja nende kasutamine arvestustes annab tegelikust suuremad vajumid. Kogemuslikkusele tuginedes on arvutatud vajumid 20 ... 30 % suuremad tulevikus mõõdetuist.

ERC on vajumite arvutamiseks kasutanud tal olemasolevat andmebaasi. See tugineb Pärnus tehtud uuringutele. Pärnus on diageneetilised tingimused omaduste formeerumisele erinevad meie poolt vaadeldavast alast. Pärnus mõjutasid omaduste formeerumist liiva kaal ja pikaajalised hüdrodünaamilised mõjutused. Antud alal on savi mõjutanud pinnase ülal osas toimuvad temperatuuri muutused. Saadud vajumid 5 cm on seotud kahe tugevama kihi OCR ülehindamisega ja kasutatud C_r väärtustega, mis ongi „väikeste" vajumite põhjus.

Tervikuna arvestades kasutatud materjale on projektide lõpptulemused kasutatavad järgnevatel etappidel, kuid nad peavad tuginema kõikide kihtide tegelikel arvutusparameetritel.

Enne lõpliku projekti koostamist on vaja hinnata pinnaste mehhaanilised omadused kõikidele viirsavi kihtidele. Tuleb selgitada, millega on tegemist TK-40 juures. Kui on tegemist väga nõrga viirsavi erimiga on vaja määrata ta levikuala. Nõlva püsivuse hindamisel on vaja arvestada geotehnilise lõikega ja lihkepinnad peavad läbima kõige nõrgemaid erimeid nagu nad seda teevad looduses.

Lugupidamisega,

PhD Mait Mets

OÜ Geoengineering juhataja

+372 5019567