



TAL TECH

LÕPPARUANNE

Pakri poolsaarele rajatava vesisalvest alumiste reservuaaride ehitamise käigus välja kaevandatavate gneisside teedehituses kasutamise tehnilise teostatavuse ning majandusliku ja sotsiaalmajandusliku mõju hindamine

Tellija – Energiasalv Valdus OÜ

Täitjad: TalTech Ehituse ja arhitektuuri instituut, Ärikorralduse instituut, Geoloogia instituut, Ettevõtlusosakond

Aruande koostajad

- Karli Kontson
- Kristjan Lill
- Sven Sillamäe
- Ain Kendra
- Margus Evert
- Sirje Soop
- Sirje Ilona Pädam
- Üllas Ehrlich
- Anu-Mai Levo
- Sander Kanter

Lõpparuanne anti üle Tellijale digitaalkujul 29. oktoobril 2024. a

Tallinna Tehnikaülikool

Telefon: 620 2002

E-post: info@taltech.ee

Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö majandusanalüüsi eesmärk on võrrelda gneissidest valmistatud killustiku kasutamise tasuvust tee ehitamisel ja remondil lubjakivikillustiku ja imporditava graniitkillustiku asemel. Lähtudes tulemustest saab järeldada, et gneisskillustiku kasutuselevõtt loob pikaajalist väärtust.

Tänane otsus võtta kasutusele gneisskillustik Eesti I-IV klassi riigimaanteede renoveerimisel võimaldaks uuringus vaadeldud stsenaariumite lõikes viia alla teede renoveerimise kulusid 40 protsendi võrra 21 aasta pärast. See hoiaks kokku riigi eelarve kulutusi ja parandaks Eesti ressursitootlikkust materjalikulu vähendamise kaudu, kontrastina viimase 10 aasta trendile, mille jooksul ressursitootlikkus on paranenud peamiselt sisemajanduse koguprodukti (SKP) kasvu läbi.

Uuringus vaadeldud stsenaariumite lõikes oleks gneisskillustiku kasutuselevõtu hinnaks aastane renoveerimiskulude 2-3 protsendiline tõus esimese 20 aasta jooksul. Samas võimaldaks lubjakivikillustiku asendamine gneisskillustikuga kohe esimesel gneisskillustiku kasutuselevõtu aastal vähendada teede ehituse ja renoveerimise seotud CO₂-e emissioone ning vähendada 50 aasta jooksul oluliselt materjalikulu.

Käesoleva uuringu aruande Lisas 7 on käsitletud ka stsenaariume, mille korral lubjakivikillustiku hinnaks on valitud 10 €/t ja gneisskillustiku hind on jäetud varasemalt analüüsis kasutatud hinnatasemele 17 €/t. Gneisskillustiku kasutuselevõtu hinnaks teeklassides kokku oleks aastane renoveerimiskulude 13 protsendiline tõus esimese 20 aasta jooksul. Alates 21. aastast on iga-aastane kulu 36-37 protsenti madalam, kui tee remontimisel on katendi konstruktsioonis kasutatud gneisskillustikku.

Lubjakivikillustiku asendamine gneisskillustikuga vähendab Eesti teedeehituse 50 aasta materjalivajadust üle 40 protsendi ehk 52 miljoni tonni võrra, sest gneiss on vastupidavam kui lubjakivi. See toetab otseselt riigi ehitusmaavarade varustuskindlust, sest Eesti ehituslubjakivi ja -dolokivi kaevandamise aastane maht on perioodil 2012-2023 olnud keskmiselt 2292 tuhat m³ (ehk ligikaudu 5,7 miljonit tonni). Praeguse vajaduse jätkudes on 50 aasta jooksul tarvis ligikaudu 97 miljonit tonni kõrgemargilist lubjakivikillustikku mille tootmiseks on vaja kaevandada üle 50 miljoni tonni lubjakivi.

Lubjakivikillustike asendamisel gneisskillustikega kaasneks teede ehituse ja renoveerimise otseste ja kaudsete väliskulude vähenemine. Lisaks gneisskillustiku väiksematele otsestele väliskuludele võrreldes lubjakivikillustikuga ja graniitkillustikuga, pidurdub gneisskillustiku kasutuselevõtul lubjakivikarjäärade pindala suurenemine 50 a jooksul rohkem kui 400 hektari võrra.

Järgmise 50 aasta jooksul on kõrgemargilise lubjakivikillustiku ja imporditava graniitkillustiku kasutamisel CO₂-e emissioon vähemalt 2,2 miljonit tonni, mis gneissidest valmistatud killustiku puhul väheneb 30 tuhande tonnini.

Kõik väliskulud kokku väheneksid 50-aastase perioodi jooksul üle 2 miljardi euro. Sellest materjalide CO₂ emissioonidega seotud otsene väliskulu väheneb ligikaudu 500 miljonit eurot.

Uuringus on tehtud kokkuvõtte varasematest teede aluste ja asfaldist kulumiskihtide eluigasid käsitlevatest uuringutest. Täiendavalt teostati laboratoorseid katsetusi, et võrrelda Paldiski gneissi omadusi kohaliku päritolu lubjakivikillustikega ning ühe Põhjamaadest imporditava gneissiga. Laboratoorsed katsed näitasid, et Paldiski gneissil on ca 5-6 korda parem vastupidavus mehaanilisele kulutamisele võrreldes lubjakivikillustikuga.

Uuringu tulemuste põhjal leiti, et gneissist killustik tee ekspluatatsioonis ei purune, mistõttu saab eeldada, et Paldiski gneissist rajatud teede aluste eluiga on vähemalt 50 aastat. Paldiski gneissi omadused võimaldavad asendada kogu Eestisse teedeehituse jaoks imporditava killustiku.

SISUKORD

Kokkuvõte.....	3
Sissejuhatus.....	7
Gneisskillustiku kasutusele-võtu majandusanalüüs	8
Analüüsi lähtekohad.....	8
Gneisskillustiku kasutuselevõtu majanduslik mõju teede ehitamisele.....	12
Gneisskillustiku kasutuselevõtu majanduslik mõju teede remondile.....	18
Ressursitootlikkuse muutus	23
Gneisskillustiku kasutuselevõtuga seotud väliskulude analüüs.....	26
Materjalidega seotud otsesed väliskulud	26
Teede ehitamise ja renoveerimise stsenaariumide väliskulu	31
Materjalidega seotud kaudsed väliskulud	41
Lubjakivikaevanduste laienemisega seotud väliskulud.	41
Eesti elanike maksevalmidus lubjakivikarjäärade laienemise peatumise eest.....	45
Kokkuvõtte graniidist, lubjakivist ja gneissidest valmistatud killustikega seotud väliskuludest.....	52
Kaudsete väliskulude arvestamine teede remondil, tundlikkuse analüüs	58
Majandusanalüüsi lühikokkuvõtte	63
Kivimi omaduste mõju teede aluste elueale	66
Paekivikillustiku vastupidavus teekonstruktsioonis	73
Killustike pinge-tugevuse sõltuvused.....	77
Püsiva deformatsiooni näitajad (shakedown piirid).....	83
Kolmetelgsete katsete kokkuvõtte	86
Katsed güraatoriga	86
Kokkuvõtte	97
Kivimi omaduste mõju asfaltkatete elueale	99
Rootsi kulumismudel.....	104
Tee konstruktsioonide valiku alused	106
Valitud teekonstruktsioonide stsenaariumid	108
Asfaldist katendikihtide eluiga	110
Seaduste, määruste ja standardite muutmise vajadus	113
Teekonstruktsioonide eluiga.....	113
Nõuded alustes kasutatavatele täitematerjalidele	114
Nõuded asfaltsegudes kasutatavatele täitematerjalidele	115
Paldiski materjali omaduste võrdlus Eestis, Lätis ja Leedus kehtivate nõuetega.....	117

Uuringu tulemuste laiendamine teistele avalikele teedele	119
Kokkuvõte	120
Viidatud allikate loetelu	122
Lisa 1. Tarkvaraliides	126
Lisa 2. Tampere Ülikooli katsete tulemuste kokkuvõte	127
Lisa 3. Koondtabel Baltimaades kehtivate nõuete kohta	128
Lisa 4. Hinnang tee kasutaja ajakulule	129
Lisa 5. Hinnang teede konstruktsioonides kasutatavate killustike vajadusele hindamisperioodi jooksul	133
Lisa 6. Töö tulemuste laiendamine teistele avalikult kasutatavatele teedele	134
Lisa 7. Paekivikillustiku hinna tundlikkuse analüüs.....	136

SISSEJUHATUS

Energiasalv Pakri OÜ eestvedamisel rajatakse Paldiskisse ca 500 MW võimsuse ja 6 GWh salvestusmahuga vesisalvesti, mille ehitamisega võetakse Eestis kasutusele uus loodusvara – kristalliinne aluskorra kivim gneiss. Vesisalvesti ehitusega üle jäävat materjali soovitakse kasutada Eesti teedehituses seni imporditavate täitematerjalide ning kohalikku päritolu täitematerjalide asendamiseks. Vesisalvesti ehitamisega kaasneks ca 15 miljonit tonni /5 miljonit kuupmeetri gneissi kaevandamine perioodil 2026-2031.

Energiasalv Valdus OÜ ja Tallinna Tehnikaülikool sõlmisid 19.12.2023 töövõtulepingu uuringu „Pakri poolsaarele rajatava vesisalvesti alumiste reservuaaride ehitamise käigus välja kaevandatavate gneisside teedehituses kasutamise tehnilise teostatavuse ning majandusliku ja sotsiaalmajandusliku mõju hindamine“ läbiviimiseks.

Sotsiaalmajanduslikus analüüsis käsitletakse gneisskillustiku kasutuselevõtu majanduslikku mõju, keskendudes eelkõige teedehitusele ja remondile. Esmalt analüüsitakse gneisskillustiku kasutuselevõtu majanduslikke aspekte ja selle mõju olemasolevate teede remonditöödele, sealhulgas ressursitootlikkuse muutusele. Seejärel uuritakse gneisskillustiku kasutuselevõtuga kaasnevaid otseseid ja kaudseid väliskulusid, sh teedehituse ja renoveerimise erinevate stsenaariumide raames. Lisaks võrreldakse lubjakivikaevanduste laienemisest tulenevaid väliskulusid ning elanike maksevalmidust peatada lubjakivikarjäärade laienemine. Aruanne lõpeb kokkuvõttega graniidist, lubjakivist ja gneissist valmistatud killustiku väliskuludest ning kaudsete väliskulude arvestamisest teede remonditöödel, sisaldades ka tundlikkuse analüüsi.

Aruandes on käsitletud täitematerjalide omaduste mõju hindamist teede aluste ja kulumiskihtide elueale. Aruandes on võetud kokku varasemate aluste eluiga käsitlevate uuringute järeldused ning erinevate killustikega teostatud katsete tulemused, mis saadi Tampere Ülikooli geotehnika laboratooriumis ja Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis. Lisaks on aruandes tutvustatud arvutuslikke teekonstruktsioone ja kulumiskihtide eluigasid I kuni IV klassi teedele.

GNEISSKILLUSTIKU KASUTUSELEVÕTU MAJANDUSANALÜÜS

Käesolevas peatükis esitatakse lähteülesande punktid 4.1 ja 4.6:

- Lubjakivi asemel gneissist valmistatud ehituskillustiku kasutamise majanduslik mõju teede ehitamisele ja renoveerimisele;
- Lubjakivikillustiku asendamisega kaasnev ressursitootlikkuse muutus.

Esitatud teedehituse ja -renoveerimise analüüs lähtub peatükis „Tee konstruktsioonide valiku alused“ esitatud teede klassifikatsioonist, valitud katendikonstruktsioonidest ja asfaldi eluea arvutustest. Kasutatud on samu stsenaariume, kus neid on detailsemat kirjeldatud, vt. peatükk „Tee konstruktsioonide valiku alused“.

Ülevaatlikkuse huvides esitame käesoleva peatüki põhitekstis analüüsi tulemused kontsentreeritud kujul, mis võimaldab erinevate teeklasside lõikes praegu kasutatavate materjalide: graniitkillustiku ja lubjakivikillustiku stsenaariume võrrelda stsenaariumidega, millede praegu kasutatavad materjalid on asendatud gneissist valmistatud killustikuga.

ANALÜÜSI LÄHTEKOHAD

Majandusanalüüsi sisendina kasutatakse eelnevalt esitatud katendikonstruktsiooni arvutusi. Majandusliku mõju väljaselgitamisel toetub analüüs Euroopa Liidu majandusanalüüsi metoodikale. Metoodika alusmaterjalid on esitatud Euroopa Liidu aruannetes [1] ja [2]. Tihtipeale kasutatakse metoodikat uue tee või raudtee ehitamise (projekti) tasuvuse väljaselgitamiseks, võrreldes sealjuures ehituse mõjusid olukorraga, kui projekti ei teostata. Käesolevas analüüsis võrreldakse gneissist valmistatud ehituskillustiku kasutamist teede ehitamisel ja remondil praegu kasutatava lubjakivikillustiku ja graniitkillustikuga. Kui tavapärasel teede ehitamise analüüsis on ajakulu vähenemisel oluline mõju, siis käesolevas analüüsis ajakulu vähenemine analüüsi sisendina puudub, sest analüüs ei keskendu liiklusvoogudele, vaid tee ehitusele ja remondile. Võrreldavate stsenaariumide erinevus seisneb killustiku valikus. Projekti saab defineerida kui gneissidest valmistatud killustiku kasutamist tee ehitamisel ja remondil lubjakivikillustiku ja imporditava graniitkillustiku asemel.

Analüüs lähtub peatüki „Tee konstruktsioonide valiku alused“ eeldustest ja hõlmab riigimaanteid, mille liiklussagedus on üle 500 auto ööpäevas. Tee klasside kilometraažid on näidatud tabelis „Arvutatavad riigimaanteed klassid ja pikkused“. Igas teeklassis eeldatakse sarnaselt katendiarvutusele, et aluspinnad A (kerge saviliiv) ja D (liivsavi) jagunevad võrdselt (50%+50%). Uue tee ehitamise analüüs vaatleb materjali kulu, lähtudes valitud katendikonstruktsioonidest. Arvutustes kasutatakse 32 erinevat konstruktsiooni (vt. ptk. Valitud teekonstruktsioonide stsenaariumid). Allolevas tabelis

(1.1) tuuakse välja kahe valitud konstruktsiooni materjali kihid, mida kasutatakse ehitamise maksumuse leidmisel aluspinna A näitel.

Tabel 1.1. Katendi konstruktsiooni ehitamiseks kuluv materjal aluspinnale A, paekivikillustiku ja gneisskillustiku korral, konstruktsiooni kihid sentimeetrites

Tee klass	Traditsiooniline PAAS				Traditsiooniline Gneiss			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Konstruktsioon	V5	V1	V1	V1	V1	V1	V1	V1
SMA	4				4			
AC surf/bin	4	5	5	4	5	5	5	4
AC base	8	10	10	8	10	10	10	8
Graniit	15	15						
Gneiss					30	40	30	24
E280 (paas LA30)	24	25	15					
E240 (paas LA35)			16	27				
Liiv Tm:105 (uMSa)	75	30	28	30	25	30	28	27
Liiv Tm_90 (uFSa)					38			
Kokku, sentimeetrid	130	85	74	69	112	85	73	63

Uue tee elutsükkel on võimalik eristada kolme põhilist etappi: ehitamine, ülemise asfaltkihi vahetamine ja tee renoveerimine iga 20. või 25. aasta järel. Renoveerimise maksumuse leidmiseks on vaja lähtuda asfaltkatte ja katendi aluses olevate killustike vastupidavusest. Traditsioonilise stsenaariumiga teekatendi elueaks on võetud 20 aastat, mis tähendab, et asfaltkatend on vaja välja vahetada peale 20-ndat aastat. Empiirilised kogemused ja aruandes esitatud katsetulemused näitavad, et paekivikillustiku niiskusetundlikkus, eriti koos libedusetõrje soolas (NaCl) leiduva klooriga, on põhjuseks, et asfaltkatte vahetuse käigus tuleb asendada ka katendi aluses olev lubjakivikillustik. Valitud konstruktsioonides on kõrgemate teeklasside puhul kasutusel graniitkillustik koos paekivikillustikuga, ning see tingib kõikide killustikukihtide asendamise iga 20. või 25. aasta järel. Muldkeha liiva pole seevastu vaja asendada. Kui katendi killustikukihtid sisaldavad ainult tardkivimi killustiku, on Põhjamaade kogemustest lähtudes katendi aluskihtide eluiga vähemalt 50 aastat.

Eelnimetatud tingimused tähendavad, et renoveerimine nõuab tunduvalt suuremaid töid paekivikillustiku katendi elutsükli puhul, võrreldes gneisskillustikuga konstrueeritud katendi puhul. Järgmine tabel (tabel 1.2.) näitab kahe konstruktsiooni kihte, mida on kasutatud renoveerimise maksumuse leidmisel (samad konstruktsioonid nagu eelmises tabelis).

Tabel 1.2. Katendi konstruktsiooni renoveerimiseks kuluv materjal aluspinnale A, paekivikillustiku ja gneisskillustiku korral, konstruktsiooni kihid sentimeetrites

Tee klass	Traditsiooniline PAAS				Traditsiooniline Gneiss			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Konstruktsioon	V5	V1	V1	V1	V1	V1	V1	V1
SMA	4				4			
AC surf/bin	4	5	5	4	5	5	5	4
AC base	8	10	10	8	10	10	10	8
Graniit	15	15						
Gneiss								
E280 (paas LA30)	24	25	15					
E240 (paas LA35)			16	27				
Liiv Tm:105 (uMSa)								
Liiv Tm_90 (uFSa)								
Kokku, sentimeetrid	55	55	46	39	19	15	15	12

Eeldatavalt on võimalik Paldiski gneissmaterjali hakata kasutama 2026. aasta lõpus. Analüüsi käigus esitatakse uue tee ehitamise elutsükli kulu ja ka olemasolevate teede remondikulu, eeldades, et senise lubjakivi- ja graniitkillustiku asemel on võimalik kasutada gneissist valmistatud killustikku asfaldi ja katendi aluskihtides.

Allolevas tabelis (tabel 1.3.) esitatakse analüüsi sisendina kasutatud killustike hindasid.¹ Tonni hinnad kajastavad tootja või sadama tarnija poolt esitatud killustiku hinda. Materjalide kulud on väljendatud 2023 aasta hindades ja eeldatud on, et gneisskillustiku tonni hind võrdub kõrgemargilise paekivikillustiku hinnaga.

Tabel 1.3. Killustiku ühikhinnad euro/tonn, 2023.a hindades.

Materjal	Lühend	Killustiku hind €/tonn
Graniitkillustik	G280	25
Gneisskillustik	G280	17
Paekivikillustik (kõrgemargiline)	E280 LA30	17*

Märkus: *- Aruande lisa 7 on esitatud hinnatundlikkuse analüüs, võttes aluseks lubjakivikillustiku hinnas 10 €/t.

Majandusanalüüsis on kasutusel materjalide ühikhindu, mis sisaldavad keskmist transporti ja paigaldust, ja need on esitatud taandatuna €/m³. Järgmises tabelis (tabel 1.4.) on esitatud kasutatud materjali hinnad kuupmeetrites koos transporti ja paigaldusega.

¹ Aruande lisana esitatakse excel tarkvaraliides, milles on võimalik hindasid muuta.

Tabel 1.4. Katendi kihtide ühikhinnad 2023.a hindades, euro/m³.

Materjal	Lühend	Hind €/ m ³
Asfalt (graniitkillustikuga TAU)	SMA	231
Asfalt (gneisskillustikuga)	SMA	223
Asfalt (graniitkillustikuga Inkoo)	AC Surf/Bin	183
Asfalt (gneisskillustikuga)	AC Surf/Bin	187
Asfalt (paekivikillustikuga)	AC Base	124
Graniit	G280	77
Gneiss	G280	54
Paekillustik (kõrgemargiline)	E280 LA30	47
Paekillustik	E240 LA35	39
Möödukalt ühtlaseteraline keskliiv	E105	20
Möödukalt ühtlaseteraline peenliiv	E190	18

Analüüsi tulemused esitatakse stsenaariumide kaupa. Katendikonstruktsioonides ja asfaldis oleva killustiku põhjal on defineeritud kuus erinevat varianti, vt tabel 1.5.

Tabel 1.5. Stsenaariumid ja stsenaariumide variandid.

Stsenaarium	Variandi lühend	Variandi kirjeldus*
Traditsiooniline	Trad_PAAS	Katendi konstruktsioon lähtub KAP-ist. Tänaused materjalid (lubjakivikillustik ja graniitkillustik) on kasutusel tee katendis nii asfaldis kui aluskihtides.
Traditsiooniline	Trad_Gneiss1	Katendi konstruktsioon lähtub KAP-ist. Gneisskillustik on kasutusel tee katendi aluskihtides ja asfaldi graniitkillustik on asendatud gneisskillustikuga.
Traditsiooniline	Trad_Gneiss2	Katendi konstruktsioon lähtub KAP-ist. Gneisskillustik on kasutusel katendi aluskihtides. Tänaused materjalid asfaldis.
Rootsi	Rootsi_PAAS	Katendi konstruktsioon lähtub Rootsi põhimõttest (50 cm killustikku katendi aluses). Tänaused materjalid (lubjakivi- ja graniitkillustik) on kasutusel katendis.
Rootsi	Rootsi_Gneiss1	Katendi konstruktsioon lähtub Rootsi põhimõttest. Gneisskillustik on kasutusel tee katendi aluskihtides ja asfaldi graniitkillustik on asendatud gneisskillustikuga.
Rootsi	Rootsi_Gneiss2	Katendi konstruktsioon lähtub Rootsi põhimõttest. Gneiss killustik on kasutusel katendi aluskihtides. Tänaused materjalid asfaldis.

*Lühend KAP tähistab katendite arvutusprogrammi, mis on leitav Transpordiameti „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend“-is.

Arvestades, et gneisskillustiku kasutuselevõtu kulud tekivad erinevatel aastatel, on tee ehitamine ja remont vaja jaotada etappideks. Kulud esitatakse etappide kaupa ja summeeritakse. Selleks, et võrrelda mõjusid, mis tekivad erinevatel aastatel on kulud

ajaldatud ka ühtsesse väärtusesse. Ajaldamisel kasutatakse kolmeprotsendilist sotsiaalset diskontotegurit, mida soovitatakse juhul, kui liikmesriigil puudub riigipõhine sotsiaalne diskontomäär. Hindamisperioodiks on valitud 50 aastat, lähtudes Rootsi skeemi kahest remonditsüklist. Valitud 50 aastat tingib selle, et tavalahendi 20 aasta remonditsükli puhul lisatakse 10 aasta jääkväärtus ajaldatud hindamisperioodi lõppu. Täheldada võib, et 50 aastane hindamisperiood on pikem kui Eesti teede projektne eluiga üldiselt, aga valik on kooskõlas EL-i soovitustega. Näiteks infrastruktuuri investeeeringutel, kus kasutatakse finantsallikana CEF (Connecting Europe Facility) fondi, on võimalik maksimaalselt 50 aasta pikkune hindamisperiood.²

GNEISSKILLUSTIKU KASUTUSELEVÕTU MAJANDUSLIK MÕJU TEEDE EHITAMISELE

Riikliku teede väljaehitamise kava puudumisel³ lähtub uue tee ehitamise analüüs 1 kilomeetri pikkusest teeühikust kõigi nelja käsitletud teeklassi puhul. Vajadusel saab teeühikut korrutada analüüsitava teelõigu pikkusega. Mõjude hindamisel eeldatakse, et uus tee võetakse kasutusele aastal 2028 ja et ehitamine toimub aastal 2027.

UUE TEE EHITAMINE

Tee ehitamisel kasutatakse teekonstruktsiooni aluskihtides kas gneisskillustikku või lubjakivikillustikku ja graniitkillustikku järgmiste tee katendikonstruktsiooni arvutuste põhjal (vt. ptk. Tee konstruktsioonide valiku alused):

- Traditsiooniline teekonstruktsioon (aluspinnase grupid V1, V2 ja V5);
- Rootsi põhimõttel teekonstruktsioon (aluspinnase grupid V3 ja V4).

Ekspluatatsioon (50 aastat)

- Ekspluatatsioon arvestatakse Rootsi teekonstruktsiooni kahe remonditsükli ulatuses 25+25 (2028-2052 ja 2053-2077) või 20+20+10 (2028-2047, 2048-2067 ja 2068-2077 (pluss jääkväärtus)).

Tee remont

- Kõikide asfaltkihtide välja vahetamine toimub asfaldi eluea lõpus (ka aluskihtides olev lubjakivikillustik on vaja välja vahetada);
 - Traditsiooniline teekonstruktsioon (aluspinnase grupid V1, V2 ja V5): 20-ndal aastal

² Vt. näiteks CBA full cash-flow template (Transport call), https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/cef/temp-form/af/full-cba-cash-flow-template_cef-t_en.xlsx

³ Valitsuse poolt kinnitatud Teehoiukavas 2024-2027 puudub teeobjekte, mille ehitamise algusaasta on 2027, vt. <https://www.transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2024-02/Riigiteede%20teehoiukava%202024-2027.pdf>

- Rootsi põhimõttel teekonstruktsioon (aluspinnase grupid V3 ja V4): 25-ndal aastal.

Tulemused esitatakse tinglike aastate kaupa, kus esimene aasta tähistab ehitamist ja teine aasta ühe tee-kilomeetri kasutusele võtmise aastat. Järgmine tabel 1.6 näitab ühe tee-kilomeetri kulusid eurodes 50-aastase tsükli jooksul. Nimetus PAAS tähistab katendit, kus tänased materjalid (lubjakivikillustik ja graniitkillustik) on kasutusel tee katendi aluskihtides ja asfaldis. Gneiss1 tähistab katendikonstruktsiooni, kus ülemistes asfaldikihtides olev graniitkillustik ja aluskihi killustik on asendatud gneisskillustikuga. Variandis Gneiss2 on asendatud katendi aluskihtides olev killustik gneisskillustikuga ja asfaldis on kasutusel tänaseid materjale. Kõik kulud on esitatud 2023. aasta hindades. Jääkväärtus tähistab 50. aasta lõpus olevat väärtust.

Tabel 1.6. Ühe kilomeetri tee ehitamine ja remont, kulu etappide kaupa teeklassi ja variandi lõikes, 2023. a. eurodes

Tee klass	Variant	Ehitamine	Remont +20	Remont +25	Remont +40	Jääkväärtus
I	Trad_PAAS*	1 636 868	1 203 068	0	1 203 068	-272 811
I	Trad_Gneiss1	1 520 408	690 640	0	690 640	-253 401
I	Trad_Gneiss2	1 554 318	724 550	0	724 550	-259 053
I	Rootsi_PAAS	1 592 901	0	1 428 361	0	0
I	Rootsi_Gneiss1	1 560 451	0	726 311	0	0
I	Rootsi_Gneiss2	1 595 461	0	761 321	0	0
II	Trad_PAAS	992 617	777 525	0	777 525	-165 436
II	Trad_Gneiss1	973 213	366 685	0	366 685	-162 202
II	Trad_Gneiss2	982 519	375 991	0	375 991	-163 753
II	Rootsi_PAAS	998 198	0	868 972	0	0
II	Rootsi_Gneiss1	997 107	0	383 231	0	0
II	Rootsi_Gneiss2	1 006 413	0	392 537	0	0
III	Trad_PAAS	585 329	455 735	0	455 735	-97 555
III	Trad_Gneiss1	630 393	285 331	0	285 331	-105 066
III	Trad_Gneiss2	637 209	292 167	0	292 167	-106 202
III	Rootsi_PAAS	606 184	0	541 341	0	0
III	Rootsi_Gneiss1	707 099	0	266 680	0	0
III	Rootsi_Gneiss2	713 344	0	272 925	0	0
IV	Trad_PAAS	392 862	300 456	0	300 456	-65 477
IV	Trad_Gneiss1	422 321	187 083	0	187 083	-70 387
IV	Trad_Gneiss2	427 301	192 063	0	192 063	-71 217
IV	Rootsi_PAAS	434 908	0	386 176	0	0
IV	Rootsi_Gneiss1	505 583	0	165 757	0	0
IV	Rootsi_Gneiss2	510 108	0	170 282	0	0

*Katendiarvutuse eeldatud hindade juures on otstarbekas kasutada aluspinnase gruppi V5. Sellest tingituna on 20. aastal vaja vahetada aluskihtides olev killustik.

Kasutud hindade juures on tee ehitamise kulu gneisskillustikku kasutades kõrgemates teeklassides väiksem kui tänaste materjalidega. Tee-klassis III ja IV on gneisskillustikuga ehitamise kulu suurem. Seevastu on kõikides teeklassides gneisskillustikuga ehitatud teede remondikulu 20. aastal ja 25. aastal madalam kui lubjakivikillustikuga ja graniitkillustikuga ehitatud tee puhul, kuna aluskihtide killustikku pole vaja välja vahetada.

Kokkuvõtvalt saab öelda, et gneisskillustiku kasutuselevõtt katendikonstruktsioonis tasub ennast ära. Peamine kokkuvõtte gneisskillustiku puhul on seotud tunduvalt madaldate renoveerimiskuludega (40-50 protsenti).

ASFALTKATTE ÜLEMISE KIHVI VÄLJAVAHETAMINE

Iga 20 või 25 aasta järel toimuvale teeremondile on tasuvusarvutustes vaja lisada ka asfaltkatte ülemise kihi väljavahetamise kulu. Ülemise asfaltkihi vahetamine sõltub tee klassist, sõiduradade arvust ning aluse ja asfaldi täitematerjalist. Peatükis „Asfaldist katendikihtide eluiga“ esitati kulumiskihtide eluiga sõltuvalt tee klassist ja materjalist (traditsiooniline materjal ja Paldiski materjal). Kolmele kõrgemale teeklassile on vaja elutsükli kulule lisada ülemise asfaltkihi vahetamise kulud. Neljanda teeklassi ja osaliselt kolmanda teeklassi ülemise asfaltkihi arvestuslik eluiga on 25 aastat, mistõttu asfalt vahetatakse iga 20 või 25 aasta järel tehtava remondi käigus. Tänapäevase praktika kohaselt lisatakse graniitkillustik ülemise asfaldikihtide segusse (SMA, AC surf ja AC bin). Allolev tabel (tabel 1.7.) võtab kokku asfaltkatte ülemise kihi väljavahetamise väärtused.

Tabel 1.7. Asfaltkatte ülemise kihi väljavahetamise väärtused

Tee klass	Tänapäevased materjalid	Gneiss aluses ja gneiss asfaldi täitematerjal	Gneiss aluses ja graniitkillustik asfaldi täitematerjal
I**	8 aastat	8 aastat	12 aastat
II***	8/11 aastat*	11/16 aastat*	11/16 aastat*
III	15 aastat	25 aastat	22 aastat
IV	25 aastat	25 aastat	25 aastat

*Arvutused lähtuvad eluea keskmisest. **Arvutustes eeldatakse, et 50% katte pindalast vahetatakse välja ***Eeldatakse, et 10 ja 13 aasta jooksul on keskmiselt 67% katte pindalast välja vahetatud.

Nagu eelnevalt kirjeldatud, on arvestatud elueast sõltuvalt vaja esimese teeklassi teedel 50 protsenti pindalast, teise teeklassi teedel 67 protsenti (1/3+1/3) pindalast ja kolmanda teeklassi teedel kogu pindala välja vahetada. Järgmises tabelis (tabel 1.8.) on esitatud ülemise asfaltkihi väljavahetamise kulu kolmele kõrgemale teeklassile variantide lõikes.

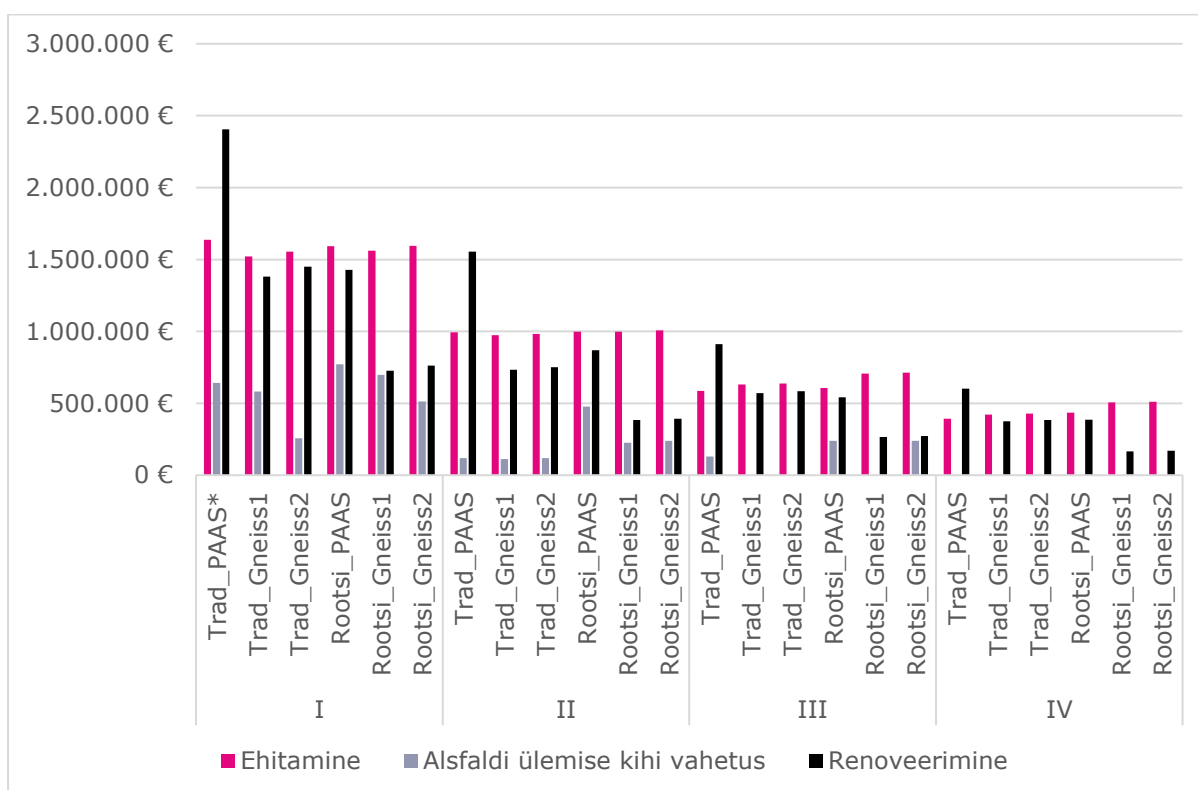
Tabel 1.8. Ülemise asfaltkihi väljavahetamise kulu tee-klassi ja variandi lõikes (tee-klassidel, millele tuleb kulumiskiht asendada remondivahelistel aastatel), eurodes, 2023. a. hindades

Stsenaarium	Variant	Tee klass		
		I	II	III
Traditsiooniline	Trad_PAAS	128 369	119 117	119 909
Traditsiooniline	Trad_Gneiss1	116 351	112 913	-

Traditsiooniline	Trad_Gneiss2	128 369	119 117	-
Rootsi	Rootsi_PAAS	128 369	119 117	119 909
Rootsi	Rootsi_Gneiss1	116 351	112 913	-
Rootsi	Rootsi_Gneiss2	128 369	119 117	119 909

ELUTSÜKLI KULU

Uue tee elutsükkel on võimalik eristada kolme põhilist etappi: ehitamine, ülemise asfaltkihi vahetamine ja iga 20. või 25. aasta järgnerenoveerimine. Eelmistes tabelites (tabelid 1.6, 1.7 ja 1.8) esitatud tulemusi kasutatakse selleks, et näidata kulusid elutsükli etappide kaupa. Allolev joonis võtab kokku stsenaariumide variantide elutsükli kulud etappide ja teeklasside kaupa (joonis 1.1.) .



Joonis 1.1. Tee kilomeetri elutsükli kulud etappide kaupa 50 aasta jooksul, eurodes 2023. aasta hindades

Esimese teeklassi puhul on näha, et traditsioonilise stsenaariumi remondikulude summa 50 aasta jooksul ületab ehituskulu, kui katendi aluskihtides on kasutusel tänaseid materjale (graniitkillustik ja paekivikillustik). Gneisskillustiku kasutuselevõtt katendi aluskihtides muudab traditsioonilise stsenaariumi ehituskulu ja remondikulu omavahelist suhet. Eriti ilmne on see Rootsi stsenaariumi katendikonstruktsioonidel, sest remondikulu esineb ühekordselt 50-aastase hindamiseperioodi jooksul.

Elutsükli kulude summa 50 aasta jooksul on gneisskillustikuga variantidel tee klassides I, II ja III umbes 25-30 protsenti madalam võrreldes traditsiooniliste materjalidega. Tee-klassis IV on gneisskillustikuga variantide maksumus umbes 20 protsenti madalam. Joonisel toodud kulud esitatakse täiendatavalt allolevas tabelis (tabel 1.9.).

Tabel 1.9. Tee kilomeetri elutsükli kulu etappide kaupa 50 aasta jooksul, eurodes 2023. aasta hindades

Tee klass	Variant	Ehitamine	Asfaldi ülemise kihi vahetus	Renoveerimine	Kokku
I	Trad_PAAS	1 636 868	641 844	2 406 136	4 684 846
I	Trad_Gneiss1	1 520 408	581 756	1 381 280	3 523 488
I	Trad_Gneiss2	1 554 318	256 738	1 449 100	3 301 299
I	Rootsi_PAAS	1 592 901	770 213	1 428 361	3 835 441
I	Rootsi_Gneiss1	1 560 451	698 108	726 311	2 944 826
I	Rootsi_Gneiss2	1 595 461	513 475	761 321	2 829 114
II	Trad_PAAS	992 617	119 117	1 555 050	2 785 901
II	Trad_Gneiss1	973 213	112 913	733 370	1 932 409
II	Trad_Gneiss2	982 519	119 117	751 982	1 972 735
II	Rootsi_PAAS	998 198	476 467	868 972	2 637 382
II	Rootsi_Gneiss1	997 107	225 826	383 231	2 078 445
II	Rootsi_Gneiss2	1 006 413	238 234	392 537	1 912 425
III	Trad_PAAS	585 329	130 867	911 470	1 758 533
III	Trad_Gneiss1	630 393		570 662	1 201 056
III	Trad_Gneiss2	637 209		584 334	1 221 544
III	Rootsi_PAAS	606 184	239 818	541 341	1 387 343
III	Rootsi_Gneiss1	707 099		266 680	973 779
III	Rootsi_Gneiss2	713 344	239 818	272 925	1 226 087
IV	Trad_PAAS	392 862		600 912	993 773
IV	Trad_Gneiss1	422 321		374 166	796 487
IV	Trad_Gneiss2	427 301		384 126	811 427
IV	Rootsi_PAAS	434 908		386 176	821 084
IV	Rootsi_Gneiss1	505 583		165 757	671 339
IV	Rootsi_Gneiss2	510 108		170 282	680 389

Täpne võrdlus katendiga, milles lubjakivikillustik ja graniitkillustik on asendatud gneisskillustikuga, eeldab hindamisperioodi kulude perioodiseerimist ja ajaldamist. Seepärast on stsenaariumide elutsükli kulud kantud vastavale aastale ja ajaldatud tee ehitamise aastasse (3-protsendilise diskontoteguriga) ning kokku liidetud. Ajaldamine tähendab, et tulevikus tekkiv kulu diskonteeritakse tänasesse päeva, sest tulevase kulu väärtus on väiksem kui tänane kulu. Järgmine tabel (tabel 1.10.) näitab ajaldatud kulude summa (nüüdispuhasväärtus) stsenaariumide variantide ja teeklasside kaupa.

Tabel 1.10. Tee kilomeetri elutsükli kulu 50-aastase hindamisperioodi jooksul, nüüdispuhasväärtus, 2023. a. hindades, euro

Tee klass ja stsenaarium	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000
Trad_PAAS	2 884 908	1 739 048	1 071 049	629 295
Trad_Gneiss1	2 316 349	1 359 518	845 427	562 980
Trad_Gneiss2	2 237 887	1 382 625	857 701	571 936
Rootsi_PAAS	2 605 947	1 622 900	967 613	613 976
Rootsi_Gneiss1	2 215 127	1 285 110	830 757	582 443
Rootsi_Gneiss2	2 168 235	1 304 792	929 673	589 066

Traditsioonilise stsenaariumi gneisskillustikuga variantide ajaldatud kulude summa (ehk nüüdispuhasväärtus) on umbes 20 protsenti madalam tee klassides I, II ja III. Tee klassis IV on gneisskillustikuga variantide nüüdispuhasväärtus umbes 10 protsenti madalam, võrreldes traditsioonilise stsenaariumi tänaste materjalidega ajaldatud kulude summaga. Gneisskillustiku kasutuselevõtu mõju on Rootsi stsenaariumis umbes viis protsendiühikult väiksem. Võrdlus tänaste materjalidega näidatakse täiendavalt absoluutarvudes allolevates tabelites. Esmalt esitatakse võrdlus konstruktsiooniga, kus on gneisskillustik nii katendi aluskihis kui asfaldi ülemistes kihtides (Gneiss1). Positiivne nüüdispuhasväärtus tähendab, et gneisskillustikku sisaldav katendikonstruktsioon on soodsam kui graniitkillustikust ja lubjakivikillustikust ehitatud katendikonstruktsioon. Arvutuste tulemuste baasil saab järeldada, et gneisskillustiku kasutamine on majanduslikult tasuv kõikides teeklassides. Gneisskillustiku sisaldava katendi elutsükli ajaldatud kulu on 5-28 protsenti soodsam kui traditsiooniliste materjalidega katend. Traditsioonilise teekonstruktsiooni stsenaariumi puhul on vahe suurem kui variantidel, millel teekonstruktsioon on projekteeritud Rootsi põhimõttel (Tabel 1.11.).

Tabel 1.11. Tee kilomeetri elutsükli kulu 50-aastase hindamisperioodi jooksul (Paas versus Gneiss1), nüüdispuhasväärtus 2023. aasta eurodes

Stsenaarium ja tee klass	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000
Traditsiooniline teekonstruktsioon	568 559	379 530	225 622	66 315
Protsentuaalne vahe	25%	28%	27%	12%
Rootsi põhimõttel teekonstruktsioon	390 820	337 790	136 856	31 533
Protsentuaalne vahe	15%	21%	14%	5%

Järgnevalt võrreldakse tänaste materjalidega katendikonstruktsiooni katendiga, kus on gneisskillustik katendi aluskihis ja tänased materjalid asfaldis (Gneiss2). Gneisskillustiku kasutamine katendi aluskihis tasub ennast ära nii traditsioonilise teekonstruktsiooni kui Rootsi põhimõttel projekteeritud tee puhul kõikides tee klassides, vt tabel 1.12.

Tabel 1.12. Tee-kilomeetri elutsükli kulu 50-aastase hindamisperioodi jooksul (Paas versus Gneiss2), nüüdispuhasväärtus 2023. aasta eurodes

Stsenaarium ja tee klass	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000
Traditsiooniline teekonstruktsioon	647 021	356 423	213 348	57 359
Protsentuaalne vahe	22%	20%	20%	9%
Rootsi põhimõttel teekonstruktsioon	437 712	318 108	37 940	24 910
Protsentuaalne vahe	17%	20%	4%	4%

Kokkuvõtvalt saab järeldada, et gneisskillustiku kasutuselevõtt uue tee ehitamisel annab tunduvalt madalama elutsükli kulu kui tänaste materjalidega ehitatud uus tee. Peamine kokkuhoid gneisskillustiku puhul on seotud madaldate renoveerimiskuludega.

GNEISSKILLUSTIKU KASUTUSELEVÕTU MAJANDUSLIK MÕJU TEEDE REMONDILE

Katendiarvutuste läbiviimisel on võetud aluseks Eesti teede võrgustik liiklussagedusega 500 või enam AKÖL-i. Kokku oli aastal 2023 selle liiklussagedusega võrgustiku pikkus umbes 5 900 kilomeetrit. Tee klasside kilometraažid on näidatud tabelis "Arvutatavad riigimaateede klassid ja pikkused", peatükis „Tee konstruktsioonide valiku alused“. Eeldades, et olemasolevaid teid on vaja remontida iga 20 aasta järel (s.t. vahetada kõik asfaltkatted ja kui kasutusel on lubjakivikillustik, ka aluskihid) võime eeldada, et järgmise 20 aasta jooksul on igal aastal vaja remontida 1/20 (ehk 5 protsenti) olemasolevatest teedest. Remondivahelistel perioodidel on kõrgematel teeklassidel vaja vahetada ka ülemine asfaltkiht. Arvestamaks ülemise asfaltkihi väljavahetamise kulu, on arvutatud, kui mitu välja esineb 50-aastase hindamisperioodi jooksul igal teeklassil ja variandil. Kui teeklassil on näiteks 5 välja 50 aasta jooksul, eeldatakse, et igal aastal vajab 10 protsenti olemasolevatest teedest antud teeklassis ülemise asfaltkihi väljavahetamist. Arvutused lähtuvad varem esitatud katendikonstruktsioonidest neljale teeklassile.

Arvutused on tehtud renoveerimisega seotud kihtide vahetamise vajadusele, sõltuvalt stsenaariumist, aluspinnast ja killustiku valikust. Kihtide vahetamise lähteandmed on esitatud kahel katendikonstruktsiooni näitel tabelis 1.1. „Katendi konstruktsiooni renoveerimisele kuluv materjal...“.

Algusaastal 2027 on traditsioonilise stsenaariumi puhul teede remontimisel võimalik valida kolme alternatiivi vahel: 1) traditsiooniline tee katend tänaste materjalidega aluskihtides ja asfaldis (Trad_Paas) või 2) traditsiooniline katend gneisskillustikuga ja asfaldi ülemistes kihtides gneisskillustik (Trad_Gneiss1) või 3) traditsiooniline aluskiht gneisskillustikuga ja tänased materjalid asfaldis (Trad_Gneiss2). Nende kolme valiku puhul on esimese 20 aasta jooksul iga-aastane maksumus tänaste materjalidega sarnasel tasemel, nagu alternatiividel, millede puhul kasutatakse gneisskillustiku. Võrreldes tänaste materjalidega on gneisskillustiku kulu (valikud 2 ja 3) kuni 10 protsenti madalam tee klassides I, II ja III ning umbes 10 protsenti suurem kui tänaste materjalidega kulu IV teeklassis. Variandis

1) vahetatakse välja asfalt ja aluse killustikukihid ning asendatakse tänaste materjalidega. Variantides 2) ja 3) vahetatakse välja asfalt ja aluskihtide killustik, asendades see gneisskillustikuga. Gneisskillustiku kasutuselevõtu hinnaks kõikides teeklassides oleks aastane renoveerimiskulude 2-3 protsendiline tõus esimese 20 aasta jooksul. Alates 21. aastast on iga-aastane kulu rohkem kui 40 protsenti madalam, kui tee remontimisel on katendi konstruktsioonis kasutatud gneisskillustikku (eeldab, et renoveerimisel on valitud alternatiiv 2 või 3). Olemasolevate teede iga-aastane remondikulu teeklasside kaupa erinevatel perioodidel on esitatud tabelis 1.13.

Tabel 1.13. Olemasolevate teede iga-aastane remondikulu teeklasside kaupa erinevatel perioodidel, remondi ja ülemise asfaldikihi vahetamise kulu teeklasside kaupa erinevatel perioodidel, Stsenarium Traditsiooniline tuhandetes eurodes 2023. aasta hindades

Alt.	Aasta	Variant	I klass 14500+	II klass 6000- 14500	III klass 3000- 6000	IV klass 500- 3000	Tee klassid kokku	Tee klassid kokku (%) muutus*
1	1-20	Trad_ PAAS	7 665	28 294	21 740	66 549	124 247	0%
2	1-20	Trad_ Gneiss1	7 174	27 468	19 216	72 895	126 753	2%
3	1-20	Trad_ Gneiss2	6 164	27 983	19 481	73 998	127 626	3%
1	21-50	Trad_ PAAS	7 665	28 294	21 740	66 549	124 247	0%
2	21-50	Trad_ Gneiss1	5 162	15 436	11 068	41 438	73 104	-41%
3	21-50	Trad_ Gneiss2	4 153	15 951	11 334	42 541	73 978	-40%

*Muutus võrdluses traditsioonilise stsenaariumi variandiga PAAS

Rootsi stsenaariumi puhul on kaks valikut⁴ 4) ja 5). Alternatiiv 4) tähistab Rootsi põhimõttel katendi konstruktsiooni gneisskillustikuga ja gneisskillustik asfaldi ülemistes kihtides (Rootsi_Gneiss1) ja alternatiiv 5) Rootsi põhimõttel aluskiht gneisskillustikuga ja tänased materjalid asfaldis (Rootsi_Gneiss2). Rootsi stsenaariumi alternatiivides 4) ja 5) vahetatakse välja asfalt ja asendatakse aluskihtide killustik 50 sentimeetrise gneisskillustikukihiga. Alternatiivis 4) asendatakse asfaldis olev graniit gneisskillustikuga. Alternatiivis 5) kasutatakse asfaldis tänaseid materjale. Paksema killustikukihiga tõttu on Rootsi stsenaariumid (alternatiivid 4 ja 5) kulukamad kui Traditsioonilise stsenaariumi alternatiivid esimese 20 aasta jooksul. Alates 21. aastast on Rootsi stsenaariumil iga-aastane kulu tunduvalt madalam alternatiivi 1 iga-aastasest kulus. Pikema eluea tõttu on aastatel 21-25 vaja vahetada ainult asfaldi ülemine kiht, vt tabel 1.14. Remondikulu, mis on seotud kogu asfaltkatte väljavahetamisega, tekib alles 26-ndal aastal ja keskmine aastane kulu aastatel 21-50 on 49-53 protsenti madalam kui alternatiivil 1.

⁴ Rootsi põhimõttel tänaste materjalidega variant on analüüsist välja jäetud, sest teisel remonditsüklil ei esine kulude kokkuhoidu võrreldes esimese variandiga.

Tabel 1.14. Olemasolevate teede iga-aastane remondikulu teeklasside kaupa, aastane remondikulu erinevatel perioodidel, Stsenarium Rootsi, tuhandetes eurodes 2023. aasta hindades

Alt.	Aasta	Variant	I klass 14500 +	II klass 6000- 14500	III klass 3000- 6000	IV klass 500-3000	Tee klassid kokku	Tee klassid kokku (%) muutus*
4	1-20	Rootsi_ Gneiss1	8 311	30 842	24 799	105 487	169 440	36%
5	1-20	Rootsi_ Gneiss2	8 224	31 357	28 762	106 490	174 833	41%
4	21-25	Rootsi_ Gneiss1	2 078	4 165	0	0	6 243	-53%
4	26-50	Rootsi_ Gneiss1	5 321	15 945	10 345	36 714	68 325	
5	21-25	Rootsi_ Gneiss2	1 834	4 394	3 721	0	9 949	-49%
5	26-50	Rootsi_ Gneiss2	5 234	16 460	14 308	37 716	73 718	

*Muutus võrdluses traditsioonilise stsenaariumi variandiga PAAS

Eelmised tabelid näitasid iga-aastaseid kulusid eeldusel, et igas teeklaasis korrastatakse igal aastal 5 protsenti teedevõrgust. Kuna madalama klassi teede kilomeetrite arv on tunduvalt suurem kõrgema klasside tee kilometraažist, domineerib IV klassi teede renoveerimise kulu. Tabelis 1.15. on toodud välja Traditsioonilise stsenaariumi tee renoveerimise kilomeetri kulu teeklasside kaupa.

Tabel 1.15. Olemasolevate teede iga-aastane remondikulu teeklasside kaupa erinevatel perioodidel, remondi ja ülemise asfaldikihi vahetamise kulu 1 km kohta. Stsenarium Traditsiooniline, euro 2023. aasta hindades

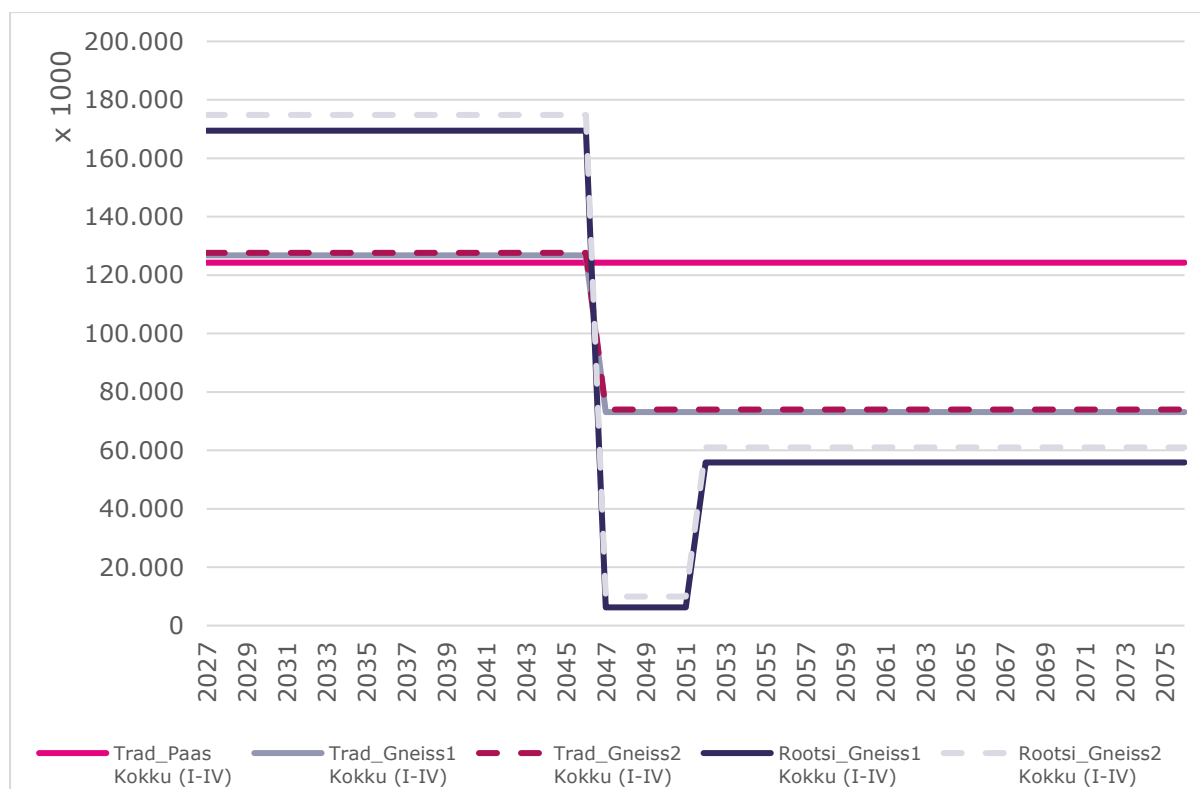
Alter- natiiv	Aasta	Variant	I klass 14500+	II klass 6000-14500	III klass 3000-6000	IV klass 500-3000
1	1-20	Trad_PAAS	1 716 542	920 465	560 429	300 456
2	1-20	Trad_Gneiss1	1 606 518	893 616	495 368	329 107
3	1-20	Trad_Gneiss2	1 380 414	910 367	502 184	334 087
1	21-50	Trad_PAAS	1 716 542	920 465	560 429	300 456
2	21-50	Trad_Gneiss1	1 156 045	502 181	285 331	187 083
3	21-50	Trad_Gneiss2	929 940	518 931	292 167	192 063

Gneisskillustikuga katendi kilomeetripõhine renoveerimise kulu on esimese 20 aasta jooksul madalam kui tänaste materjalide kulu teeklassides I, II ja III. Teeklassi IV renoveerimise kulu on gneisskillustiku puhul kõrgem aastatel 1-20. Hindamisperioodi teisel poolel, alates 21. aastast on kõikide analüüsitud teeklasside remondikulu madalam kui tänased materjalid on renoveerimise käigus asendatud gneisskillustikuga (33 kuni 49 protsenti madalam sõltuvalt teeklassist ja variandist). Sarnaselt eelnevale tabelile on Rootsi stsenaariumi kilomeetripõhised kulud toodud tabelisse 1.16. Rootsi-stsenaariumi paremus hindamisperioodi teisel poolel on Traditsioonilise stsenaariumiga võrreldes suurem, samas eeldab aga Rootsistsenaarium suuremaid kulutusi hindamisperioodi esimese 20 aasta jooksul, sest asendatakse aluses olevad tänased materjalid 50-sentimeetrise killustiku kihiga.

Tabel 1.16. Olemasolevate teede iga aastane remondikulu teeklasside kaupa erinevatel perioodidel, remondi ja ülemise asfaldikihi vahetamise kulu 1 km kohta. Stsenarium Rootsi, euro 2023. aasta hindades

Alter-natiiv	Aasta	Variant	I klass 14500+	II klass 6000-14500	III klass 3000-6000	IV klass 500-3000
4	1-20	Rootsi_Gneiss1	1 861 316	1 003 376	639 280	476 256
5	1-20	Rootsi_Gneiss2	1 841 701	1 020 127	741 452	480 782
4	21-25	Rootsi_Gneiss1	465 405	135 495	0	0
5	21-25	Rootsi_Gneiss2	410 780	142 940	95 927	0
4	26-50	Rootsi_Gneiss1	1 191 716	518 726	266 680	165 756
5	26-50	Rootsi_Gneiss2	1 172 101	535 477	368 852	170 282

Joonis 1.2. näitab, kuidas iga aastased teede võrgu korrastamise kulud (kokku renoveerimise ja ülemise asfaldikihi vahetamise kulud neljale tee klassile) jaotuvad 50 aasta jooksul, eeldades, et esimene renoveerimise aasta on 2027.



Joonis 1.2. Aastane teedevõrgu remondi ja ülemise asfaldikihi vahetamise kulu perioodil 2027-2076, tuhandetes eurodes 2023. aasta hindades

Joonisel on näha, et Traditsioonilise stsenaariumi gneisskillustikuga konstruktsioonide kulud on sarnasel tasemel nagu Traditsioonilise stsenaariumi tänaste materjalidega kulud. Alates 21. aastast muutub kulu selliselt, et gneisskillustikuga konstruktsioonid on tänaseid materjale kasutatavate konstruktsioonide kulust tunduvalt madalamad. Kui liita kokku olemasolevate teede renoveerimiskulud 50 aastase hindamiseperioodi jooksul, on gneisskillustikuga konstruktsiooni kogukulu madalam kui tänaste materjalidega

traditsiooniline stsenaarium. Tänapäevaste materjalide asendamine gneisskillustikuga toob endaga kaasa 20-30 protsendilise kulude kokkuhoiu Traditsioonilises stsenaariumis ja 10-30 protsendilise kokkuhoiu Rootsi stsenaariumis. Tabel 1.17. võtab kokku olemasolevate teede remondikulu 50-aastaselt hindamisperioodil.

Tabel 1.17. Olemasolevate teede remondikulu (renoveerimise ja asfaldi ülemise kihi asendamise kulu) 50-aastase hindamisperioodi jooksul, kulude summa teeklasside kaupa, miljon eurot 2023. aasta hindades

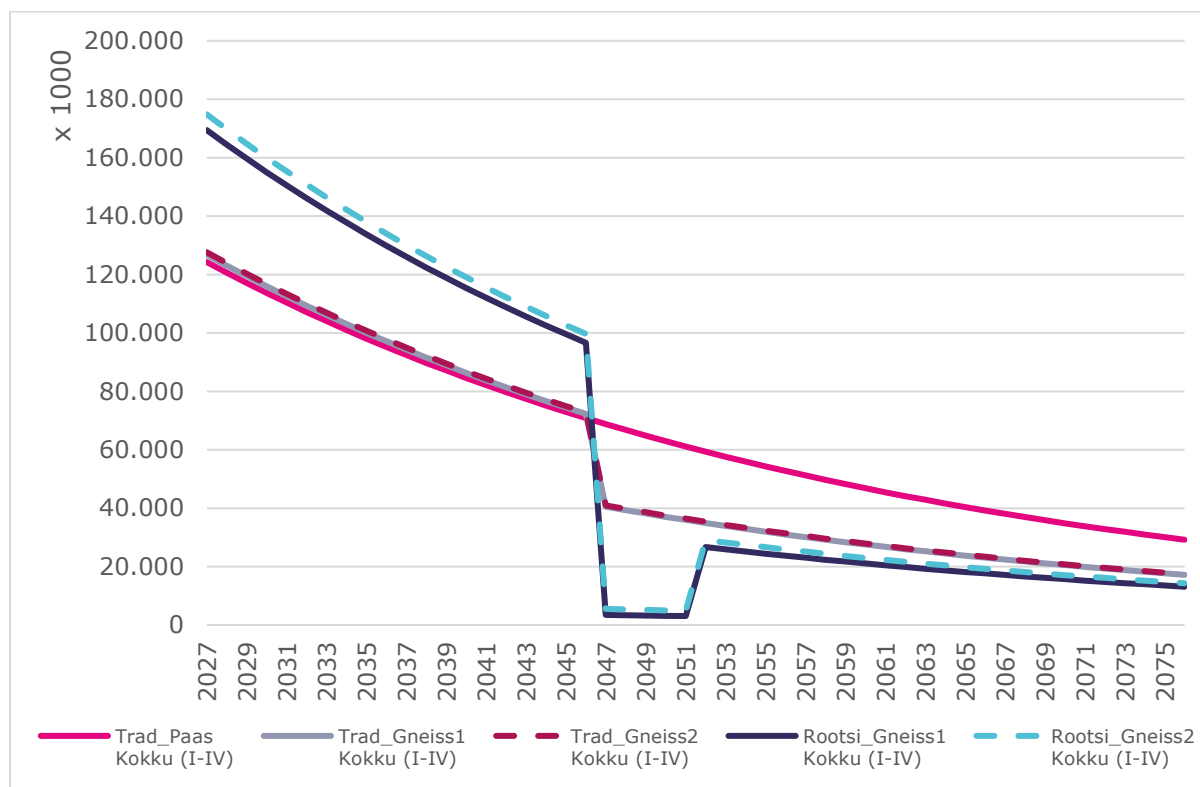
Variant	I klass 14500+	II klass 6000-14500	III klass 3000-6000	IV klass 500-3000	Kokku
Trad_PAAS	383	1 415	1 087	3 327	6 212
Trad_Gneiss1	298	1 012	716	2 701	4 728
Trad_Gneiss2	248	1 038	730	2 756	4 772
Rootsi_Gneiss1	310	1 036	755	3 028	5 128
Rootsi_Gneiss2	304	1 061	952	3 073	5 389

Arvestamaks, et kulud tekivad erinevatel aastatel, on tulemused ajaldatud nagu eelnevaltki 3-protsendilise diskontoteguriga. Pikas perspektiivis on kokkuvõttes gneisskillustikuga traditsiooniline katendikonstruktsioon (alternatiivid 2 ja 3) kõige soodsam, sest ajaldatud kulu on 6-7 protsenti väiksem esimesest alternatiivist, vt tabelit 1.18.

Tabel 1.18. Olemasolevate teede remondikulu 50-aastase hindamisperioodi jooksul, nüüdispuhasväärtus, miljon eurot 2023. aasta hindades

Alter-natiiv	Konstruktsioon	Variant	Nüüdispuhasväärtus miljon eurot
1	Tänapäevaste materjalidega	Trad_PAAS	3 293
2	Gneisskillustik aluses ja asfaldis	Trad_Gneiss1	2 759
3	Gneisskillustik aluses	Trad_Gneiss2	2 783
4	Gneisskillustik aluses ja asfaldis	Rootsi_Gneiss1	3 198
5	Gneisskillustik aluses	Rootsi_Gneiss2	3 337

Alloleval joonisel 1.3. on näha iga aastased ajaldatud remondikulud.



Joonis 1.3. Aastane kulu perioodil 2027-2076, ajaldatud 3-protsendilise diskontomääraga, tuhandetes eurodes 2023. a hindades

Kokkuvõtvalt saab järeldada, et gneisskillustiku kasutuselevõtt annab tunduvalt madalama teede renoveerimise kulu, võrreldes tänaste materjalidega. Alates 21. aastast on iga-aastane kulu rohkem kui 40 protsenti madalam, kui on tee katendi konstruktsioonis kasutatud gneisskillustikku

RESSURSI TOOTLIKKUSE MUUTUS

Vabariigi valitsuse strateegias „Eesti 2035“ seatakse viis pikaajalist strateegilist sihti.⁵ Üks nendest on vastutustundlik majandus. Eesmärgi saavutamist jälgitakse nelja mõõdiku abil, sealhulgas ressursitootlikkusega. Ressursitootlikkus on näitaja, mis väljendab riigis saadud majandusliku tulu eurodes ühe kilogrammi materjali kohta. Aastal 2022 oli ressursitootlikkus 0,70 eurot kilogrammi kohta. Eesti ressursitootlikkuse näitaja on aastatega kasvanud, 2013. aastal oli ressursitootlikkus 0,52 eurot. Allolev tabel (tabel 1.19.) võtab kokku ressursitootlikkuse aegrea aastatel 2013-2022.

⁵<https://valitsus.ee/strateegia-eesti-2035-arengukavad-ja-planeering/strateegia/aluspohimotted-ja-sihid>

Tabel 1.19. Eesti ressursitootlikkus aastatel 2013-2022. Allikas: statistikaamet

	1.Kokku füüsiline import (tuh. t.)	2. Kodumaise toorme kasutus (tuh. t.)	3.Kokku (1+2), tuh. t.	4.Kokku füüsiline eksport (tuh.t.)	5. Eestis kasutatavad ressursid (tuh. t.) 5=(3-4)	6. SKP aheldatud väärtus (referentsaasta 2015), miljonit €	Ressursitootlikkus 6/(3-4) (€/kg)
2013	9 783	41 009	50 792	13 296	37 496	19 652	0,52
2014	9 902	39 093	48 995	13 313	35 682	20 201	0,57
2015	9 533	38 787	48 320	12 963	35 357	20 663	0,58
2016	10 595	36 891	47 485	13 293	34 193	21 300	0,62
2017	11 696	44 318	56 014	15 441	40 573	22 463	0,55
2018	13 967	45 607	59 574	17 465	42 110	23 329	0,55
2019	13 402	41 614	55 015	17 070	37 945	24 248	0,64
2020	14 207	39 037	53 245	16 989	36 256	24 081	0,66
2021	16 740	38 386	55 126	20 247	34 879	25 858	0,74
2022	13 802	40 801	54 602	17 741	36 861	25 740	0,70

Ressursitootlikkuse näitaja kajastab arengut riigi tasandil ja ressursitootlikkuse kasv ülaltoodud 10-aastase perioodi jooksul on põhiliselt tingitud sisemajanduse koguprodukti (SKP) kasvust. Eestis kasutatud materjalide kogus on vaadeldud perioodi jooksul olnud suhteliselt stabiilne, ning ulatunud umbes 36-40 miljonile tonnile aastas. Seevastu on SKP kasvanud vaadeldud perioodi jooksul 30 protsendi võrra. Arvestamaks ressursitootlikkust, mis tuleneb paekivikillustiku ja graniitkillustiku asendamisest gneisskillustikuga, lähtub käesolev analüüs eelnevas alapeatükis esitatud majandusanalüüsi tulemustest ning katendikonstruktsiooni materjalide kulust.

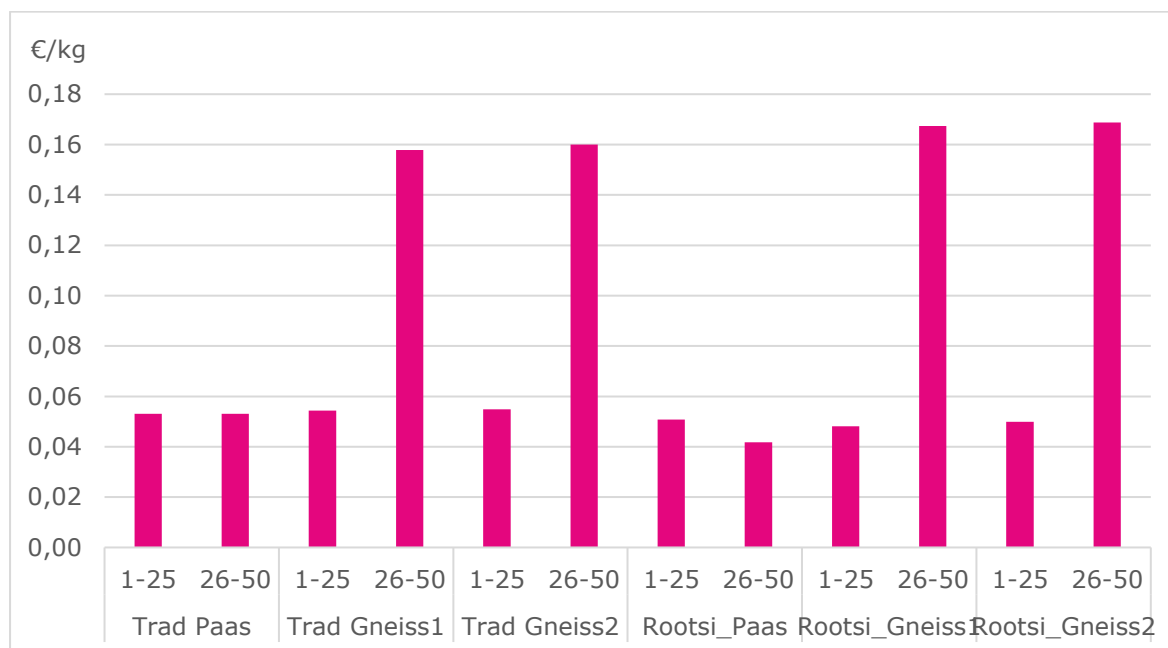
Materjalide eluea pikenemine suurendab tootlikkust põhiliselt tänu väiksemale renoveerimise vajadusele. Tänapäevaste materjalidega konstrueeritud tee asfaltkatte uuendamise käigus on vaja vahetada välja lisaks asfaltkattele ka aluse killustikukihid kas 20. aastal või 25. aastal. Gneisskillustikuga katendi aluskihte pole vaja välja vahetada, kuna nende eluiga, toetudes Põhjamaade kogemustele, on vähemalt 50 aastat. Stsenaariumide elutsükli kulude ja materjali kulu summa 50-aastase hindamisperioodi jooksul viitab siiski võrdlemisi väikesele tootlikkuse muutusele, vt tabel 1.20.

Tabel 1.20. Stsenaariumide ressursitootlikkus hindamisperioodil kokku

Stsenaarium	Kokku, miljon eurot	Materjali kulu, tuhat tonni	€/kg
Trad Paas	6 212	117 029	0,05
Trad Gneiss1	4 728	64 893	0,07
Trad Gneiss2	4 772	64 853	0,07
Rootsi_Paas	6 435	154 031	0,04
Rootsi_Gneiss1	4 818	97 213	0,05
Rootsi_Gneiss2	5 071	96 713	0,05

Katendi pikem eluiga kajastub majandusanalüüsis madalama kuluga hindamisperioodi teisel poolel. Põhiline ressursitootlikkuse muutus toimub alles seoses materjali kokkuhoiduga hindamisperioodi 20ndal aastal. Hinnanguliselt võib Eesti ressursitootlikkuse paranemine ulatuda umbes 0,03 ühikule aastas (vt. tabel 1.19), alates aastast 20. Joonisel

1.4. on stsenaariumide sisene ressursitootlikkus jagatud 25-aastastes etappidesse, mille puhul on näha ressursitootlikkuse paranemist gneisskillustikuga stsenaariumides.



Joonis 1.4. Ressursitootlikkus stsenaariumide kaupa hindamisperioodi esimesel ja hindamisperioodi teisel poolel, €/kg

Kokkuvõtvalt saab öelda, et kui viimase 10 aasta jooksul on Eesti ressursitootlikkus paranenud SKP kasvu läbi, võimaldab gneisskillustiku kasutuselevõtt teede ehitamisel ja renoveerimisel parandada Eesti ressursitootlikkust materjalikulu vähendamise kaudu.

GNEISSKILLUSTIKU KASUTUSELEVÕTUGA SEOTUD VÄLISKULUDE ANALÜÜS

MATERJALIDEGA SEOTUD OTSESED VÄLISKULUD

Gneissist valmistatud ehituskillustiku kasutuselevõtuga teede ehituses ja renoveerimises kaasnevad ka sellised mõjud reaalmajandusele, mis ei ole otseselt seotud teede ehitamise ja renoveerimisega. Esiteks väheneb nõudlus lubjakivikillustiku järele ja teiseks väheneb graniitkillustiku import Soomest ja Skandinaaviamaadest. Nii lubjakivikillustiku tootmisega kui ka graniitkillustiku impordiga kaasneb süsinikdioksiidi (CO₂) ja teiste kasvuhoonegaaside emissioon, mille vähenemine on gneisskillustiku kasutuselevõtul üheks argumendiks. Käesolevas peatükis analüüsitakse paekivikillustiku tootmise- ja graniitkillustiku impordiga seotud kasvuhoonegaaside emissioone ning hinnatakse emissioonide rahalist ekvivalenti. Muid paekivi kaevandamisega seotud sotsiaalseid kulusid analüüsitakse kaudsete väliskulude all.

Käesolevas peatükis ei seata eesmärgiks kirjeldada paekivikillustiku ja graniitkillustiku elutsükli kõiki etappe, vaid keskendutakse tootmise vähenemisega tekkivatele emissioonidele, mis on kvantifitseeritavad ja millel on oluline kliimamõju. Sellised paekivikillustiku ja graniitkillustiku elutsükli etappe mis on gneissidest valmistatavale killustikule sarnased ja ligikaudu sarnaste emissioonidega (näiteks Eesti sisene transport), eraldi ei käsitleta, sest see on gneissidest valmistatud killustikul ja teistel praegu kasutatavate killustike sarnane ja ei anna seega infot erinevate killustikutüüpide kasutamise seotud väliskulude kohta.

KASVUHOONEGAASI SAASTEÜHIKU MAKSUMUS

Kõige suurema keskkonnamõjuga emissioon, mis tekib nii paekivikillustiku tootmise elutsükli jooksul kui ka imporditava graniitkillustiku tootmisel ja transpordil, on süsinikdioksiid (CO₂). Süsinikoksiidi ja teiste kasvuhoonegaaside kontsentratsiooni suurenemist atmosfääris peetakse kliima soojenemise peamiseks põhjuseks ja sellele on viimastel kümnenditel rahvusvaheliselt ülekaalukalt kõige rohkem tähelepanu pööratud. CO₂ emissioonide piiramist ja vastavaid meetmeid käsitlevad rahvusvahelised konventsioonid, nagu Kyoto Protokoll [4] ja Pariisi Kliimalepe [5], millega Eesti on ühinenud ja võtnud kohustuse kasvuhoonegaaside (eelkõige CO₂) emissioone vähendada. CO₂ saasteühikutega kauplemiseks on loodud spetsiifiline rahvusvaheline süsteem [6] ja tekitatud saasteühikute (ETS) turg koos regulatsioonimehhanismidega. Seega on CO₂-l, või täpsemalt CO₂ saasteühiku emiteerimise õigusel hind, mida saab tasuvusarvutustes kasutada CO₂ rahalise ekvivalentina.

Euroopa Liidu juhendmaterjalis sektoripõhioste tasuvusuuringute tegemiseks (*Economic Appraisal Vademecum 2021-2027 General Principles and Sector Applications*) [2] on toodud emiteeritava CO₂ tonni hinnad ja hindade dünaamika, mida EL aktsepteerib tasuvusuuringute tegemisel. CO₂ soovituslikud tonnihinnad on toodud tabelis 1.21. [7].

Tabel 1.21. Süsiniku soovituslikud varihinnad aastateks 2022-2050 (2016. a hindades).

Aasta	EUR/t CO ₂	Aasta	EUR/t CO ₂	Aasta	EUR/t CO ₂	Aasta	EUR/t CO ₂
2022	114	2030	250	2038	471	2046	688
2023	131	2031	278	2039	498	2047	716
2024	148	2032	306	2040	525	2048	744
2025	165	2033	334	2041	552	2049	772
2026	182	2034	362	2042	579	2050	800
2027	199	2035	390	2043	606		
2028	216	2036	417	2044	633		
2029	233	2037	444	2045	660		

Kooskõlas EL-i tehnilise juhendiga infrastruktuuri kliimakindluse kohta aastatel 2021–2027 [2] on soovitatav kasutada süsiniku varikulu väärtuseid, mille Euroopa investeerimispank (EIP) kehtestas aastal 2020 kui parima võimaliku lahendi Pariisi kokkuleppe kliimaeesmärkide saavutamiseks (st eesmärk jääda 1,5 °C temperatuuri tõusu piiridesse). Nagu tabelis toodud andmetest nähtub, kallineb emiteeritav CO₂ aastani 2050, jäädes siis pidama hinna juures 800 EUR/tonn.

LUBJAKIVIKILLUSTIKU, GRANIITKILLUSTIKU JA GNEISSKILLUSTIKU TOOTMISEGA SEOTUD KASVUHOONEGAASI EMISSIOONID.

Nii lubjakivikillustiku kui ka graniitkillustiku tootmine ning sellega tekkiv CO₂ emissioon koosneb kivimi kaevandamisest, töötlemisest (purustamine, fraktsioneerimine) ja transpordist müügiplatsile. Eesti Transpordiamet ja Eesti Taristuehituse Liit on kokku leppinud, et hetkel lähtutakse infraehituses Soomes kasutatavast killustiku CO₂-e sisaldus 6 kg CO₂-e killustiku tonni kohta [8]. Käesolevas töös lähtutakse sellest väärtusest. Gneissidest valmistatud killustikule omistatavaks emissiooniks on võetud 0,25 kg CO₂e/tonni, mis pärineb allikast [8A].

Analüüsil sisendina kasutamiseks tuleb vaadata CO₂-e tonni rahalise ekvivalendi muutusi ajas. Tabelis 1.22. on toodud toodetava lubjakivikillustiku ühe tonni CO₂-e sisalduse maksumus 40 aastase perioodi jooksul. Esimeseks aastaks on aegreas võetud 2027. aasta, sest see on eeldatavalt kõige varasem tähtaeg, millal paekivikillustikku saab gneissidega asendada.

Tabel 1.22. Ühe tonni lubjakivikillustiku ja graniitkillustiku tootmisega emiteeritava CO₂-e maksumuse dünaamika

Aasta	EUR/tonn	Aasta	EUR/tonn	Aasta	EUR/tonn	Aasta	EUR/tonn
2027	1,194	2039	2,988	2051	4,8	2063	4,8

2028	1,296	2040	3,15	2052	4,8	2064	4,8
2029	1,398	2041	3,312	2053	4,8	2065	4,8
2030	1,50	2042	3,474	2054	4,8	2066	4,8
2031	1,668	2043	3,636	2055	4,8	2067	4,8
2032	1,836	2044	3,798	2056	4,8		
2033	2,004	2045	3,96	2057	4,8		
2034	2,127	2046	4,128	2058	4,8		
2035	2,34	2047	4,296	2059	4,8		
2036	2,502	2048	4,464	2060	4,8		
2037	2,664	2049	4,632	2061	4,8		
2038	2,826	2050	4,8	2062	4,8		

Tabelis toodud andmetest nähtub, et enne eeldatavat stabiliseerumist 2050. a tõuseb ühe tonni lubjakivikillustiku tootmisel tekkiva CO₂-e hind ligikaudu üle 4 korra, 1,16 eurolt 2027 kuni 4,8 euroni 2050.

GRANIITKILLUSTIKU IMPORDIGA SEOTUD CO₂ EMISSIOONID

Gneissidest valmistatud killustiku kasutuselevõtt teede ehitamisel ja renoveerimisel võimaldab lisaks lubjakivikillustikule asendada ka praegu imporditavat graniitkillustikku. Sellega seoses tõstatub küsimus, kuidas oleks õige kajastada graniitkillustiku gneissidest valmistatud killustikuga asendamise väliskulusid. Gneisskillustiku peamine erinevus võrreldes graniitkillustikuga seisneb selles, et teedeehituses vajaminev graniitkillustik imporditakse. Seega on graniitkillustiku asendamisel gneissidest valmistatud killustikuga kõige olulisem majanduslik muutus graniitkillustiku impordi vajaduse (ja seega ka impordi) ära jäämine. Seetõttu keskendub järgnev analüüs imporditava graniitkillustiku transpordil tekkivale väliskulule, milleks on kasvuhoonegaaside emissioon.

IMPORDITAVA GRANIITKILLUSTIKU TRANSPORDI DISTANTSID JA MAHUD

Graniitkillustikku transporditakse Eestisse Norrast, Soomest ja Rootsi. Ülevaate tardsivikillustiku impordist aastatel 2019-2023 annab tabel 1.23 [9]. Ligi 2/3 tardsivikillustikku imporditakse Soomest, järgnevad Norra 30,5 ja Rootsi 5,5 protsendiga.

Tabel 1.23. Eesti graniitkillustiku import 2019-2023, tonnides

Riik	2019	2020	2021	2022	2023	Kokku	Osakaal, %
Soome	1103930	851549	1140449	865803	690006	4651737	64,1
Norra	529240	685688	441587	285224	272409	2214147	30,5
Rootsi	120098	95517	56077	78695	45964	396351	5,5
KOKKU	1753268	1632754	1638113	1229721	1008379		

Tabelis 1.24 on esitatud veokaugused Soomest, Rootsist ja Norrast karjääride kaupa. Meretranspordi vahemaade määramisel on kasutatud laevatranspordi distantside määramise kalkulaatorit [10] (vt tabel 32). Soomest imporditava killustiku kaalutud keskmine veokaugus on 276 km, Rootsist 642 km ja Norrast 1797 km.

Tabel 1.24. Eestisse imporditava graniitkillustiku veokaugused Soomest, Rootsist ja Norrast

Sooome

Karjäär	Veokaugus, km	Osakaal	Kaalutud keskmine veokaugus, km
Inkoo	93	0,66	276
Parainen	296	0,11	
Ahlainen	574	0,11	
Ohto	1056	0,11	

Norra

Karjäär	Veokaugus, km	Osakaal	Kaalutud keskmine veokaugus, km
Halsvik	1852	0,33	1797
Seljestokken	1852	0,33	
Tau	1687	0,33	

Rootsi

Karjäär	Veokaugus, km	Osakaal	Kaalutud keskmine veokaugus, km
Flivik	551	0,5	642
Branahult	732	0,5	

GRANIITKILLUSTIKU MERETRANSPORDIL TEKKIVAD EMISSIOONID.

Graniitkillustiku meretransport toimub üldjuhul puistlastilaevadega. Transpordiks kasutatakse umbes 15000-35000 tonni (DWT) kandevõime suurusklassi kuuluvaid laevu. Nende laevade CO₂emissioonideks tonn/kilomeetri kohta on 0,007 kg.⁶

Graniitkillustiku meretranspordiga importimisel tekkivad emissioonid on esitatud tabelis 1.25 Kolmest lähteriigist imporditud 1 tonni graniitkillustiku meretranspordi kaalutud keskmine CO₂ sisaldus on 5,32 kg.

⁶ Andmed pärinevad Ecoinvent andmebaasi 3.10 versioonist ja laeva tüübiks on "transport freight, sea, bulk carrier dry goods".

Tabel 1.25. Graniitkillustiku impordil tekkivad emissioonid

Päritolumaa	Distsants, km	Osakaal impordis, %	Transpordi CO ₂ , kg/tonn/killustiku	Kaalutud keskmine, kg CO ₂ /tonn killustiku
Norra	1797	5,5	12,58	5,32
Rootsi	642	30,5	4,49	
Soome	276	64	1,93	

GRANIITKILLUSTIKU MERETRANSPOORDIL TEKKIVATE EMISSIOONIDE MAKSUMUS.

Graniitkillustiku meretranspordil tekkivate emissioonide maksumust arvestatakse analoogiliselt lubjakivikillustiku ja graniitkillustiku tootmisel tekkiva CO₂ emissiooni maksumusega. Emissioonide maksumuse arvestamise aluseks on süsiniku soovituslikud varihinnad aastateks 2022-2050 (vt tabel 1.21).

Imporditava graniitkillustiku transpordil emiteeritava CO₂ maksumuse dünaamika aastatel 2027-2067 on esitatud tabelis 1.26. Eeldusel, et ühe tonni graniitkillustiku impordil meretranspordiga tekib keskmiselt 5,32 kg CO₂-e.

Vastavalt CO₂-e soovituslikule hinnale maksab 1 tonni graniitkillustiku impordil emiteeritav CO₂ 2027. a 1,053 EUR ja 2050. a 4,256 EUR. Saadud väliskulu on kasutatav väliskulude analüüsil töö järgmistes etappides.

Tabel 1.26. Imporditava graniitkillustiku meretranspordil emiteeritava CO₂-e maksumuse dünaamika

Aasta	EUR/tonn killustikku	Aasta	EUR/tonn killustikku	Aasta	EUR/tonn killustikku	Aasta	EUR/tonn killustikku
2027	1,053	2039	2,649	2051	4,256	2063	4,256
2028	1,149	2040	2,793	2052	4,256	2064	4,256
2029	1,240	2041	2,937	2053	4,256	2065	4,256
2030	1,330	2042	3,080	2054	4,256	2066	4,256
2031	1,479	2043	3,224	2055	4,256	2067	4,256
2032	1,628	2044	3,368	2056	4,256		
2033	1,777	2045	3,511	2057	4,256		
2034	1,926	2046	3,660	2058	4,256		
2035	2,075	2047	3,809	2059	4,256		
2036	2,218	2048	3,958	2060	4,256		
2037	2,362	2049	4,107	2061	4,256		
2038	2,506	2050	4,256	2062	4,256		

TEEDE EHTAMISE JA RENOVEERIMISE STSENAARIUMIDE VÄLISKULU

Olemasolevate teede ehitamine ja remont nõuab materjale ja materjali tootmisel tekivad kasvuhoonegaasid, mille rahalist ekvivalenti loetakse kahjuliku keskkonnamõju tõttu väliskuludeks. Eelneva peatüki („Gneisskillustiku kasutuselevõtu majandusanalüüs“) alusel on võimalik määrata tee ehitamise ja renoveerimisega seotud kasvuhoonegaaside väliskulu. Eesmärgiks on määratleda konstruktsioonis olevate katendivariantidega seotud otsesed väliskulud (killustik koos asfaldiga)⁷. Käesoleva peatüki analüüsi objektiks on ühe tee kilomeetri elutsükli kasvuhoonegaaside väliskulu ja olemasolevate teede remontimisel kasutatavate materjalide kasvuhoonegaasidega seonduv väliskulu. Läbi viiakse täiendavalt ka tundlikkuse analüüs, mis hõlmab nii otseseid kui kaudseid väliskulusid. Analüüsis käsitletakse eelnevalt kirjeldatud kahe stsenaariumi kuut varianti.

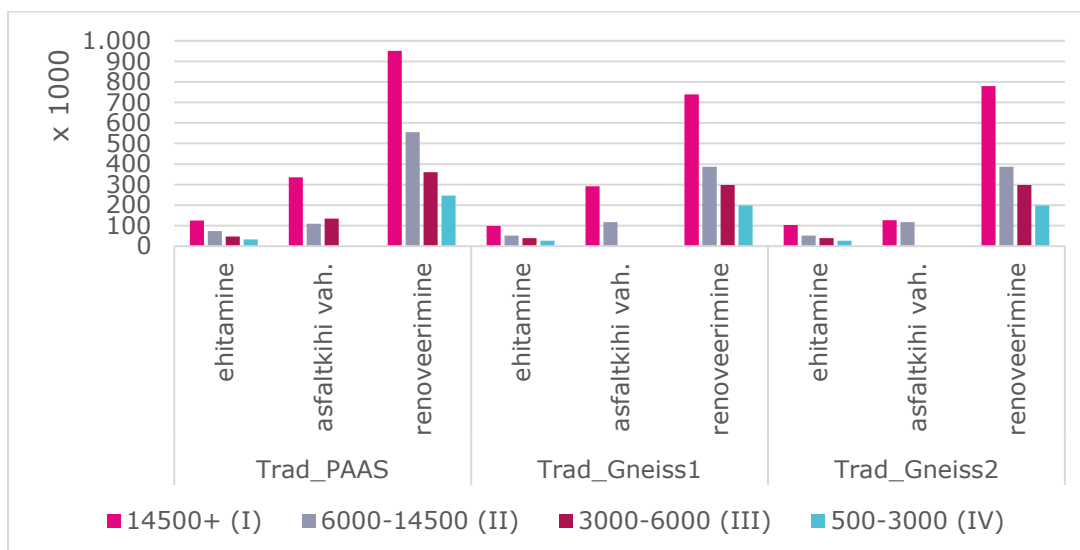
Lähtudes katendiarvutustest on traditsioonilise stsenaariumi katendi eluiga 20 aastat. Tänu Rootsi stsenaariumi katendikonstruktsiooni paksemale killustiku alusele on võimalik pikendada asfaltkatte eluiga 25-le aastale. Väliskulude hindamisperioodiks on valitud 50 aastat, lähtudes Rootsi skeemi kahest remonditsüklist.

GNEISSKILLUSTIKU KASUTUSELEVÕTU MÕJU UUE TEE ELUTSÜKLI VÄLISKULULE

Katendi materjali väliskulu (koos asfaldiga) analüüs lähtub ehitatava kilomeetri pikkusest tee ühikust. Analüüs tehakse kõigile neljale nelja teeklassile. Uue tee elutsükliks on võimalik eristada kolme põhilist etappi: ehitamine, ülemise asfaltkihi vahetamine ja iga 20. või 25. aasta tagant toimuv renoveerimine. Arvutused lähtuvad eelnevates peatükkides esitatud katendikonstruktsioonidest ja asfaldi ülemise kihi elueast kus neid on detailsemat kirjeldatud.

Kuna katendi materjalid, nii asfaldi kui sidumata kihtide väliskulu kasvab analüüsi algusaasta ja 2050 aasta vahelisel perioodil on uue tee väliskulu tingitud algusaasta valikust. Eeldatavalt on Paldiski materjal kättesaadav alates 2026 aasta lõpust, millest olenevalt on valitud 2027 analüüsi esimeseks aastaks. Eeldatakse, et uus tee lõik ehitatakse aastal 2027 ja võetakse kasutusele aastal 2028. Nende eelduste alusel ulatub hindamisperiood aastast 2027 kuni aastani 2077. Joonisel 1.5 on näha Traditsioonilise stsenaariumi elutsükli väliskulu jaotatuna kolmele etapile.

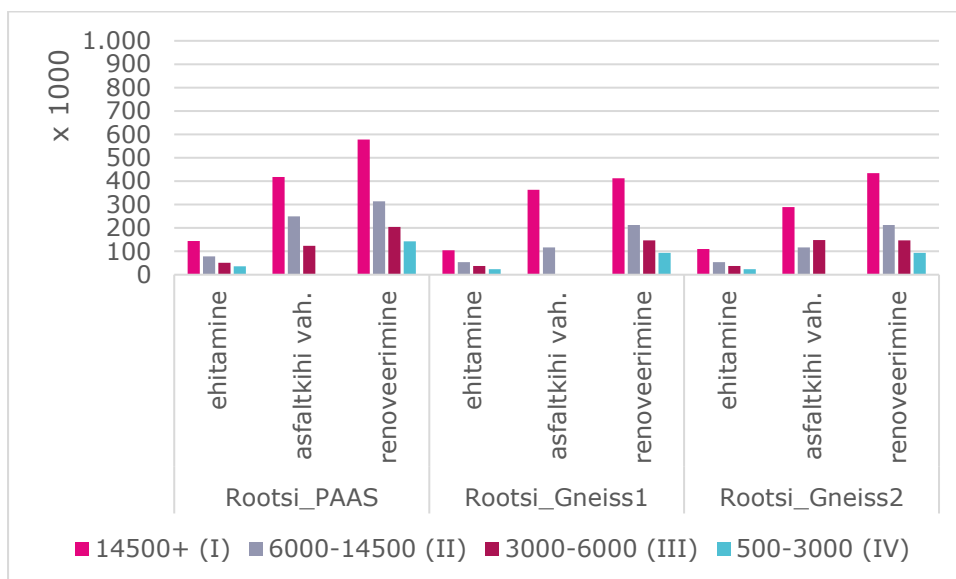
⁷ Asfaldi kasvuhoonegaasidega seostuv väliskulu aastal 2027 on hinnatud järgmiselt: SMA asfalt (graniit) 15,3 €/tonn; SMA asfalt (gneiss) 13,3 €/tonn; AC surf/bin (graniit) 12,3 €/tonn; AC surf/bin (gneiss) 12,3 €/tonn ja AC base (paekivi) 7,2 €/tonn.



Joonis 1.5. Ühe tee kilomeetri katendi otsesed väliskulud, mis on seotud materjali CO₂-heitmetega, 50. aastase hindamisperioodi jooksul, etappide kaupa, Traditsiooniline stsenaarium eeldusel et tee ehitatakse aastal 2027, tuhandetes eurodes.

Väliskulu on kõrgem tänaste materjalidega võrreldes gneisskillustikuga ehitatud tee lõigul. Eriti on variantide asfaltkihi vahetamise väliskulu vahe võrdlemisi suur. Asfaltkihi väliskulu sõltub peamiselt välpade pikkusest. Joonisel on ka näha, et renoveerimisega seotud väliskulu domineerib elutsükli väliskulu. Renoveerimisega seotud väliskulu suurus võrreldes ehitamise väliskuluga on tingitud kahest asjaolust. Esiteks on väliskulu neli korda väiksem hindamisperioodi alguses (aastal 2027) võrreldes hindamisperioodi lõpus. Aastal 2027 on esimese klassi uue tee kilomeetri ehitamise väliskulu umbes 100000-120000 eurot ning moodustab umbes 9 protsenti elutsükli väliskulust. Kui ehitamine toimuks aastal 2050 oleks väliskulu neli korda kõrgem: 400000-500000 eurot, ja ehitamise väliskulu oleks umbes 30 protsenti kogu elutsükli väliskulust. Teiseks on traditsioonilise stsenaariumi hindamisperioodi jooksul vaja teed renoveerida kaks korda: aastal 2048 ja aastal 2068. Rootsi stsenaariumi renoveerimise vajadus on poole väiksem, sest hindamisperioodi jooksul tekib renoveerimise vajadus ainult üks kord: aastal 2053.

Allolev joonis 1.6 näitab Rootsi stsenaariumi elutsükli väliskulu jaotatuna kolmele etapile. Rootsi stsenaariumi renoveerimisvajadus on väiksem, mis kajastub ka väiksemas väliskulus võrreldes Traditsioonilise stsenaariumiga.



Joonis 1.6. Ühe tee kilomeetri katendi variantide otsesed väliskulud, mis on seotud materjalide CO₂-heitmetega, 50. aastase hindamisperioodi jooksul, etappide kaupa, Rootsi stsenaarium eeldusel et tee ehitatakse aastal 2027, tuhandetes eurodes.

Järgmises tabelis 1.27 on esitatud eelnevatel joonistel näidatud uue tee lõigu stsenaariumide variantide väliskulude summa. Rootsi stsenaariumi gneissi variantidel on üldjuhul madalam uue tee elutsükli väliskulu, peamiselt tingitud väiksema renoveerimisega seotud väliskulust. Tänapäevaste materjalidega uue tee elutsükli väliskulu on vahemikus 20 kuni 60 protsenti suurem kui gneisskillustikega tee konstruktsioonid.

Tabel 1.27. Uue tee kilomeetri katendi variantide otsene väliskulu mis on seotud materjali CO₂-heitmetega, eeldusel, et tee ehitatakse aastal 2027 a, summa eurodes

Tee klass ja variant	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000
Trad_PAAS	1 411 571	737 284	542 582	279 807
Trad_Gneiss1	1 130 464	555 327	338 239	225 272
Trad_Gneiss2	1 009 307	555 327	338 239	225 272
Rootsi_PAAS	1 138 396	641 158	377 860	178 849
Rootsi_Gneiss1	879 862	383 644	184 920	117 660
Rootsi_Gneiss2	831 956	383 644	333 579	117 660

Arvestades, et väliskulu tekib erinevatel aastatel, on tänapäevaste materjalide väliskulude võrdlus gneisskillustikuga tehtud ajaldatud vormis. Järgmised tabelid (tabelid 1.28 ja 1.29) näitavad ajaldatud tulemusi.

Tabel 1.28. Uue tee kilomeetri katendi variantide otsene väliskulu mis on seotud materjalide CO₂-heitmete eeldusel, et tee ehitatakse aastal 2027. a, nüüdispuhasväärtus, summa eurodes

Tee klass ja variant	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000
Trad_PAAS	657 335	356 061	256 712	134 044
Trad_Gneiss1	525 575	265 885	162 249	108 062
Trad_Gneiss2	484 643	265 885	162 249	108 062
Rootsi_PAAS	583 273	331 396	197 861	102 041
Rootsi_Gneiss1	444 926	204 355	105 814	67 388
Rootsi_Gneiss2	421 474	204 355	161 464	67 388

Kokkuvõtvalt võib öelda, et gneisskillustiku kasutusele võtmine vähendab oluliselt uue tee elutsükli väliskulu. Kui paekivikillustik asendada gneissiga, on väliskulu nüüdispuhasväärtus umbes 150000 kuni 100000 eurot väiksem esimeses, teises ja kolmandas tee klassis (protsentides 20 kuni 80 protsenti madalam). Neljanda tee klassi väliskulude vahe on väiksem, kuid protsentides on paranemine oluline, vt allolevat tabelit 1.29.

Tabel 1.29. Katendivariantide otsese väliskulu vahe (Trad_paas miinus gneiss1 ja Trad_paas miinus gneiss 2 ning Rootsi paas miinus Rootsi gneiss 1 ja Rootsi paas miinu Rootsi gneiss 2) eeldusel, et tee kilomeeter ehitatakse aastal 2027, nüüdispuhasväärtus, summa eurodes

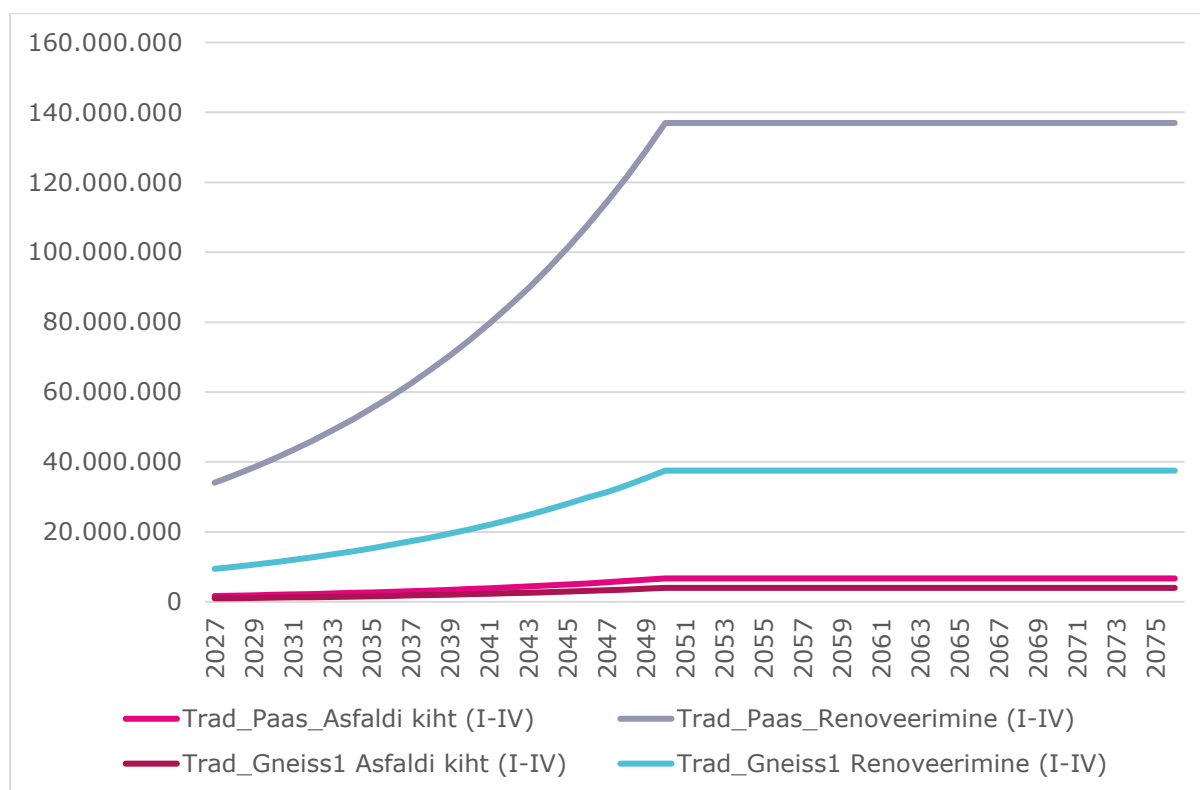
Tee klass ja variant	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000
Trad_Gneiss1	131 760	90 176	94 463	25 982
Trad_Gneiss2	172 691	90 176	94 463	25 982
Rootsi_Gneiss1	138 347	127 041	92 047	34 653
Rootsi_Gneiss2	161 799	151 706	95 248	66 656

GNEISSKILLUSTIKU KASUTUSELEVÕTUGA SEOTUD OLEMASOLEVATE TEEDE REMONTIMISE VÄLISKULU

Olemasolevate teede remont nõuab materjale ja materjali tootmisel tekivad kasvuhoonegaasid, mille väliskulud on võimalik määrata, s.t. terve katendi väliskulud (killustik koos asfaldiga). Eeldades, et olemasolevaid teid on vaja remontida iga 20 aasta tagant (s.t. vahetada kõik asfaltkatted ja kui kasutusel on lubjakivikillustik, ka aluskihid) võime eeldada, et järgmise 20 aasta jooksul on vaja remontida 1/20 (ehk 5 protsenti) olemasolevatest teedest. Remondi vahelistel perioodidel on kõrgematel teeklassidel vaja vahetada ka ülemine asfaltkiht. Arvestamaks ülemise asfaltkihi välja vahetamise väliskulu on arvatud kui mitu välja esineb 50 aastase hindamisperioodi jooksul iga tee klassi ja variandi kaupa. Kui tee klassil on näiteks on 5 välja 50 aasta jooksul eeldatakse, et iga aasta vajab 10 protsenti olemasolevatest teedest ülemise asfaltkihi välja vahetamist. Renoveerimise väliskulu 50 aastane hindamisperiood algab aastal 2027 ja ulatub aastani 2076.

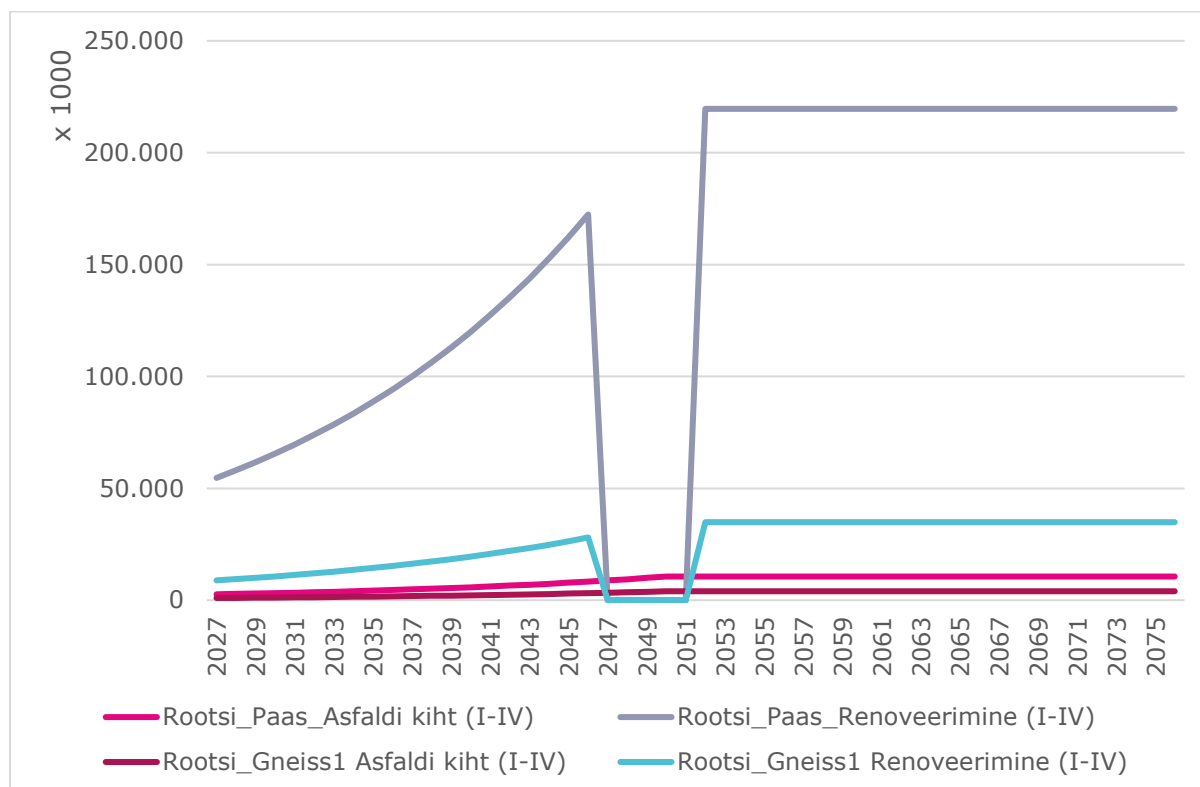
Sarnaselt uue tee lõigu elutsükli väliskuluga, on olemasolevate teede remondiga seostatud väliskulu suurem asfaltkihi vahetamise väliskulust. Järgmine joonis 1.7 näitab Traditsioonilise stsenaariumi kahte varianti (Paas ja Gneiss1). Joonisel on näha, et

väliskulu kasvab hindamisperioodi jooksul, mis on tingitud kasvuhoonegaaside väliskulu suurenemisest kuni aastani 2050.



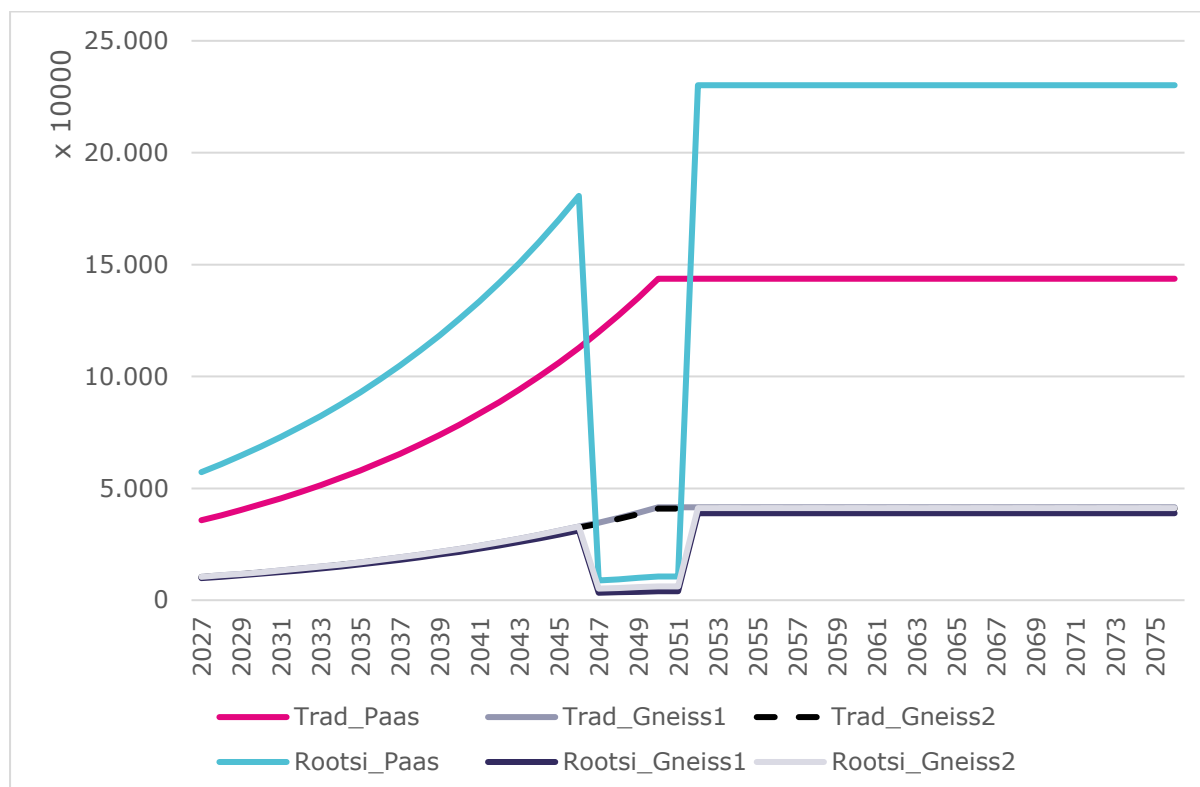
Joonis 1.7. Olemasolevate teede aastane asfaldi kihi ja renoveerimise otsene väliskulu (terve katendi materjalide väliskulu) 50 aastase hindamisperioodi jooksul, Traditsioonilise stsenaariumi kaks varianti, tuhandetes eurodes

Järgmine joonis 1.8 näitab Rootsi stsenaariumi kahe variandi olemasolevate teede aastast remondiga seostatavat väliskulu. Rootsi stsenaariumi paksem killustiku alus pikendab asfaltkatte eluiga 20-lt aastalt 25-le aastale. Eeldusel, et olemasolevate teede eluiga on 20 aastat on 20 aastaga, ehk perioodil 2027-2046, asendatud kõikide olemasolevate teede asfaltkate ja killustik. Aastal 2052 tekib renoveerimisvajadus teedele, mis renoveeriti aastal 2027 ja kasutatud materjalidest tingitud väliskulu. Vahepealse perioodi jooksul, 2047-2051 tekib väliskulu ainult asfaltkatte ülemise kihi välja vahetamise vajadusest.



Joonis 1.8. Olemasolevate teede aastane asfaldi kihi ja renoveerimise otsene väliskulu (terve katendi materjalide väliskulu) 50 aastase hindamisperioodi jooksul, Rootsi stsenaariumi kaks varianti, tuhandetes eurodes

Võrreldes mõlema stsenaariumi kõikide variantide väliskulu, selgub et variantidel Gneiss1 ja Gneiss2 väliskulu on võrdlemisi sarnasel tasemel ja, et tänaste materjalide kasutamine tingib kõrgema väliskulu kui gneisskillustiku kasutamine (Joonis 1.9).



Joonis 1.9. Olemasolevate teede aastane asfaldi kihi ja renoveerimise otsene väliskulu (terve katendi materjalide väliskulu) 50 aastase hindamisperioodi jooksul, Rootsi stsenaariumi variandid, kümnetes tuhandetes eurodes

Järgmine tabel (Tabel 1.30) võtab kokku joonisel esitatud aastased hindamisperioodi väliskulud.

Tabel 1.30. Olemasolevate teede remondi (renoveerimine ja asfaldi ülemise kihi asendamine) käigus kasutatavate materjalide (terve katend) otsene väliskulu 50 aastase hindamisperioodi jooksul, kulude summa, miljon eurot

Konstruksiooni variant	Stsenaarium ja variant	kokku miljon eurot
Tänaste materjalidega	Trad_PAAS	2 126
Gneisskillustik aluses ja asfaldis	Trad_Gneiss1	1 625
Gneisskillustik aluses	Trad_Gneiss2	1 602
Tänaste materjalidega	Rootsi_PAAS	2 197
Gneisskillustik aluses ja asfaldis	Rootsi_Gneiss1	1 362
Gneisskillustik aluses	Rootsi_Gneiss2	1 452

Väliskulud esinevad erinevatel aastatel, ja väliskulude dünaamika erineb sõltuvalt stsenaariumist. Selleks, et võrrelda kulusid, mis tekivad erinevatel aastatel on vaja mõjud teisendada ühtsesse väärtusesse ajaldamise kaudu (tabel 1.31). Ajaldamisel kasutatakse kolmeprotsendilist sotsiaalset diskontotegurit, mida soovitatakse juhul kui liikmesriigil puudub riigipõhine sotsiaalne diskontomäär [2].

Tabel 1.31. Olemasolevate teede remondi (renoveerimine ja asfaldi ülemise kihi asendamine) käigus kasutatavate materjalide (terve katend) otsene väliskulu 50 aastase hindamisperioodi jooksul, kulude nüüdispuhasväärtus, miljon eurot

Konstruksiooni variant	Stsenaarium ja variant	Kokku miljon eurot
Tänaste materjalidega	Trad_PAAS	968
Gneisskillustik aluses ja asfaldis	Trad_Gneiss1	741
Gneisskillustik aluses	Trad_Gneiss2	731
Tänaste materjalidega	Rootsi_PAAS	984
Gneisskillustik aluses ja asfaldis	Rootsi_Gneiss1	612
Gneisskillustik aluses	Rootsi_Gneiss2	652

Järgmine tabel (tabel 1.32) näitab stsenaariumide võrdluse tulemust, kus väliskulude ajaldatud summa on võrreldud tänaste materjalide väliskuluga Traditsioonilises stsenaariumis. Positiivne nüüdispuhasväärtus tähendab, et gneisskillustikku sisaldav katendikonstruktsioon on madalama väliskuluga kui graniitkillustikust ja lubjakivikillustikust ehitatud katendikonstruktsioon. Arvutuste tulemuste põhjal saab järeldada, et gneisskillustiku kasutamine on seotud väiksema väliskuluga kui tänased materjalid. Tee katendis olevate materjalide väliskulu oluliselt ei erista Gneiss1 ja Gneiss2, mis viitab sellele et asfaldis kasutatav gneiss ei ole väliskulude suurusele määrav.

Tabel 1.32. Olemasolevate teede remondi (renoveerimine ja asfaldi ülemise kihi asendamine) käigus kasutatavate materjalide (terve katend) otsese väliskulu võrdlus, nüüdispuhasväärtus, miljon eurot

Konstruksiooni variant	Stsenaarium ja variant	Kokku miljon eurot
Tänaste materjalidega	Trad_PAAS	0
Gneisskillustik aluses ja asfaldis	Trad_Gneiss1	227
Gneisskillustik aluses	Trad_Gneiss2	237
Tänaste materjalidega	Rootsi_PAAS	-16
Gneisskillustik aluses ja asfaldis	Rootsi_Gneiss1	356
Gneisskillustik aluses	Rootsi_Gneiss2	315

Kokkuvõtvalt võib öelda, et gneisskillustiku kasutusele võtmine vähendab oluliselt remondiga seotud materjalide väliskulu. Hindamisperioodi olemasolevate teede remondi väliskulu on 25 kuni 35 protsenti väiksem gneisskillustikuga konstruktsioonil võrreldes tänaste materjalidega katendikonstruktsioonil.

STSENAARIUMIDES KASUTATAVATE KILLUSTIKEGA OTSESELT SEOTUD CO₂ EMISSIOONID.

Peatükis esitatakse teede stsenaariumide remondil erinevates konstruktsioonides kasutatavate killustikega (graniit, gneiss, paekivikillustikud E280 ja E240, ning asfaldis olevad killustikud) otseselt seotud CO₂-e emissioonid stsenaariumide kaupa hindamisperioodi kohta (2027-2076, Tabel 1.33) ja vaadeldava perioodi esimesel aastal (Tabel 1.34). Lisaks esitatakse vastavad andmed konstruktsioonides kasutatavate killustikega seotud otsesed CO₂-e emissioonid kõikide teeklasside ühe kilomeetri lõikes

nii kogu perioodi kohta (Tabel 1.35) kui ka esimesel aastal (Tabel 1.36), mis võimaldab eri teeklasside remondil tekkivaid killustikega otseselt seotud emissioone võrrelda.

Tabelis 1.33 on esitatud killustikega otseselt seotud CO₂-e emissioonid stsenaariumide hindamisperioodi jooksul. Tabelis toodud andmetest nähtub, et hindamisperioodil on killustikega otseselt seotud CO₂-e emissioon katendi aluskihtides lubjakivikillustikku kasutavates stsenaariumides (Trad_PAAS ja Rootsi_PAAS) üle miljoni tonni. Vähima emissiooniga stsenaarium on Rootsi_Gneiss1, kus gneisskillustik on nii asfaldis kui ka aluses. Nende kahe stsenaariumi emissiooni erinevus on enam kui kuue kordne.

Tabel 1.33. Killustikega (aluskihis ja asfaldis olev killustik) otseselt seotud CO₂-e emissioonid stsenaariumide kaupa hindamisperioodi jooksul (renoveerimine ja ülemise asfaldikihi vahetus), CO₂ tonnides

Stsenaarium	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku
Trad_PAAS	62 250	266 309	171 426	563 921	1 063 906
Trad_Gneiss1	6 875	32 816	32 261	111 429	183 380
Trad_Gneiss2	23 329	97 795	65 628	250 637	437 389
Rootsi_PAAS	65 613	310 248	202 184	780 143	1 358 189
Rootsi_Gneiss1	6 758	32 580	28 983	95 461	163 782
Rootsi_Gneiss2	27 624	93 949	81 509	209 295	412 378

Tabelis 1.33a on killustikega otseselt ja kaudselt seotud CO₂-e emissioonid 50 aastase hindamisperioodi jooksul stsenaariumide ja teeklasside kaupa (kaudne emissioon seostub karjäärade pindala suurenemisega kaasneva CO₂-e emissiooniga pinnase orgaanilisest osast, vt tabel 1.43). Toodud andmetest nähtub, et stsenaariumide vahel on väga suured erinevused. Näiteks väheneks konstruktsioonides gneisskillustikku kasutava stsenaariumi Trad_Gneiss1 kasutulevõtul lubjakivikillustikku kasutava stsenaariumiga Trad_PAAS võrreldes kuni 2 miljonit tonni 50 aastase hindamisperioodi jooksul.

Tabel 1.33a. Killustikega (aluskihis ja asfaldis olev killustik) otseselt seotud CO₂-e emissioonid ja karjääridega laiendamisega seotud emissioon stsenaariumiti 50 a. hindamisperioodi jooksul (renoveerimine ja ülemise asfaldikihi vahetus), CO₂ tonnides

Stsenaarium	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku
Trad_PAAS	100 769	474 958	384 988	1 397 337	2 358 052
Trad_Gneiss1	6 875	32 816	32 261	111 429	183 380
Trad_Gneiss2	23 329	97 795	65 628	250 637	437 389
Rootsi_PAAS	117 061	577 140	531 478	2 321 628	3 547 306
Rootsi_Gneiss1	6 758	32 580	28 983	95 461	163 782
Rootsi_Gneiss2	27 624	93 949	81 509	209 295	412 378

Tabelis 1.34 on esitatud killustikega otseselt seotud CO₂-e emissioonid stsenaariumide hindamisperioodi 2027.aastal, mis on hindamisperioodi esimene aasta. Suurim emissioon on ootuspäraselt lubjakivikillustikku kasutavates stsenaariumides Trad_PAAS ja Rootsi_PAAS, teeklassid kokku vastavalt 21,3 ja 29,9 tuhat tonni CO₂-e. Väikseima emissiooniga stsenaarium on Trad_Gneiss1, millega seotud emissioon on ligi neli tuhat

tonni. Vahe stsenaariumiga Rootsi_Gneiss1 on seejuures väike. Esimesel hindamisaastal toimuvad emissioonide võrdlus näitab, et lubjakivikillustiku asendamisel gneisskillustikuga hakkavad emissioonid tugevasti vähenema kohe esimesel gneisskillustiku kasutamise aastal.

Tabel 1.34. Killustikega (aluskihis ja asfaldis olev killustik) seotud otsesed CO₂-e emissioonid hindamisperioodi esimesel aastal (2027). (renoveerimine ja ülemise asfaldikihi vahetus), CO₂ tonnides.

Stsenaarium	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku
Trad_PAAS	1 245	5 326	3 429	11 278	21 278
Trad_Gneiss1	149	727	693	2 412	3 981
Trad_Gneiss2	478	2 026	1 360	5 196	9 061
Rootsi_PAAS	1 430	6 730	4 437	17 337	29 934
Rootsi_Gneiss1	166	803	722	2 493	4 184
Rootsi_Gneiss2	608	2 103	1 834	5 022	9 567

Erinevate tee klasside renoveerimisega seotud emissioone (killustikega seotud CO₂ emissioon (aluskihis ja asfaldis olev killustik)) võimaldab võrrelda 1 kilomeetri tee renoveerimisega seotud emissioonide esitamise. Tabelis 1.35 on toodud 1 kilomeetri teede renoveerimisel tekkiv killustikega otseselt seotud emissioon kogu hindamisperioodi jooksul. Andmed näitavad, et lubjakivikillustiku asendamisel gneisskillustikuga tekib oluline emissiooni vähenemine kõikides teeklassides. Suurim erinevus emissioonides, 9 korda, on kõrgema klassi (14500+) teedel. Mitte ühegi teeklassi puhul ei lange emissioonide erinevus väiksemaks kui 5 korda, mis on väga tugev argument gneisskillustiku kasutuselevõtuks.

Tabel 1.35. Killustikega (aluskihis ja asfaldis olev killustik) otseselt seotud CO₂-e emissioonid stsenaariumide hindamisperioodi jooksul (1 km tee renoveerimine ja ülemise asfaldikihi vahetus), CO₂ tonnides.

Stsenaarium	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku
Trad_PAAS	13 941	8 664	4 419	2 546	3 600
Trad_Gneiss1	1 540	1 068	832	503	621
Trad_Gneiss2	5 225	3 182	1 692	1 132	1 480
Rootsi_PAAS	14 694	10 093	5 212	3 522	4 596
Rootsi_Gneiss1	1 513	1 060	747	431	554
Rootsi_Gneiss2	6 186	3 056	2 101	945	1 396

Tabelis 1.36 on toodud 1 kilomeetri tee renoveerimisega seotud emissioonid hindamisperioodi esimesel aastal 2027. Emissioonide erinevuste proportsioonid on üldjoontes sarnased 1 km renoveerimisega seotud emissioonidega hindamisperioodi jooksul.

Tabel 1.36. Killustikega (aluskihis ja asfaldis olev killustik) seotud otsesed CO₂-e emissioonid hindamisperioodi esimesel aastal (2027). (1 km tee renoveerimine ja ülemise asfaldikihi vahetus), CO₂ tonnides.

Stsenaarium	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku
Trad_PAAS	279	173	88	51	72
Trad_Gneiss1	33	24	18	11	13
Trad_Gneiss2	107	66	35	23	31
Rootsi_PAAS	320	219	114	78	101
Rootsi_Gneiss1	37	26	19	11	14
Rootsi_Gneiss2	136	68	47	23	32

Kokkuvõtlikult võib öelda, et kõikide teeklasside puhul on väikseima killustikega (aluskihis ja asfaldis olev killustik) seotud otsese emissiooniga stsenaariumid Trad_Gneiss1 ja Rootsi_Gneiss1, mis näitab ilmekalt gneisskillustiku keskkonnasõbralikkust lubjakivist valmistatud killustikuga võrreldes.

MATERJALIDEGA SEOTUD KAUSSED VÄLISKULUD

LUBJAKIVIKAEVANDUSTE LAIENEMISEGA SEOTUD VÄLISKULUD.

Lubjakivi on Eestis kasutatav oluline kohalik ehitusmaterjal. Täpsema ülevaate lubjakivi kaevandamise mahtudest ja maardlate pindaladest annavad Maavaravarude koonbilansid [12]. Eraldi peetakse arvestust ehituslubjakivi ja ehitusdolokivi kohta. Ehituslubjakivi ja ehitusdolokivi kaevandamise mahu dünaamika perioodil 2012-2023 on toodud tabelis 1.37

Tabel 1.37. Ehituslubjakivi ja ehitusdolokivi kaevandamise mahud 2012-2023

Aasta	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Tuhat m ³	2137	2332	1932	2172	2323	2717	2513	2477	2588	2450	2084	1778

Keskmiselt kaevandati perioodil 2012-2023 ehituslubjakivi ja ehitusdolokivi kokku 2292 m³ aastas. Kliimaministeeriumi maavarade osakonna eksperthinnagu kohaselt on 1 kuupmeetri monoliitse paekivi mass 2,5 tonni. Seega on perioodil 2012-2023 kaevandatud keskmiselt 5,73 miljonit tonni ehituslubjakivi ja ehitusdolokivi aastas.

Eespool viidatud Maavaravarude koondbilanssides on andmed maardlate pindalade kohta. Perioodil 2012-2023 suurenes ehituslubjakivi ja dolokivi maardlate pindala kokku 1317 hektari võrra. Keskmiselt aastas lisandunud maardlate pindala on 110 hektarit. Täpsema ülevaate Ehituslubjakivi maardlate pindaladest annab tabel 1.39 ja ehitusdolokivi maardlate pindalast tabel 1.40.

Tabel 1.39. Ehituslubjakivi maardlate pindalad aastatel 2011 ja 2023
Maavaravarude koondbilansi andmete põhjal

Maardlad maakonniti	Pindala	
	2011	2023
Harju maakond	5157,76	5365,22
HARKU	1177,53	1181,35
JÄGALA	88,67	102,38
KERNU	11,98	11,98
MAARDU	1069,14	1194,95
MAIDLA		27,45
MÄÄRA	1,15	1,15
NABALA	859,78	859,78
RUMMU	151,57	143,05
SOOKAERA	1,47	1,47
SÕRVE (RANNAMÕISA)	284,37	284,37
VALKLA	284,87	284,87
VASALEMMA	883,64	883,64
VÄO	343,59	388,78
Hiiu maakond	18,68	18,68
SUUREMÕISA	18,68	18,68
Ida-Viru maakond	699,16	687,05
KOHTLA-JÄRVE (KOLGA-SAKA)	385,02	519,36
LAAGNA	24,67	24,67
LÜGANUSE	4,73	4,73
NARVA	100,62	100,84
RANNU	171,47	
SUURKÕRTSI	12,65	37,45
Jõgeva maakond	550,8	656,24
JÕGEVA	457,76	457,76
KALANA	22,88	22,88
PAJUSI	30,06	67,69
SOPIMETSA	40,1	107,91
Järva maakond	185,99	223,25
EIVERE	55,7	55,7
KARINU	130,29	167,55
Lääne maakond	267,21	271,62
ENSE	12,21	12,21
NÕMMKÜLA	30,83	30,83
PUSKU	7,59	12
SUTLEPA (AULEPA)	184,95	184,95
UNGRU-SEPAKÜLA	31,63	31,63
Lääne-Viru maakond	2456,3	2902,2
INJU-MERIKÜLA	25,57	25,57

Maardlad maakonniti	Pindala	
	2011	2023
KUNDA	2409,8	2426,88
PAASI	9	60,36
ÄRINA	11,93	
RANNU		171,47
SUURKÕRTSI		37,45
VÖHMUTA		168,54
ÄRINA		11,93
Rapla maakond	973,42	1065,21
HÄRGLA		20
LUBJA	20,61	60,41
NABALA	859,78	859,78
ORAVA		62,61
REINU	17,14	62,41
SUTLEMA	75,89	
Saare maakond	291,24	291,24
JAAGARAHU	206,85	206,85
KOGULA	84,39	84,39
Võru maakond	12,1	12,1
TIIRHANNA	12,1	12,1
EESTI KOKKU	10612,66	11492,81

*Tabel 1.40. Ehitusdolakivi maardlate pindalad aastatel 2011 ja 2023
Maavaravarude koondbilansi andmete põhjal*

Maardlad maakonniti	Pindala	
	2011	2023
Jõgeva maakond	217,19	319,62
ADAVERE	8,58	8,58
NEANURME	4,3	4,3
PIKKNURME	24,06	24,06
PUDIVERE	22,21	22,21
RÕSTLA	117,94	120,64
SADUKÜLA		31,92
SOPIMETSA	40,1	107,91
Järva maakond	242,5	254,18
KAREDA	93,1	93,1
METSATAGUSE (METSTAGUSE)	8,7	8,7
TÄNNASSILMA	140,7	152,38
Lääne maakond	251,17	

Maardlad maakonniti	Pindala	
	2011	2023
KUREVERE	251,17	
Lääne-Viru maakond	25,57	25,57
INJU-MERIKÜLA	25,57	25,57
Pärnu maakond	695,04	1021,45
ANELEMA	87,62	99,84
KOBRA		14,47
KOONGA	579,6	586,98
KUREVERE		251,17
TAMME	20,97	20,97
TARVA	6,85	48,02
Rapla maakond	631,76	623,73
HÕREDA	7,36	7,36
LUBJA	20,61	12,58
ORGITA-HAIMRE	603,79	603,79
Saare maakond	463,22	576,19
KAARMA		109,33
KOGULA	84,39	84,39
KOGUVA	76,52	76,52
SELGASE (MUSTJALA)	201,11	204,76
TAGAVERE	101,2	101,19
Viljandi maakond	103,41	103,41
ARUSSAARE	45,94	45,94
LOOPRE	57,47	57,47
Võru maakond	90,13	232,93
KALKAHJU	36,64	83,47
MARINOVA	53,49	75,55
NAHA		73,91
EESTI KOKKU	2 719,99	3157,08

Nagu toodud andmetest nähtub suurenes perioodil 2012-2023 maardlate pindala kokku 1317 hektarit ja aastas keskmiselt 110 hektarit. Kuigi maardlate aluse pindala laienemisega kaasneb mitmeid maakasutuse piiranguid (näit elamuehituse vallas), ei tähenda maardlate pindalade suurenemine lubjakivi kaevandamise algust kogu maardla territooriumil.

Karjäärade pindala suurenemisega kaasneb märkimisväärne CO₂-e emissioon, sest mullas sisalduv süsinik lendub süsinikdioksiidina atmosfääri, lisandudes LULUCF järgi emissioonina bilanssi. Vastavalt Eesti maismaaökosüsteemide hüvede (ökosüsteemiteenuste) sotsiaalmajandusliku väärtuse üleriigiline hindamise ja kaardistamise raportile (ELME 2) on Eesti keskmine mulla CO₂ sisaldus 3152 tonni hektari kohta [13].

Selleks, et leida kaevandatava lubjakivikillustiku CO₂ emissioon, mis on seotud karjääride pindala suurenemisega, tuleb karjääride pindala suurenemine siduda kaevandatava lubjakiviga.

Vastavalt Kliimaministeeriumi maavarade osakonna eksperthinnangule saab karjääride füüsilise laienemise siduda kaevandatava lubjakivi kogusega, eeldades, et kaevandatava kihi paksus on keskmiselt 10 meetrit. Seega on ühelt hektarilt võimalik kaevandada 250 tuhat tonni lubjakivi. Arvestades, et aastas on kaevandatud keskmiselt 5,7 miljonit tonni ehituslubjakivi ja ehitusdolokivi, on karjääride pindala suurenenud ligikaudu 23 hektari võrra aastas.

Teede katendikonstruktsioonides on lubjakivikillustik kõige suurema mahuga kasutatav materjal. Näiteks on E280 ja E240 lubjakivikillustikku aastane vajadus kokku traditsioonilises stsenaariumis 1617682 tonni (ümaratult 1,618 miljonit tonni). Oluline on silmas pidada, et vastavalt TTÜ Geoloogia instituudi eksperthinnangule saab ühest kuupmeetrist kaevandavavast lubjakivist 1,2 kuupmeetrit killustikku, mille mass on keskmiselt 1,92 tonni. Kokku saaks aastas keskmiselt kaevandatavast 5,7 miljonist tonnist lubjakivimassist 4,377 miljonit tonni lubjakivikillustikku, millest riigimaanteede ehituseks ja renoveerimiseks vajatakse aastas vastavalt käesolevas töös olevatele arvutustele 1,697 miljonit tonni. Sellise killustikukoguse saamiseks suureneb karjääride pindala 8,9 hektari võrra. See näitaja võetaksegi karjääride laienemisega seotus CO₂-e emissioonidega seotud väliskulude hindamise aluseks, millel põhineb traditsioonilises stsenaariumis kasutatava lubjakivikillustiku karjääridega seotud väliskulude kvantifitseerimine.

Kui 1,618 miljoni tonni lubjakivikillustiku tootmisega seoses suureneb karjääride pindala 8,9 hektarit aastas, siis ühe tonni lubjakivikillustiku tootmisega seostatav karjääride pindala kasv on 0,0000053 hektarit.

Kui pinnase orgaanilise osa (mulla) keskmine CO₂ sisaldus on 3152 tonni/ha, siis 0,0000053 ha pinnase orgaaniline osa sisaldab 0,016 tonni ehk 16 kg süsinikdioksiidi (CO₂). Saadud tulemus on aluseks karjääride pindala suurenemisega seotud väliskulude kvantifitseerimisel.

EESTI ELANIKE MAKSEVALMIDUS LUBJAKIVIKARJÄÄRIDE LAIENEMISE PEATUMISE EEST

TURUVÄLISTE LOODUSVÄÄRTUSTE MAJANDUSLIK HINDAMINE

Iga inimese hinnangus oma elu kvaliteedile sisaldub hinnang tema elatustasemele ja tema poolt tunnetatavatele-hinnatavatele-vajalikuks peetavatele turuvälistele hüvedele. Teoreetiliselt võib iga inimene hinnata, millise (kui suure) osa oma sissetulekust on ta valmis ohverdama (kui palju tahab kulutada) soovitud mittemajandusliku hüve saavutamiseks - eesmärgiga tõsta oma heaolu. Igal turuvälisel hüvel on iga inimese jaoks erinev ja veel ajaski muutuv rahaline ekvivalent.

Paljud looduse väärtused on turuvälised, Indiviidide majanduslikku hinnangut nendele väärtustele näitab valmidus maksta loodusobjekti kui väärtuse kandja säilitamise või taastamise eest. Metoodiliselt õigesti väljaselgitatud maksevalmidus annabki informatsiooni säilitatud looduse väärtuste ja ära hoitud kahju rahaliste ekvivalentide kohta [14].

Käesolevas töös on selleks vaadeldavaks turuväliseks hüveks, mida kvantifitseeritakse, Eesti lubjakivikarjäärade pindala kasvu pidurdumine, millel on positiivne mõju inimeste heaolule. Hästi võtab lubjakivi kaevandamise- ja kaevanduste laienemisega seotud probleemid kokku Jõelähtme valla üldplaneeringu ruumilise keskkonna analüüs [15]: „Jõelähtme vald on rikas vald maavarade poolest. Vallas leidub kõige enam ehituslubjakivi, mille lasund on hästi uuritud ja maardlatena arvele võetud. Seetõttu on antud alal kaevandus- ja uuringulubasid antud lähestikku paiknevatele aladele. See tingib põhjendatult kohaliku omavalitsuse ja elanike hirmu kaevandusalade laienemise ja sellega kaasnevate mõjude nagu maastiku pöördumatu muutmine ning tolmu, müra ja transpordi osakaalu järsk suurenemine osas“.

Ülaltoodud tsitaadis on esitatud elanikkonna põhilised heaolu negatiivselt mõjutavad muutused, mis assotsieeruvad lubjakivi kaevandamisega ja eriti kaevandusala laienemisega. See lubas püstitada hüpoteesi, et lubjakivikaevanduste laienemise peatumise järele on Eesti elanikel märkimisväärne nõudlus, mis representatiivse valimi maksevalmiduse uurimisel leidis ka kinnitust.

TINGIMUSLIKU HINDAMISE (INGL. K. *CONTINGENT VALUATION*) MEETOD. MAKSEVALMIDUS KUI TINGLIKU HINDAMISE VÄLJUND.

Tingliku hindamise puhul on eesmärgiks selgitada küsitletute maksevalmidus kaupade, projektide või programmide eest, mis on oma olemuselt hüpoteetilised. Küsitletavate poolt hinnatavale objektile maksevalmiduse kujul omistatav väärtus on tinglik küsitluses konstrueeritud või simuleeritud turu (või turustsenaariumi) suhtes [16]. Kui mingile kaubale puudub tegelik turg (s.t. kaup on turuväline), tuleb see luua hüpoteetiliselt. Inimestelt küsitakse, kui palju on nad nõus maksma turuvälise hüve kvaliteedi või kvantiteedi suurenemise (vähendamise ärahoidmise) eest, mida loetaksegi maksevalmiduseks. Suurem osa tingliku hindamise meetodi rakendusi on seotud keskkonnaobjektide ja teiste selliste turuväliste kaupadega, millel on üldkasuliku hüve tunnused.

20. sajandi viimastel aastakümnetel on tingimusliku hindamise meetod muutunud üha populaarsemaks ning on laialt levinud kõigis arenenud demokraatlikes riikides, olles heaks kvantitatiivseks sisendiks sotsiaalses tasuvusanalüüsis turuväliseid komponente sisaldavate omavahel konkureerivate või üksteist välistavate arendus- ja ressursikasutus stsenaariumide võrdlemisel.

Tingimusliku hindamise meetodit (ingl.k. *contingent valuation*) peetakse looduse turuväliste kaupade ja teenuste hindamisel nende väärtuse rahalise ekvivalendi väljaselgitamisel väga usaldusväärseks. Samuti on meetod universaalne, sobides praktiliselt väga eritüübiliste turuväliste keskkonnakaupade rahalise ekvivalendi väljaselgitamiseks. Vaatamata laiale levikule just akadeemilisemat laadi uurimistöodes on meetodi suureks puuduseks kulukate eriuuringute vajadus meetodi igakordsel rakendamisel. Tingimusliku hindamise meetodikat on ammendavalt käsitletud Carson [17].

Eestis alustati tingimusliku hindamise meetodi rakendamisega 21. sajandi alguses [18]. Viimastel aastatel on tingimusliku hindamise meetodiga saadud ökosüsteemi turuväliste teenuste rahaline ekvivalent oluliseks sisendiks ökosüsteemide teenuste statistikasse [19], [20].

Metoodika ja tulemused

Püstitatud uurimisülesande täitmiseks viidi läbi tingimusliku hindamise (ingl.k. *contingent valuation*) uuring, mille käigus küsitleti ca 1000 liikmelist eesti täiskasvanud elanikkonna suhtes representatiivset valimit. Töös läbi viidud analüüsi aluseks on 906 nõuetele vastavalt täidetud ankeeti. Kõik kohtumised valimi liikmetega viidi läbi küsitleja ja intervjuueeritava kohtumisena ja ankeedid täideti paber kandjal. Lisaks tingimusliku hindamise uuringule omastele küsimustele maksevalmidusest sisaldas ankeet ka küsimusi vastajate informeeritusest lubjakivikarjäärade kohta ja suhtumisest nende pindala suurenemisse (vt tabel 1.41).

Tabel 1.41. Vastuste jaotumine lubjakivikarjäärade kohta käivatele küsimustele

Küsimuse nr.	Vastusevariandid	1. Kas Te olete näinud paekarjääre?		2. Kas peate õigeks paekarjäärade laienemist?		3. Kas paekivikarjäärade rajamine loodusesse Teie arvates		4. Kas pooldate teedeehituses paekivikillustiku asendamist kohaliku gneisskillustikuga?	
		Vastajate arv	%	Vastajate arv	%	Vastajate arv	%	Vastajate arv	%
1.	1 - Jah, olen paekarjääre külastanud.	508	56,1						
	2 - Jah, olen paekarjääre näinud fotodel	303	33,4						
	3 - Ma ei ole paekarjääre näinud	95	10,5						
2.	1 - Jah, kui see on majanduslikult põhjendatud			214	23,7				
	2 - Jah, kui see ei asu minu elukoha lähedal			109	12,1				
	3 - Jah, kui see ei kahjusta loodust			270	29,9				
	4 - Ei, sest keskkonda rikkumata ei ole võimalik paekivi kaevandada			241	26,7				
	5 - Ei oska öelda			70	7,7				
3.	1 - Rikub looduskeskkonda					610	67,3		
	2 - Muudab üksluse looduse vaheldusrikkamaks					71	7,8		
	3 - Kui paekivikillustikku on ehituseks vaja, siis ei ole keskkond oluline					95	10,5		
	4 - Ei oska öelda					130	14,3		
4.	1 - Ei, sest paekivi kaevanduste omanikel on							97	10,8

Küsimuse nr.	Vastusevariandid	1. Kas Te olete näinud paekarjääre?		2. Kas peate õigeks paekarjääride laienemist?		3. Kas paekivikarjääride rajamine loodusesse Teie arvates		4. Kas pooldate teedeehituses paekivikillustiku asendamist kohaliku gneisskillustikuga?	
	õigustatud ootus saada tulu								
	2 - Jah, sest gneisskillustiku kasutuselevõtt hoiab ära uute paekarjääride rajamise							551	61,1
	3 - Ei oska öelda							254	28,2
KOKKU		906	100,00	904	100,0	906	100,0	902	100

Maksevalmiduse küsimusele oli formuleeritud järgmiselt: „**Milline oleks rahasumma, mida ise oleksite igal aastal valmis maksma selle eest, et uusi paekivikarjääre ei avataks ja looduskeskkond jääks kahjustamata?**“. Küsimuse vastus oli nn avatud lõpuga: Olen valmis maksma paekivikarjääride avamata jätmise ja looduskeskkonna säilitamise eest..... eurot aastas. Maksevalmiduse küsitluse tulemused on toodud tabelis 1.42 ja joonisel 1.10.

Maksevalmiduse küsimusele lisaks esitatud küsimuste vastused isaks esitatud küsimused koos vastuste jagunemisega on toodud tabelis 44. Esimesele küsimusele „Kas te olete näinud paekarjääre?“ vastas jaatavalt tervelt 56% küsitletutest. See karjääride kogu pindala silmas pidades üllatavalt suur osakaal ja näitab, et üle poole inimestest omab paekarjääridest head ettekujutust. Neid vastajaid, kes ei olnud paekarjääre ei vahetult ega fotol, oli ainult 10,5%. Paekarjäärid ja nende mõju keskkonnale on Eesti elanike poolt hästi teadvustatud, mida näitab ka märkimisväärne kvantifitseeritud nõudlus karjääride pindalade edasise laienemise peatamiseks.

Teisele küsimusele „Kas peate õigeks paekivikarjääride laienemist?“ ei antud lihtsalt ei/jah vastusevariante vaid need formuleeriti elanike arvamuse nüansseeritumaks väljas selgitamiseks tingimuslikult (vt tabel 44). Kõige rohkem vastanutest (29,9%) oli paekivikarjääride laienemisega nõus, kui see ei kahjusta loodust. Ligikaudu samasugune oli nende osakaal (26,7%), kes arvasid, et keskkonda rikkumata ei ole võimalik paekivi kaevandada. Vaid 12,1% oli kaevandamisega nõus tingimusel, et kaevandus ei asu nende kodukoha lähedal. Oma arvamus karjääride laienemise küsimuses puudus vaid 7,7 protsendil vastanutest.

Kolmandale küsimusele „Kas paekivikarjääride rajamine loodusesse Teie arvates....?“ valis vastuse „Rikub looduskeskkonda tervelt 67,3% vastanutest. 10,5 % arvas, et kui paekivikillustikku on ehituseks vaja, siis ei ole keskkond oluline. Oma seisukoht puudus selles küsimuses 14,3 protsendil vastanutest.

Viimasele lisaküsimusele „Kas pooldate teedeehituses paekivikillustiku asendamist kohaliku gneisskillustikuga?“ vastas 61 protsenti küsitletutest jaatavalt, sest gneissidest valmistatud killustiku kasutuselevõtt hoiab ära uute paekarjääride rajamise. Vaid 10,8 protsenti valis vastuse, et ei poolda gneissidest valmistatud killustiku kasutuselevõttu, sest paekivi kaevanduste omanikel on õigustatud ootus saada tulu. Suhteliselt suur

(28,2%) oli paekivikillustiku asendamise küsimuses seisukohta mitte omavate vastajate osakaal.

Kokkuvõtvalt võib täiendavate küsimuste põhjal järeldada, et enamus Eesti elanikke on paekivikarjääre näinud, on veendunud, et need rikuvad looduskeskkonda ning pooldavad paekivikillustiku asendamist gneissidest valmistatud killustikuga. Kõike neid seisukohti toetab ka Eesti elanike märkimisväärne kvantifitseeritud nõudlus paekivikarjäärade laienemise peatamiseks.

Küsitlute maksevalmiduse jagunemine sotsiomeetriliste näitajate järgi on esitatud tabelis 1.42. Lisaks aritmeetilisele keskmisele, mille põhjal leitakse Eesti täiskasvanud elanikkonna agregeeritud kogumaksevalmidus, on tabelis toodud ka vastavate sotsiomeetriliste näitajatega gruppide mediaanmaksevalmidused.

Tabel 1.42. Maksevalmiduse jagunemine sotsiomeetriliste näitajate järgi

	Vastajate arv	Keskmine maksevalmidus, eur	% kogukeskmisest	Mediaan, eur	% kogukeskmisest
Sugu:					
Mees	444	32,2	93,9	10	66,7
Naine	462	36,3	105,8	20	133,3
Haridus:					
Põhi	48	36,0	105,0	10	66,7
Kesk	450	30,7	89,5	10	66,7
Kõrgem	408	38,0	110,8	20	133,3
Vanus:					
18-23	163	25,2	73,6	12	80,0
24-29	126	35,0	102,2	15	100,0
30-39	124	41,3	120,3	20	133,3
40-49	141	48,1	140,1	25	166,7
50-59	126	36,4	106,1	20	133,3
60-69	115	32,1	93,7	15	100,0
70 ja enam	111	21,2	61,9	10	66,7
Keskmine kuusissetulek:					
500 või vähem	125	27,6	80,3	10	66,7
501-800	140	22,8	66,4	10	66,7
801-1000	96	30,7	89,5	12	80,0
1001-1300	136	35,9	104,7	15	100,0
1301-2000	217	39,2	114,3	20	133,3
üle 2000	191	42,3	123,4	20	133,3
Kogukeskmine		34,3	100	15,0	100

Meeste ja naiste aritmeetiline keskmine maksevalmidus erineb vähe, meestel on see 93,9 ja naistel 105,8 protsenti kogukeskmisest. Samas on meeste maksevalmiduse mediaan 10 eurot naiste 20 euro vastu. Sellest võib järeldada, et meeste maksevalmidus on varieeruvam, ja suurema maksevalmidusega meeste osakaal on tõenäoliselt suurem.

Suhteliselt ühtlane on aritmeetilise keskmise maksevalmiduse jagunemine ka hariduse järgi, kõrgema haridusega vastanutel on maksevalmidus 110,8 protsendiga pisut suurem põhi (105,0%) ja keskharidusega (89,5%) vastanutest. Samas on kõrgharidusega vastajate maksevalmiduse mediaan 20 eurot teiste rühmade 10 euro vastu.

Maksevalmiduse jaotumine vanuse järgi näitab vanuserühmade vahel küllaltki suuri erinevusi. Kõige väiksem maksevalmidus on noorimas (18-23; 73,6% kogukeskmisest) ja vanimas (70 ja enam; 61,9% kogukeskmisest) vanuserühmas. Maksevalmidus kasvab ühtlaselt nii noorima kui vanima vanuserühma poolt keskmise vanuserühmani (40-49; 140,1% kogukeskmisest) liikudes, kus maksevalmidus on suurim. Sama mustrit jälgib ka maksevalmiduse mediaan. Sellist tulemust võib pidada ootuspäraseks, sest esiteks on keskmised vanuserühmad suure tõenäosusega materiaalselt paremini kindlustatud ja arvatavasti ka paremini informeeritud, mille tõttu on paekarjäärde laienemisega seotud küsimused nende heaolu determinandina suhteliselt olulisemal kohal.

Viimane küsitud näitaja, keskmine kuusissetulek (neto), näitab maksevalmiduse sõltuvust sissetuleku suurusest. Kuigi vähim (66,4% kogukeskmisest) ei ole maksevalmidus mitte väikseima sissetulekuga rühmas (alla 500 euro kuus), vaid järgmises sissetulekuvahemikus (501-800 eurot kuus). Suurim on maksevalmidus suurima (üle 2000 euro kuus) sissetulekuga rühmas.

EESTI TÄISEALISE ELANIKKONNA KOGUNÕUDLUS PAEKARJÄÄRIDE LAIENEMISE PEATUMISE JÄRELE

Töö alusandmestikuks on Eesti täisealise elanikkonna representatiivse valimi maksevalmiduse küsitlus paekivikarjäärde laienemise peatumise kohta. Selle põhjal selgitatakse välja kogunõudlusfunktsioon paekivikarjäärde laienemise peatumise järele ja konstrueeritakse nõudluskõver (joonis 1.10).

Kõige paremini vastab Maksevalmiduse tegelikule jaotusele kirjeldavale kõverale funktsioon

$$WTP = \alpha e^{-\beta x}$$

Kus tähistab WTP maksevalmidust eurodes, x on inimeste arv tuhandetes, kes on valmis konkreetse summa maksma; α ja β on hinnatavad parameetrid.

Joonis 1 näitab maksevalmiduse tegelikku jaotust ja tarkvara poolt produtseeritud sellele vastavat graafiku võrrandit

$$WTP = 183,24 e^{-0,005x}$$

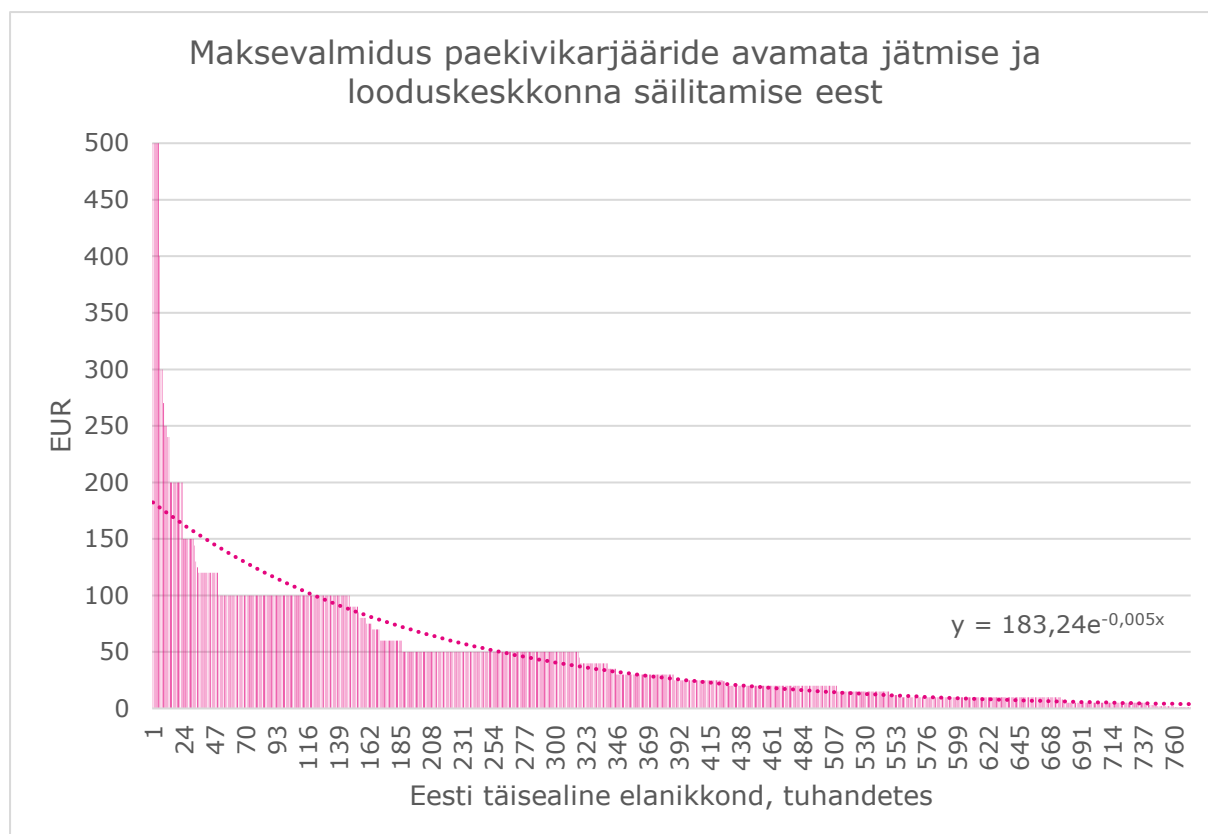
Kus hinnatavad parameetrid $\alpha = 183,24$ ja $\beta = 0,005$

Eesti elanikkonna kogunõudlus lubjakivikarjäärde pindala suurenemise peatumise järele on matemaatiliselt võrdeline joonisel oleva nõudluskõvera all oleva pindalaga. Kogunõudlus (CS- *consumer surplus*) leitakse joonisel oleva nõudluskõvera integreerimisel vastavalt valemile:

$$CS = \int_{x_1}^{x_2} WTP(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} \alpha e^{-\beta x} dx = -\frac{\alpha}{\beta} (e^{-\beta x_2} - e^{-\beta x_1}) \cong \frac{\alpha}{\beta}$$

Kus CS on kogumaksevalmidus ja x_1 on 0 ja x_2 positiivse maksevalmidusega inimeste hulk.

Eesti tööelise elanikkonna kogunõudluskõver paekarjäärade pindala suurenemise peatumise järele on $\alpha/\beta = 183,24/0,005 = 36648$ tuh. €



Joonis 1.10. Eesti tööelise elanikkonna maksevalmidus paekarjäärade laienemise peatumise eest

Nagu kogunõudlusfunktsioonist nähtub, on Eesti tööelise elanikkonna kogunõudlus lubjakivikarjäärade laienemise peatumise järele on 36,648 miljonit eurot aastas. See nõudlus on ülekantav karjäärade laienemist põhjustavale lubjakivi kaevandamisele ja kaevandatud lubjakivi massile.

Arvestades teede ehituse ja renoveerimise stsenaariumide keskmist lubjakivikillustiku vajadust, võib väita, et gneissidest valmistatud killustiku kasutuselevõtu korral pidurdub lubjakivikaevanduste pindala aastane juurdekasv ligikaudu 38%. Proportsioonina kogumaksevalmidusest kaevanduste pindala kasvu täielikuks peatumiseks on see 14,195 miljonit eurot aastas. Arvestades käeolevas töös toodud seost lubjakivi kaevandamise mahu ja kaevanduiste pindala suurenemise vahel, on 1 tonni lubjakivikillustiku tootmisega kaasneva karjäärade pindala laienemisega seostatav heaolu kadu 8,5 eurot. See on käsitletav karjäärade laienemisest tingitud sotsiaalse kahjuna

killustiku tootmisega kaasneva karjäärade pindala suurenemisest tingitud kaudsete väliskulude arvutamise aluseks.

KOKKUVÕTE GRANIIDIST, LUBJAKIVIST JA GNEISSIDEST VALMISTATUD KILLUSTIKEGA SEOTUD VÄLISKULUDEST

Tabelis 1.43 on toodud teede konstruktsioonide stsenaariumides kasutatavate killustike (graniitkillustik, gneisskillustik, lubjakivikillustik) materjaliga ja karjäärade laienemisega seotud väliskulud killustiku ühe tonni kohta. Tabelis olevate kaevanduste laienemisega seotud väliskulude saamise meetodikaid ja vastavaid arvutuskäike on käsitletud detailsemalt käesoleva aruande eelmistes peatükkides. Materjalide ja materjalide meretranspordi väliskulud on esitatud vastavas peatükis.

Tabelis 1.43 on eraldi välja toodud materjalidega seotud väliskulud ja karjäärade laienemisega seotud sotsiaalsed kulud. Kui esimesed on klassikalise sotsiaalse tasuvusanalüüsi sisendid, siis karjäärade laienemisega seotud väliskulude väljaselgitamine eeldab spetsiaalseid uuringuid ja nende andmete kasutamine (või mittekasutamine) analüüsi sisendina sõltub andmete olemasolust.

Tabel 1.43. Killustikega seotud otsesed ja kaudsed väliskulud

		Graniitkillustik		Gneisskillustik		Lubjakivi killustik	
		kg CO2/tonn	maksumus 2027. a, EUR/t	kg CO2/tonn	maksumus 2027. a, EUR/t	kg CO2/tonn	maksumus 2027. a, EUR/t
Otsene	Materjaliga seotud emissioon	6,00	1,194	0,25	0,050	6,00	1,194
Otsene	Meretranspordi emissioon	5,32	1,059				
Kaudne	Karjäärade laienemisega seotud emissioon					16,00	3,20
Kaudne väliskulu	Heaolu kadu karjäärade pindala suurenemise tõttu, EUR /tonn aastas						8,50
	Kokku	11,32	2,253	0,25	0,050	22,00	12,894

Kui materjalidega seotud väliskulud on lubjakivikillustikul ja graniitkillustikul võrdsed (1,194 eurot/tonni materjali kohta), siis karjäärade laienemise väliskulude erinevus on materjaliti märkimisväärne. Lubjakivikillustiku karjäärade laienemisega seotud kaudse emissiooni rahaline ekvivalent on 3,2 eurot tonni lubjakivikillustiku kohta ja karjäärade laienemisest tingitud heaolu kaoga seotud väliskulu on 8,5 urot tonni lubjakivikillustiku kohta.

Erinevatest materjalidest valmistatud killustike kaevandamisega seotud väliskulude erinevused on suhteliselt suured. Ühe tonni lubjakivikillustiku kõikide kvantifitseeritud väliskulude rahaline ekvivalent on ligikaudu 13 eurot tonni kohta, mis annab väliskulude materjali maksumusse sisestamisel teistest materjalidest valmistatud killustikele võrreldes lubjakivikillustikuga eelise. Teiste materjalide eelis säilib ka siis, kui kvantifitseeritud nõudlust paekivikarjääride laienemise peatumise järele mitte arvestada.

Tabelis 1.44 on eelmises tabelis toodud killustikele omistatud väliskulud seotud kuue analüüsitava teede ehituse stsenaariumiga. Esitatud andmed on ühe aasta kohta ja CO₂ emissiooni maksumus on arvatatud 2027. a hindades. Killustike võrreldavuse huvides on stsenaariumide väliskuludes arvesse võetud ainult killustikega seotud väliskulud. Välja on jäetud näiteks asfaldi bituumeni komponendiga seotud väliskulu.

Tabel 1.44. Stsenaariumide võrdlus killustike massi ja killustikega seotud väliskulude alusel, teede remont ühel aastal, 2027. a CO₂ hind

Materjal/Stsenaarium	PAAS-traditsiooniline	PAAS-Rootsi	GNEISS-traditsiooniline	GNEISS-Rootsi	GNEISS 2-traditsiooniline	GNEISS 2-Rootsi
Paekivikillustik E240, 280						
materjal, teeklassid kokku, tuh.t	1618	3040				
materjali tootmise väliskulu, tuh.EUR	1932	3630				
karjääride laienemise väliskulu, tuh.EUR	5134	9648				
karjääride laienemise sotsiaalne kahju, tuh. EUR	13619	25597				
Kokku väliskulud, tuh.EUR	20685	38866				
Graniit						
materjal, teeklassid kokku, tuh.t	594	551			398	371
materjali tootmise väliskulu, tuh.EUR	709	658			475	443
meretranspordi väliskulu, tuh.EUR	628	583			422	393
Kokku väliskulud, tuh.EUR	1337	1241			897	836
Gneiss						
materjal, teeklassid kokku, tuh.t			2484	4303	2086	3932
materjali tootmise väliskulu, tuh.EUR			124	214	104	196
Kokku väliskulud, tuh.EUR			124	214	104	196
Väliskulud kokku, tuh.EUR	22022	40107	124	214	1001	1032

Kõikide väliskulude sisestamisel muutuvad lubjakivikillustikku kasutavad stsenaariumid teiste, lubjakivi mitte sisaldavate stsenaariumidega kulukaks. Ühe aasta (2027) lõikes on

kõige väiksemate killustikega seotud väliskuludega stsenaarium „GNEISS traditsiooniline“, mille väliskulud on 2027. a CO2 hindades 124 tuhat eurot. Kõige suuremate väliskuludega stsenaariumiks on „PAAS Rootsi“ 40 miljoni euroga. Stsenaariumide võrdlus teeklasside kaupa on esitatud tabelis 1.45.

Järgmises peatükis esitatavas detailsemates teede stsenaariumide väliskulude arvutustes on karjääride laienemisega seotud väliskulud stsenaariumide eluea väliskulude arvutustes välja jäetud ja arvesse võetud peamiselt nõ „klassikalisi“, materjalidega seotud väliskulusid. Kaudsete (karjääridega seotud) väliskulude kohta on tehtud tundlikkuse analüüs.

Tabel 1.45. Killustike vajadus teede remondil ja vastavad killustikega seotud väliskulud ühel aastal (2027. a. CO2 hindades). Stsenaariumide võrdlus riigimaanteede teeklasside kaupa

Materjal/Stsenaarium	PAAS-traditsiooniline	PAAS-Rootsi	GNEISS-traditsiooniline	GNEISS-Rootsi	GNEISS 2-traditsiooniline	GNEISS 2-Rootsi
Paekivikillustik						
Materjali kulu teeklassiti, tuh. t						
14500+	48	71				
6000-14500	261	371				
3000-6000	267	457				
500-3000	1042	2141				
Teeklassid kokku, tuh. t	1618	3040				
Tootmise väliskulud, tuh.EUR						
14500+	57	85				
6000-14500	311	443				
3000-6000	319	546				
500-3000	1244	2556				
Teeklassid kokku, tuh.EUR	1932	3630				
Karjääride laienemise väliskulu, tuh.EUR						
14500+	153	227				
6000-14500	828	1176				
3000-6000	847	1451				
500-3000	3306	6794				
Teeklassid kokku, tuh.EUR	5134	9648				
Karjääride laienemise sotsiaalne kahju, tuh.EUR						
14500+	406	602				
6000-14500	2196	3121				
3000-6000	2248	3850				
500-3000	8870	18025				
Teeklassid kokku, tuh.EUR	13720	25598				
Kokku väliskulud						
14500+	981	1457				
6000-14500	5317	7557				

Materjal/Stsenarium	PAAS-tradit-siooniline	PAAS-Rootsi	GNEISS-tradit-siooniline	GNEISS-Rootsi	GNEISS 2-tradit-siooniline	GNEISS 2-Rootsi
3000-6000	5442	9323				
500-3000	13420	27375				
Teeklassid kokku, tuh.EUR	14603	45712				
Graniit						
Materjali kulu teeklassiti, tuh. t						
14500+	53	55			21	22
6000-14500	229	212			65	65
3000-6000	60	55			60	55
500-3000	252	229			252	229
Teeklassid kokku, tuh. t	594	551			398	371
Tootmise väliskulud, tuh.EUR						
14500+	63	66			25	27
6000-14500	273	253			78	78
3000-6000	72	66			72	66
500-3000	300	273			300	273
Teeklassid kokku, tuh.EUR	709	658			475	443
Meretranspordi väliskulu, tuh.EUR						
14500+	56	58			22	24
6000-14500	242	225			69	69
3000-6000	64	58			64	58
500-3000	266	242			266	242
Teeklassid kokku, tuh. EUR	628	583			422	393
Kokku väliskulud						
14500+	119	124			48	50
6000-14500	516	478			147	147
3000-6000	136	124			136	124
500-3000	567	515			567	515
Teeklassid kokku, tuh.EUR	1337	1241			897	836
Gneiss						
Materjali kulu teeklassiti, tuh. t						
14500+			99	139	78	116
6000-14500			533	645	468	579
3000-6000			377	617	317	562
500-3000			1475	2903	1223	2675
Teeklassid kokku, tuh. t			2484	4303	2086	3932
Tootmise väliskulud, tuh.EUR						
14500+			5	7	4	6
6000-14500			27	32	23	29
3000-6000			19	31	16	28
500-3000			73	144	61	133
Teeklassid kokku, tuh.EUR			124	214	104	196

Materjal/Stsenarium	PAAS-traditsiooniline	PAAS-Rootsi	GNEISS-traditsiooniline	GNEISS-Rootsi	GNEISS 2-traditsiooniline	GNEISS 2-Rootsi
MATERJALI KULU KOKKU, tuh. t	2211	3591	2484	4303	2484	4303
KÕIK OTSESED JA KAUDSED VÄLISKULUD KOKKU, tuh.EUR	22123	40117	124	214	1001	1032

Tabelis 1.46 on toodud teede stsenaariumides kasutatavate lubjakivikillustike E240 ja E280, graniitkillustiku ja gneisskillustiku kõik väliskulud stsenaariumide kaupa. Esitatud andmed võimaldavad võrdlevalt vaadata kõigi kasutatavate killustiku liikide mahtusid ja väliskulusid kõigi teeklasside puhul 1 km tee remondil.

Tabel 1.46. Killustike vajadus ja vastavad väliskulud 1 km tee remondil 2027.a. Stsenaariumide võrdlus riigimaanteed teeklasside kaupa

Materjal/Stsenarium	PAAS-traditsiooniline	PAAS-Rootsi	GNEISS-traditsiooniline	GNEISS-Rootsi	GNEISS 2-traditsiooniline	GNEISS 2-Rootsi
Paekivikillustik						
Materjali kulu teeklassiti, tuh.t						
14500+	10,82	16,06				
6000-14500	8,48	12,05				
3000-6000	6,88	11,79				
500-3000	4,70	9,67				
Teeklassid kokku, tuh.t	5,47	10,29				
Tootmise väliskulud, tuh.EUR						
14500+	12,92	19,17				
6000-14500	10,13	14,39				
3000-6000	8,21	14,07				
500-3000	5,62	11,54				
Teeklassid kokku, tuh.EUR	6,54	12,29				
Karjäärade laienemise väliskulu, tuh.EUR						
14500+	34,33	50,94				
6000-14500	26,92	38,25				
3000-6000	21,83	37,41				
500-3000	14,92	30,67				
Teeklassid kokku, tuh.EUR	17,51	32,63				
Karjäärade laienemise sotsiaalne kahju, tuh.EUR						
14500+	91,10	135,20				
6000-14500	71,41	101,49				
3000-6000	57,92	99,24				
500-3000	39,60	81,37				
Teeklassid kokku, tuh.EUR	46,01	86,63				

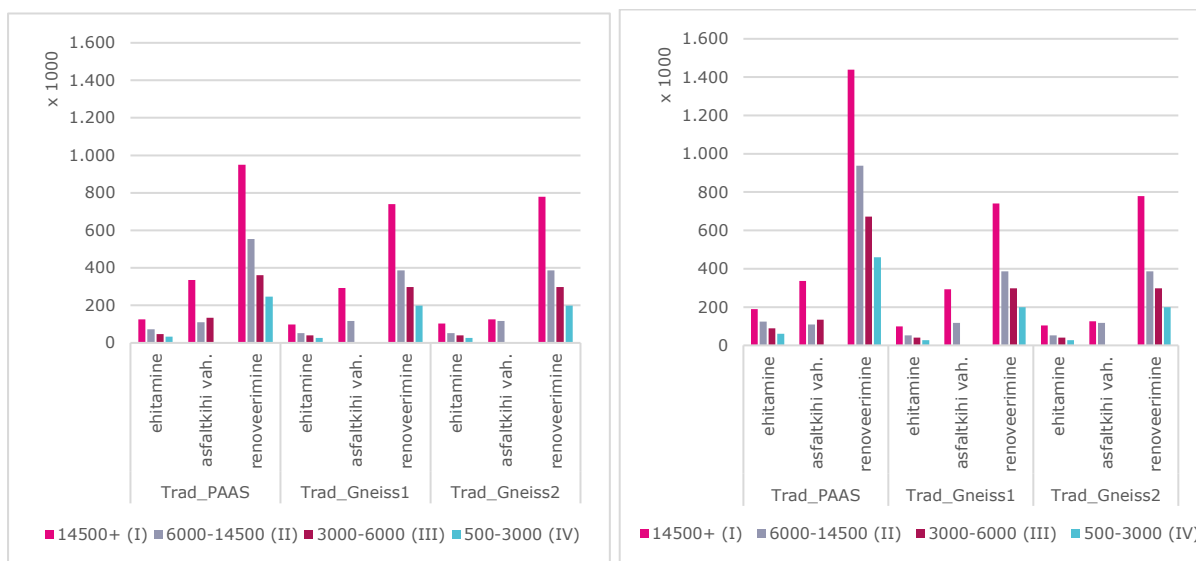
Materjal/Stsenarium	PAAS-tradit-siooniline	PAAS-Rootsi	GNEISS-tradit-siooniline	GNEISS-Rootsi	GNEISS 2-tradit-siooniline	GNEISS 2-Rootsi
<i>Kokku väliskulud</i>						
14500+	138,35	205,84				
6000-14500	108,46	154,13				
3000-6000	87,96	150,72				
500-3000	60,14	123,58				
<i>Teeklassid kokku, tuh.EUR</i>	67,15	126,8				
Graniit						
<i>Materjali kulu teeklassiti, tuh.t</i>						
14500+	11,90	12,40			4,75	5,00
6000-14500	7,44	6,90			2,12	2,12
3000-6000	1,55	1,42			1,55	1,42
500-3000	1,14	1,03			1,14	1,03
<i>Teeklassid kokku, tuh.t</i>	2,01	1,86			1,35	1,26
<i>Tootmise väliskulud, tuh.EUR</i>						
14500+	14,21	14,81			5,68	5,98
6000-14500	8,89	8,24			2,53	2,53
3000-6000	1,86	1,70			1,86	1,70
500-3000	1,36	1,23			1,36	1,23
<i>Teeklassid kokku, tuh.EUR</i>	2,40	2,23			1,61	1,50
<i>Meretranspordi väliskulu, tuh.EUR</i>						
14500+	12,60	13,13			5,03	5,30
6000-14500	7,88	7,30			2,25	2,25
3000-6000	1,64	1,51			1,64	1,51
500-3000	1,20	1,09			1,20	1,09
<i>Teeklassid kokku, tuh.EUR</i>	2,13	1,97			1,43	1,33
<i>Kokku väliskulud</i>						
14500+	26,80	27,94			10,71	11,27
6000-14500	16,77	15,54			4,78	4,78
3000-6000	3,50	3,21			3,50	3,21
500-3000	2,56	2,32			2,56	2,32
<i>Teeklassid kokku, tuh.EUR</i>	4,53	4,20			3,04	2,83
Gneiss						
<i>Materjali kulu teeklassiti, tuh.t</i>						
14500+			22,33	31,13	17,58	26,13
6000-14500			17,34	20,96	15,22	18,84
3000-6000			9,72	15,91	8,17	14,49
500-3000			6,66	13,11	5,52	12,07
<i>Teeklassid kokku, tuh.t</i>			8,41	14,56	7,06	13,31
<i>Tootmise väliskulud, tuh.EUR</i>						
14500+			1,11	1,55	0,87	1,30
6000-14500			0,86	1,04	0,76	0,94

Materjal/Stsenarium	PAAS-traditsiooniline	PAAS-Rootsi	GNEISS-traditsiooniline	GNEISS-Rootsi	GNEISS 2-traditsiooniline	GNEISS 2-Rootsi
3000-6000			0,48	0,79	0,41	0,72
500-3000			0,33	0,65	0,27	0,60
Teeklassid kokku, tuh.EUR			0,42	0,72	0,35	0,66
MATERJALI KULU TEEKLASSITI KOKKU, tuh.t	7,48	12,15	8,41	14,56	8,41	14,56
KÕIK OTSESED JA KAUSSED VÄLISKULUD KOKKU, tuh.EUR	76,60	137,98	0,42	0,72	3,39	3,49

KAUSETE VÄLISKULUDE ARVESTAMINE TEEDE REMONDIL, TUNDLIKKUSE ANALÜÜS

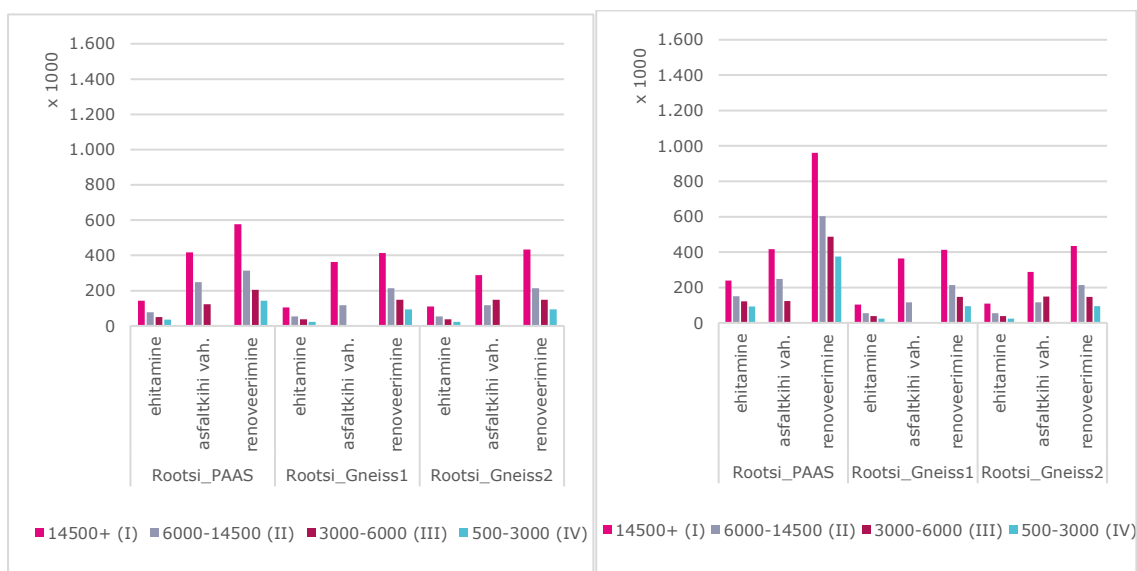
Eelnevates peatükkides on näidatud, et killustikega on seotud nii otsene väliskulu, kui ka kaudne väliskulu. Otsene väliskulu on lubjakivikillustiku ja gneissidest valmistatud killustiku puhul seotud killustiku tootmisel tekkivate CO₂ emissioonidega ja graniitkillustiku puhul tootmisel ning meretranspordil tekkivate emissioonidega. Kaudne väliskulu lubjakivikillustiku puhul koosneb kahest komponendist, lubjakivikarjäärade laienemisel tekkivast CO₂-e emissioonist ja Eesti elanike kvantifitseeritud nõudlusest lubjakivikarjäärade laienemise peatumise järele. Tundlikkuse analüüsis määratletakse konstruktsioonis olevate katenditega (killustik koos asfaldiga) seotud otsene väliskulu ja kaudne väliskulu (karjäärade laiendamisega seotud CO₂ emissioon pluss nõudlus karjäärade laienemise peatamise järele). Kaudne väliskulu võib olla tunduvalt suurem kui katendis olevate killustikuga (killustik koos asfaldiga) seotud otsesest väliskulust. Lubjakivikillustiku otsese ja kaudse väliskulu hinnanguline summa on 12,894 eurot/tonn aastal 2027 CO₂-e soovituslikes hindades (vt. tabel 1.21 ja tabel 1.43).

Tundlikkuse analüüsi eesmärgiks on näidata, kuidas lubjakivikillustikuga seotud kaudsete välismõjude lisamine mõjutab teede stsenaariumide väliskulu. Uue tee lõigu tundlikkuse analüüs viitab sellele, et tänaste materjalidega ehitatud tee väliskulu on gneissidest valmistatud killustikuga ehitatud tee väliskuludest tunduvalt kõrgem. Joonisel 1.11 on võrreldud uue tee lõigu Traditsioonilise stsenaariumi otseseid ja kaudseid väliskulusid. Andmetest nähtub, et kaudsete väliskulude sisestamisel tõuseb lubjakivikillustiku kasutatavate stsenaariumide väliskulu tunduvalt. Nii ehitamise kui renoveerimise väliskulu tõuseb kõikide teeklasside poolteist kuni kaks korda .



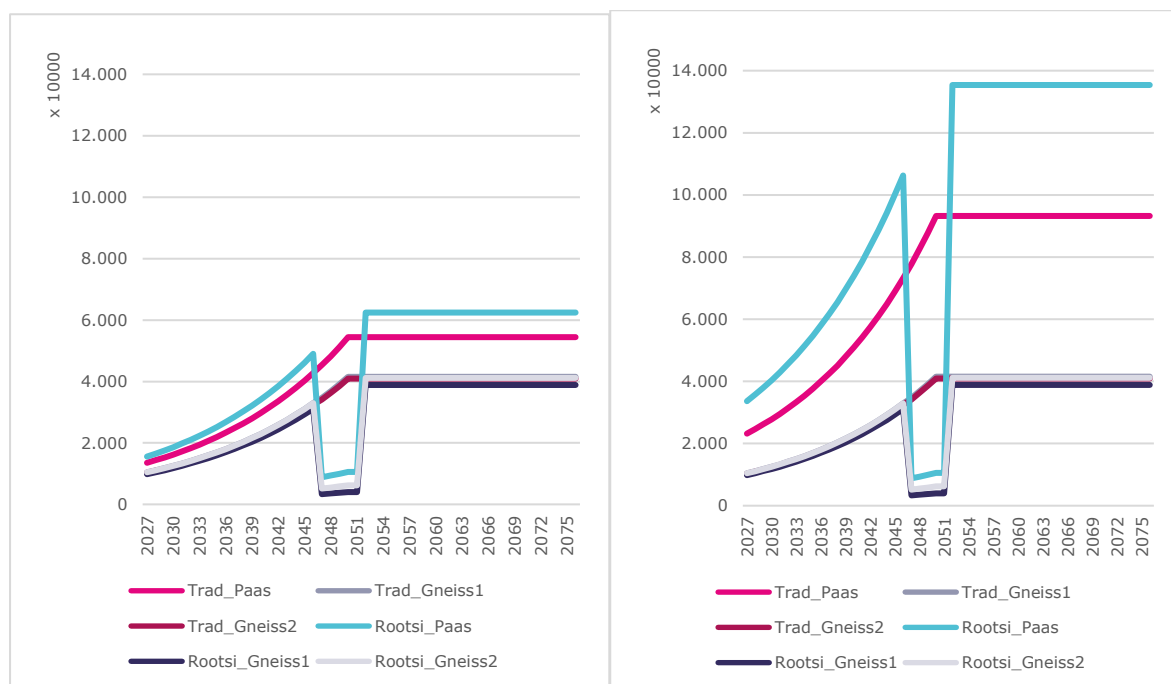
Joonis 1.11. Ühe tee kilomeetriga seotud terve katendi (killustik ja asfalt) väliskulu, 50. aastase hindamisperiodi jooksul, etappide kaupa, Traditsiooniline stsenaarium eeldusel et tee ehitatakse aastal 2027, (vasakul otsene väliskulu) (paremal otsene ja kaudne väliskulu kokku) tuhandetes eurodes

Sarnane tulemus on Rootsi stsenaariumil, (vt. Joonis 1.12). Joonisel on esitatud ühe tee kilomeetri CO₂ materjaliga seotud väliskulu etappide kaupa 50. aastase hindamisperiodi jooksul. Arvestades, et Rootsi stsenaariumi puhul on teede katendi aluse osas olevad killustikukihid paksemad, on sellel stsenaariumil lubjakivi sisaldavate konstruktsioonide erinevused gneissidest valmistatud killustikku sisaldavate konstruktsioonidega võrreldes suuremad.



Joonis 1.12. Ühe tee kilomeetriga seotud terve katendi (killustik ja asfalt) väliskulu, 50. aastase hindamisperiodi jooksul, etappide kaupa, Rootsi stsenaarium eeldusel et tee ehitatakse aastal 2027, (vasakul otsene väliskulu, (paremal otsene ja kaudne väliskulu kokku) tuhandetes euro

Olemasolevate teede renoveerimise otsese ja kaudse väliskulu võrdlus on esitatud joonisel 1.13. Jooniselt nähtub, et konstruktsioonis lubjakivikillustikku kasutavate stsenaariumide maksumus suureneb kaudsete väliskulude sisestamisel tunduvalt. Tingituna CO₂-e hinna suurenemisest 2050. aastani, mida väliskulude analüüsis arvesse võetakse, tõuseb traditsiooniliste materjalidega stsenaariumide maksumus sellega proportsionaalselt (vt. Joonis 1.13).



Joonis 1.13. Olemasolevate teede renoveerimisega seotud terve katendi väliskulu, (killustik ja asfalt), 50. aastase hindamisperioodi jooksul, (vasakul otsene väliskulu) (paremal otsene ja kaudne väliskulu kokku), kümnetes tuhandetes eurodes

Kokkuvõtlikult näitavad otseste väliskulude ja kaudsete väliskulude arvesse võtmise mõju stsenaariumite maksumusele 50 aastase hindamisperioodi jooksul olemasolevate teede remondiga (tabel 1.47), otseste väliskulude summa (tabel 1.47a), otsesed ja kaudsed väliskulude nüüdispuhasväärtus (tabel 1.47b) ja otseste väliskulude nüüdispuhasväärtus (tabel 1.47c)

Tabel 1.47. Olemasolevate teede renoveerimisega seotud terve katendi (killustik ja asfalt) otsene ja kaudne väliskulu kokku, 50 aastase hindamisperioodi jooksul, miljon eurot

Stsenaariumi variant	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku otsene ja kaudne väliskulu
Trad_PAAS	190	704	638	2 110	3 641
Trad_Gneiss1	118	353	240	914	1 625
Trad_Gneiss2	95	353	240	914	1 602
Rootsi_PAAS	204	904	740	2 857	4 705
Rootsi_Gneiss1	113	333	198	719	1 362
Rootsi_Gneiss2	112	333	288	719	1 452

Tabel 1.47a. Olemasolevate teede renoveerimisega seotud terve katendi (killustik ja asfalt) otsene väliskulu kokku 50 aastase hindamisperioodi jooksul, miljon eurot

Stsenaariumi variant	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku, otsene väliskulu
Trad_PAAS	145	459	388	1 134	2 126
Trad_Gneiss1	118	353	240	914	1 625
Trad_Gneiss2	95	353	240	914	1 602
Rootsi_PAAS	145	598	362	1 091	2 197
Rootsi_Gneiss1	113	333	198	719	1 362
Rootsi_Gneiss2	112	333	288	719	1 452

Tabel 1.47b. Olemasolevate teede renoveerimisega seotud katendi väliskulu (killustik ja asfalt) otsese ja kaudse väliskulu nüüdispuhasväärtuse (NPV) summa, 50 aastase hindamisperioodi jooksul, miljon eurot

Stsenaariumi variant	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku, otsese ja kaudse väliskulu NPV
Trad_PAAS	86	320	290	960	1 658
Trad_Gneiss1	54	161	110	417	741
Trad_Gneiss2	43	161	110	417	731
Rootsi_PAAS	91	404	331	1 277	2 104
Rootsi_Gneiss1	51	149	89	323	612
Rootsi_Gneiss2	50	149	129	323	652

Tabel 1.47c. Olemasolevate teede renoveerimisega seotud katendi väliskulu (killustik ja asfalt) otsese väliskulu nüüdispuhasväärtuse (NPV) summa, 50 aastase hindamisperioodi jooksul, miljon eurot

Stsenaariumi variant	14500+	6000-14500	3000-6000	500-3000	Kokku, otsese väliskulu, NPV
Trad_PAAS	66	209	177	516	968
Trad_Gneiss1	54	161	110	417	741
Trad_Gneiss2	43	161	110	417	731
Rootsi_PAAS	65	268	162	489	984
Rootsi_Gneiss1	51	149	89	323	612
Rootsi_Gneiss2	50	149	129	323	652

Tabelites esitatud stsenaariumide otseste väliskulude (tabel 1.47a) ja otseste ning kaudsete väliskulude (tabel 1.47) maksumusest ning ajaldatud maksumusest (vastavalt tabelid 1.47b ja 1.47c) on näha, et lubjakivikillustikku sisaldavad Tänaste materjalidega konstruktsioonid muutuvad otseste väliskulude arvesse võtmisel kallimaks keskmiselt neljandiku võrra. Lisaks otsestele on ka kaudsete väliskulude arvesse võtmisel erinevus tunduvalt suurem, traditsiooniliste materjalidega konstruktsioonid lähevad poolteist kuni kaks korda kallimaks gneisskillustikuga sisaldavate konstruktsioonidega võrreldes.

Lubjakivikillustikuga seotud suured otsesed ja kaudsed väliskulud on puht teedeehituslike paremuste kõrval oluline argument, miks gneisskillustikku kasutavaid konstruktsioone peaks lubjakivikillustikku kasutavatele konstruktsioonidele teede ehitusel ja remondil eelistama.

MAJANDUSANALÜÜSI LÜHIKOKKUVÕTE

Gneisskillustiku kasutuselevõtu majandusanalüüsi eesmärk on analüüsida kulusid, mis tekivad tee konstruktsioonis oleva lubjakivikillustiku ja graniitkillustiku asendamisel gneissidest valmistatud konstruktsioonides I-IV klassi riigimaanteede ehitusel ja remondil. Selleks võrreldakse välja valitud teekonstruktsioonide ehituse ja remondi maksumust tänaste materjalidega (lubjakivikillustik ja imporditav graniitkillustik) sellise olukorraga, kus tänased materjalid on teede ehitusel ja remondil asendatud gneisskillustikuga.

Allolevas tabelis 1.48 on esitatud olulisemad andmed töös käsitletud konstruktsioonide variantide kohta 50-aastase hindamisperioodi jooksul. Kõikide konstruktsioonivariantide kohta on tabelis esitatud olulisemad arvulised näitajad ja võrreldud neid variandiga Trad_PAAS (praegu kasutatav katendi konstruktsioon praegu kasutatavate materjalidega). Erinevus on tabelis väljendatud suhtelise erinevusena variandist Trad_PAAS. Positiivne erinevus näitab, et vastav näitaja on võrreldes konstruktsiooni variandiga Trad_PAAS suurem ja negatiivne erinevus näitab, et väiksem. Tabelis 1.48 esitatud andmed kehtivad riigimaanteede I-IV klassi plaanilise remondi kohta, mille kohaselt on valitud stsenaariumites lähtutud katendi projektsest elueast 20 aastat, misjärel tuleb kogu katend välja vahetada. Seega tuleb aastas remontida 5% riigimaanteedest.

Plaanilised remondikulud 50-aastase hindamisperioodi jooksul on kõikide stsenaariumide puhul, milledes praegu kasutatavad killustikud on asendatud gneissidest valmistatud killustikuga, soodsamad. Suurim kokkuhoid, 24% ajaldamata ja 16% ajaldatud väärtuste puhul, saavutatakse variandi Trad_Gneiss 1 kasutuselevõtul, kus nii graniit- kui lubjakivikillustik on asendatud gneissidest valmistatud killustikuga. Ajaldatud remondikulu erinevus hindamisperioodi jooksul (50 a) on ligikaudu 1,5 miljardit eurot.

Tabelis 1.49 on esitatud töös esitatavad väliskulud. Otsesed väliskulud võtavad arvesse konstruktsioonis olevate killustikega ja terve katendi (koos asfaldiga) materjalidega seotud CO₂ emissioone, mis on rahaliselt kvantifitseeritud vastavalt Euroopa Liidu juhendile. Kõikide käsitletud konstruktsioonivariantide puhul on otsesed väliskulud võrreldes Trad_PAAS variandiga väiksemad. Suurim (37%) on erinevus stsenaariumiga Rootsi_Gneiss1, kus kasutatakse konstruktsioonis paksemat killustikukihti.

Konstruktsioonivariantidega seotud kaudsed väliskulud võtavad arvesse ka lubjakivikarjäärade laienemisega tekkiva CO₂-e heitme ja karjäärade laienemisega seotud heaolu kadu. Arvestades, et gneisskillustiku kasutuselevõtt pidurdab paekarjäärade alla jääva pindala suurenemist, on erinevus lubjakivikillustikku kasutava konstruktsiooni variandi Trad_PAAS ja lubjakivikillustikku mitte kasutatavate variantide vahel suur. Kui variandiga Trad_PAAS CO₂-e heitmega seotud otsesed ja kaudsed ajaldamata väliskulud ületavad hindamisperioodi jooksul 3,6 miljardit eurot, siis konstruktsioonis lubjakivikillustikku mitte kasutatavate variantide kasvuhoonegaasidega seotud ajaldamata väliskulu jääb vahemikku 1,4-1,6 miljardit eurot.

Tabel 1.48. Teede remondiga seotud kulud ja ajaldatud kulud 50-aastase hindamisperioodi jooksul. Katendivariantide võrdlus

Variant	Remondikulu, kokku (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.17)		Remondikulu, nüüdispuhasväärtus (NPV) (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.18)	
	milj. €	erinevus, %	milj. €	erinevus, %
Trad_PAAS	6 212	0	3 293	0
Trad_Gneiss1	4 728	-24	2 759	-16
Trad_Gneiss2	4 772	-23	2 783	-15
Rootsi_Gneiss1	5 128	-17	3 198	-3
Rootsi_Gneiss2	5 389	-13	3 337	1

Tabel 1.49. Teede remondiga seotud otsesed ja kaudsed väliskulud ja ajaldatud väliskulud 50-aastase hindamisperioodi jooksul. Katendivariantide võrdlus

Variant	Väliskulu otsene kokku (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.47a)		Väliskulu otsene +kaudne kokku (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.47)		Väliskulu otsene, NPV (teeklasside kaupa vt Tabel 1.47c)		Väliskulu otsene+kaudne, NPV (teeklasside kaupa vt Tabel 1.47 b)	
	milj. €	erinevus, %	milj. €	erinevus, %	milj. €	erinevus, %	milj. €	erinevus, %
Trad_PAAS	2 126	0	3 641	0,00	968	0	1 658	0,00
Trad_Gneiss1	1 625	-24	1 625	-0,55	741	-23	741	-0,55
Trad_Gneiss2	1 602	-25	1 602	-0,56	731	-24	731	-0,56
Rootsi_Gneiss1	1 362	-36	4 705	-0,63	612	-37	2 104	-0,63
Rootsi_Gneiss2	1 452	-32	1 362	-0,60	652	-33	612	-0,61

Väga suur erinevus katendi konstruktsiooni variantide vahel on süsinikdioksiidi (CO₂) emissioonides. Tabelis 1.50 on esitatud killustikega seotud otseseid ja kaudseid CO₂ emissioone (katendi sidumata kihtides ja asfaldis olev killustik). Samaselt eelneva tabeliga kehtivad tabelis 1.49 esitatud andmed riigimaanteede I-IV klassi plaanilise (projektse eluea) remondi kohta, mille kohaselt on katendi eluiga 20 aastat, misjärel tuleb kogu

katend välja vahetada. Kui konstruktsiooni variandil Trad_PAAS on killustikega seotud otsene emissioon 50 aasta jooksul ühe miljoni tonni, siis gneisskillustikku kasutavas konstruktsiooni variandis Trad_Gneiss1 on vastav emissioon ainult 183 tuhat tonni.

Konstruktsioonivariantidega seotud kaudsed väliskulud võtavad arvesse ka lubjakivikarjäärade laienemisega tekkiva CO₂-e heitme. Konstruktsiooni variandil Trad_PAAS on killustikega seotud otsene ja kaudne emissioon 50 aasta jooksul 2,4 miljonit tonni, siis gneisskillustikku kasutavas konstruktsiooni variandis Trad_Gneiss1 on vastav emissioon ainult 183 miljonit tonni.

Tabel 1.50 Killustikega (aluskihis ja asfaldis olev killustik) otseselt ja kaudselt seotud CO₂-e emissioonid stsenaariumide kaupa 50-aastase hindamisperioodi jooksul. Katendivariantide võrdlus

Variant	Killustikega otseselt seotud CO ₂ emissioon (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.33)		Killustikega otseselt ja kaudselt seotud CO ₂ emissioon (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.33a)	
	Tuhat Tonni	erinevus, %	tuhat tonni	erinevus, %
Trad_PAAS	1 064	0	2 358	0
Trad_Gneiss1	183	-83	183	-92
Trad_Gneiss2	437	-59	437	-81
Rootsi_Gneiss1	164	-85	164	-93
Rootsi_Gneiss2	412	-61	412	-83

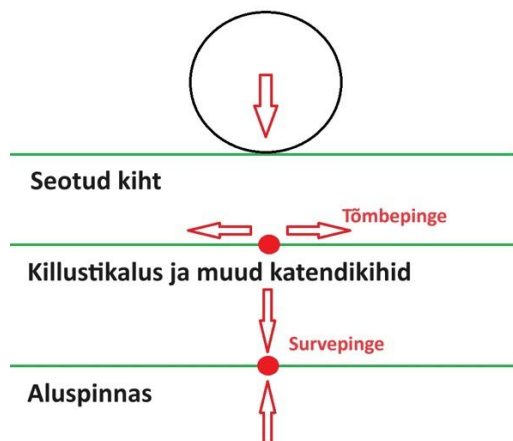
Lisaks CO₂-e heitmega seotud otsestele ja kaudsetele väliskuludele selgitati välja ja kvantifitseeriti tingimusliku hindamise meetodit (ingl.k. contingent valuation) kasutades ka Eesti elanikkonna nõudlus paekivikarjäärade laienemise peatumise järele. Arvestades gneisskillustiku kasutuselevõttuga kaasnevat lubjakivi kaevandamise vähenemist ja sellele vastavat karjäärade pindala kasvu pidurdumist, on ühe tonni paekivikillustikuga seostatav kaudne väliskulu 8,5 eurot, mis on lisatud kaudsetesse väliskuludesse ja on täiendavaks argumendiks gneisskillustiku kasutuselevõtule lubjakivikillustiku asemel.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et kuigi gneisskillustiku kasutuselevõtt riigimaanteede remondil tingib hindamisperioodi alguses veidi suurema kulu võrreldes täna kasutatavate materjalidega (erinevus 2-3%), siis pikas perspektiivis on paekivikillustiku kasutuselevõtt nii otseste remondikulu kui kõikide väliskulude aspektist nii majanduslikult kui ka sotsiaalselt väga kasulik, vähendades nii riigimaanteede remondikulud, kasvuhoonegaaside emissiooni kui ka paekivikarjäärade pindala suurenemisest tingitud heaolu kadu.

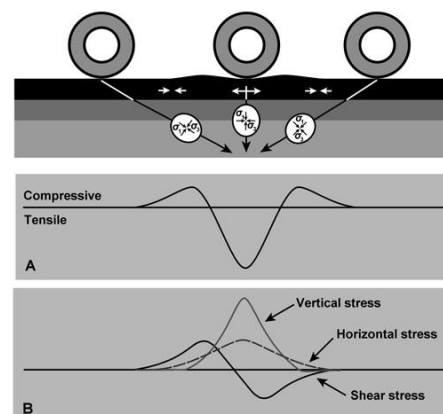
KIVIMI OMADUSTE MÕJU TEEDE ALUSTE ELUEALE

Kaasaegne maantee peab täitma mitmeid erinevaid kriteeriume, millest põhilisemad on järgmised:

- Sõidutee peab omama head haardetegurit ja tagama mugava ning ohutu liikluse;
- Teekatend peab olema võimeline kandma projekteeritud liikluskoormust ilma märkimisväärsete defektide ja deformatsioonide tekketa. Seotud kattekihid ei tohi praguneda liikluse ja ilmastiku mõjul tekkivate pingete ja deformatsioonide tõttu. Vastav katendiarvutuse põhimõte on esitatud joonistel 1 ja 2;
 - o Joonise 1 täiendamiseks võib kasutada joonist 2, kus on näidatud erinevad liikluskoormusest põhjustatud pinged katendis, kus olukord „A” on seotud kihtide alapind, mille puhul kontrollitakse tõmbepingeid (ing. *tensile*) ning olukord „B” sideainega sidumata kihid (tavapäraselt aluspinnased, mille peale teekatend ehitatakse), mille puhul kontrollitakse nihkepingeid (ing. *shear stress*);
- Teekatendi kihtidel peab olema piisav koormuse jagamise võime aluspinnasele. Sellest tulenevalt defineeritakse teekatendit kui mitmekihilist konstruktsiooni, mille ülesanne on võtta vastu sõidukite koormust ning jaotada see muldkehale või aluspinnasele. Seda saab piltlikustada Joonisega 3 ja Joonisega 4. Joonisel 3 on nähtav väga nõrk aluspinnas. Et saavutada Joonisel 4 kujutatud olukord, siis tuleb kehvemate aluspinnaste korral ehitada mitmekihiline teekatend.



Joonis 1 – Skemaatiline vaade koormusest tingitud pingetele teekatendis



Joonis 2 – Detailsem vaade koormusest tingitud pingetele teekatendis



Joonis 3 – Väga nõrk aluspinnas



Joonis 4 – Piisava kandevõimega tee

Ülal loetletud kriteeriumite rahuldamiseks on erinevates riikides koostatud mitmeid erinevaid katendiarvutuse meetodikaid. Näiteks Eestis kasutatav katendiarvutuse meetodika, mida käsitleb Transpordiameti „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend“, põhineb analüütilis-empüütilisel meetodil, kus konstruktsioonis kasutatavate materjalide kihtide paksused arvutatakse lähtudes alljärgnevast:

- Katendile lubatud elastsest läbipaindest (leitakse teekatendi elastsusmoodul, mida võrreldakse liikluskoormuse põhjal leitud vajaliku elastsusmooduliga);
- Pinnased ja nõrgalt seotud kihid lubatud nihkepingest (Joonis 2 olukord „B“);
- Asfaltbetoonid ja monoliitsed kihid lubatud tõmbepingest (Joonis 2 olukord „A“).

Lisaks kontrollitakse Eestis kogu katendi külmakerkekindlust ja harvemini ka drenkihi veejuhtimis- ning mahutamisevõimet. Arvutustes kasutatavate materjalide omadused on kas mingil viisil mõõdetavad või empiirilised ehk kogemuslikud.

Järjest suuremat tähtsust omab tee rajamise keskkonnamõju, mistõttu tuleks eelnevat loetelu täiendada veel punktiga:

- Tee ehitamine ja selle kasutamine peavad olema keskkonnale võimalikult madala mõjuga ehk võimalikult väikese keskkonnajalajäljega.

Et seda nõuet täita, peaks tee planeerimine ja ehitamine toimuma järgmistel põhimõtetel:

- Tee ehitamisel arvestatakse ümbritseva looduskeskkonnaga;
- Tee rahuldab praegu elavate inimeste vajadusi nii, et järgmiste põlvkondade vajadused ja elu kvaliteet ei kannataks;
- Tee ehitamisel ja ekspluateerimisel toimitakse olemasolevate ressursidega targalt ümber.

Joonise 5 põhjal oleks kõige madalama keskkonnamõjuga selline ehitus, mida pole kunagi ehitatud. Kuna taristut on vaja, siis järgmine variant on vähem ehitamine. Tinglikult võib vähem ehitamise alla liigitada ka olukorra, kus valmis ehitatud teed on vaja võimalikult vähe uuendada. Teisisõnu, mida pikem on teekonstruktsiooni eluiga ehk mida vähem defekte teekattele tekib ning mida harvemini tuleb teed rekonstrueerida, seda väiksema keskkonnamõjuga see tee on.

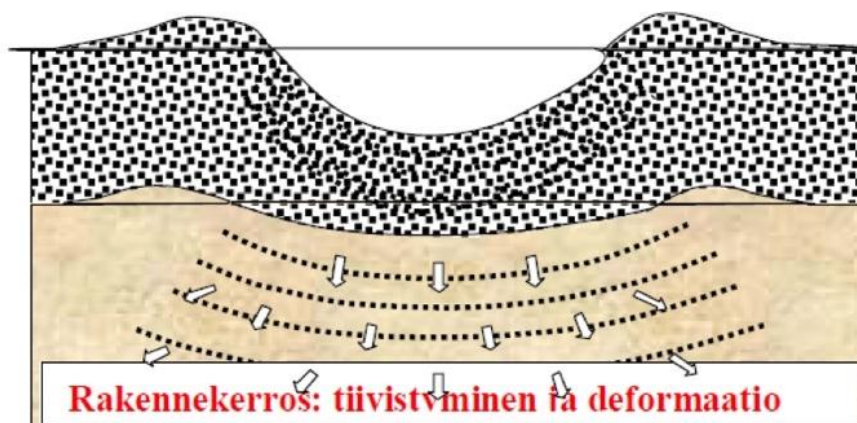


Joonis 5 - Viisid, kuidas vähendada ehitise keskkonnavalast jalajälge. Allikas: Rohetiiger, Ehituse teekaart 2040

Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kohaselt arvutatakse kõik sideainega töötlemata materjalid nihkele, v.a killustikust alused, sest eeldatakse, et selle nihketugevus on alati piisav. Killustikukihile on ette antud elastsusmoodul sõltudes purunemiskindluse väärtusest, millega sisuliselt kontrollitakse seda, kui palju teekatend koormuse rakendamisel läbi vajub ning kui suur tõmbepinge asfaltkatte alapinda tekib. Kui killustiku purunemiskindlus on $LA < 35$, siis kasutatakse katendiarvutuses empiirilist killustiku elastsusmoodulit $E = 280$ MPa, kui $LA \geq 35$, siis kasutatakse elastsusmoodulit $E = 240$ MPa ning kui killustikusegu on „mittestandardne“, kasutatakse elastsusmoodulit $E = 200$ MPa. Katendiarvutuses ei eristata täitematerjale selle mineraloogia või mõne muu kriteeriumi alusel. Seega eeldatakse, et killustikalus ei ole määravaks komponendiks katendikonstruktsiooni eluea vähenemisel.

Nii Eesti, Soome ja ka teiste riikide katendiarvutusmetoodikates arvestatakse vähe killustike omadustega ja/või nende omaduste muutumisega ajas. Eeldatakse, et tegemist on kõrge kvaliteediga ehitusmaterjaliga kontrollides pigem muid parameetreid nagu on kirjeldatud Joonisel 1, Joonisel 2 ja Joonisel 7. Killustiku nõutud kvaliteedinäitajad on enamasti seatud kogemuslikult ehk empiirilisel.

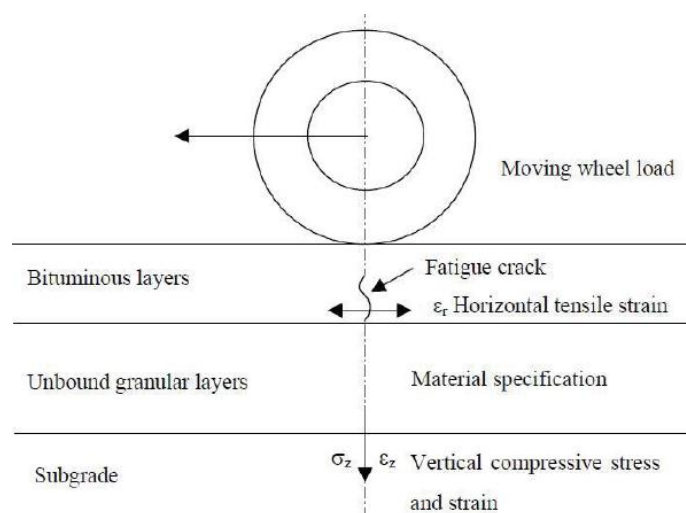
Teekonstruktsioonide killustikalustel on oluline roll teekonstruktsiooni toimivusel ja elueal. Allikate [21], [22], [23], [24] põhjal järeldub, et kuni 30...70% teekatetel nähtavatest roobastest ehk püsivatest deformatsioonidest tuleneb killustikalustest (Joonis 6). Eestis tuleb arvestada ka naastrehvidest põhjustatud kulumisega, mida on käsitletud käesoleva aruande järgnevas peatükis.



Joonis 6 - Asfaldi all paiknevas sideainega sidumata kihis (killustikaluses) tekivad deformatsioonid nii järeltihennemisest kui nihkedeformatsioonidest [25]

Allika [25] põhjal on teada, et isegi kui erinevad killustikud vastavad samadele spetsifikatsiooninõuetele (nt terastikuline koostis, purunemiskindlus LA, plaatsustegur FI, purustatud pindade osakaal), siis väsimustestides (ingl. k *permanent strain tests in the repeated load triaxial apparatus*) nähakse siiski suuri varieerivusi. Sama allikas toob välja ka selle, et killustiku kõrge elastsusmoodul ei tähenda alati head vastupidavust püsivatele deformatsioonile ehk pikiroobaste tekkimisele.

Eesti (aga ka paljudes teistes) katendiarvutusmetoodikates eeldatakse, et kui killustikaluses kasutatav materjal täidab ettenähtud kogemuslikud nõuded (Joonis 7), siis selles kihis probleeme püsivate deformatsioonidega ei teki. Kirjanduse põhjal nähtub siiski, et taoline oletus ei ole korrektne. Teisisõnu mingil kriteeriumil põhinev eeldatav elastsusmoodul ei peaks olema ainsaks näitajaks, mida katendiarvutuses kasutada, sest see ei pruugi kirjeldada korrektselt killustikaluse eluiga konstruktsioonis.



Joonis 7 - Enamus katendiarvutusmetoodikaid töötab põhimõttel, et roopad tekivad vaid aluspinnases ja praod saavad alguse asfaltkatte alapinnast. Arvestamata jääb seega killustikaluste deformeerumine [26]

Killustikaluste toimivust uuris põhjalikult Leena Korkiala-Tanttu ning allikas [26] on esitatud Tabel 1, mis võtab kokku tegurid, mis mõjutavad killustikalustesse püsivate

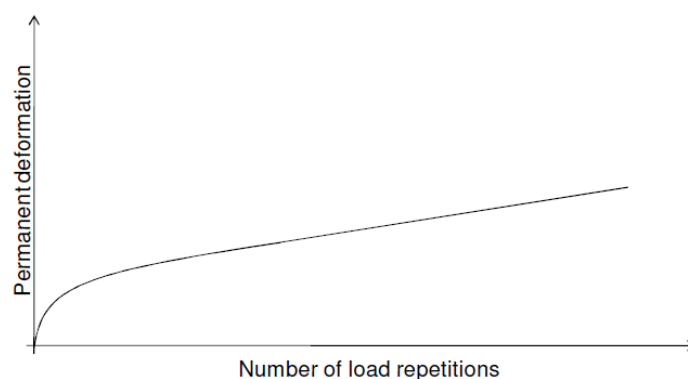
deformatsioonide teket. Tabel käsitleb tegurite mõju nii elastsusmoodulile (ing. *resilient modulus*) kui ka püsivate deformatsioonide tekkele (ing. *permanent deformations*).

Tabel 2 - Killustikaluse tegurite mõju kihi elastsusmoodulile ja püsivate deformatsioonide tekkele. Pluss märk tähistab paremat ja miinus märk nõrgemat kihti

	Tegur	Elastsusmoodul	Jäävdeformatsioon
Terastikuline koostis	Pidev	++	++
	Katkev	+	
Suurim teramõõt	Suur (üle 90 mm)	++	++
	Keskmine (30-90 mm)	Alumises moodsus mõju puudub Ülemises moodsus +	+
	Väike (alla 30 mm)	-	-
Peenosiste sisaldus	Suur	-	-
	Väike	+	+
Tihendustegur	Kõrge	+	+++
	Madal	-	---
Terade kuju	Ümarad	+	-
	Plaatjad	-	-?
Mineraloogia	Kõva	+	++
	Pehme	-	-

Püsivate deformatsioonide arengut sideainega sidumata killustikaluses tulenevalt dünaamilisest liikluskormusest saab jagada kahte etappi [27]:

1. Etapp - kiire roopa areng (nö algroobas), mis ei ole lineaarne;
2. Etapp - roopa areng aeglustub või peatub (Joonis 8), mis on lineaarne.

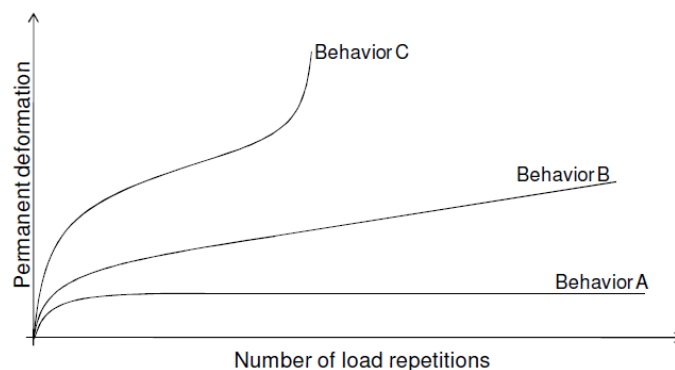


Joonis 8 - Roopa (püsiva deformatsiooni) areng koormustsüklite toimel. Alguses toimuv hüpe tuleneb järeltihenemisest (nö algroobas), misjärel roopa arenemine aeglustub või peatub täielikult [27]

Esimest etappi nimetatakse järeltihnemiseks. Selle etapi käigus materjal tiheneb, selle poorsus väheneb ning lõpuks võib toimuda ka mõningane täitematerjaliterade purunemine. Selle tulemusena tekib kihi ruumala vähenemine, mis omakorda vähendab killustikaluse paksust. Pärast esimest etappi deformatsioonide areng aeglustub või peatub, kuid killustiku terade omavahelised pinged kasvavad. See, kas ja mis tempos roopa ehk püsivate deformatsioonide areng toimub, sõltub sellest, kui edukalt killustikalus suudab vastu võtta liikluskoormusest tekkivaid pingeid.

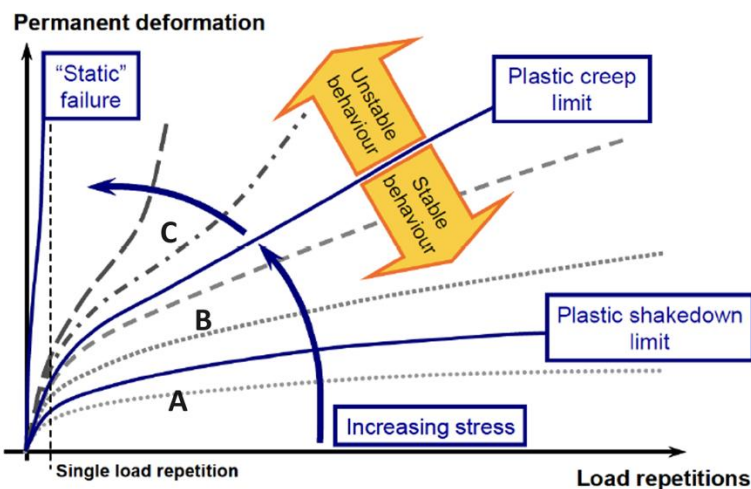
Allikas [28] jagatakse püsivate deformatsioonide teke peale järeltihnemist kolmeks Joonis 9 kirjeldatud stsenaariumiks:

- **Olukorras A** peatub roopa areng pärast killustiku järeltihnemist;
- **Olukorras B** areneb roobas aeglaselt, kuid pidevalt edasi (toimub nõ roome);
- **Olukorras C** toimub kas peaaegu koheselt või mõne aja möödudes kihi purunemine.



Joonis 9 - Killustikalused võivad käituda püsiva deformatsiooni seisukohast selliselt, et peale algroopa tekkimist täiendav deformeerumine kas peatub (olukord A), roobas areneb pidevalt aeglaselt edasi (olukord B) või toimub suhteliselt kiire purunemine (olukord C) [28]

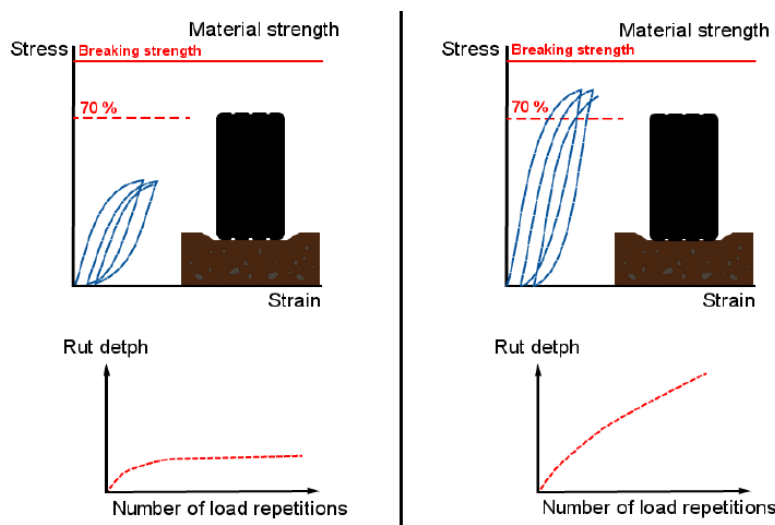
Olukorra A, B või C tekkimine sõltub killustikaluse pinge-tugevuse (ing. *stress-strain*) seosest, mida kutsutakse *shakedown*-teooriaks ning mida on illustreeritud Joonisel 10. Kui killustikalust koormatakse üle teatud pingetaseme, mida tuntakse kui *shakedown* koormusena, hakkavad dünaamilise koormuse tulemusena tekkima plastsed deformatsioonid, mis summeeruvad ja viivad järk-järgulise (olukord B) või kiire (olukord C) purunemiseni. Kui koormus jääb alla *shakedown*-piiri, siis plastsete deformatsioonide osakaal jääb marginaalseks ning pea kogu koormuse tagajärjel tekkiv deformatsioon on elastne ehk taastuv.



Joonis 10 - Erinevad killustikaluses oleva materjali koormuskäitumise piirid: olukord A on shakedown piir ehk püsivat deformatsiooni peale algroopa teket peaaegu et enam ei teki; olukord B on roomepiir; olukord C on kiire purunemine [28]

Kui killustikalus käitub teekonstruktsioonis sarnaselt olukorrale A, siis ei toimu Joonisel 6 näidatud roopa arengut (v.a asfaltkatte deformeerumine ning kulumisroobaste teke). Olukord, millal piisab vaid teekatte uuendamisest (mille vajadus tekib näiteks naastrehvidest põhjustatud kulumine või asfaltkattes oleva sideaine vananemise tõttu), eeldab, et asfaltkatte all olev konstruktsioon säiliks ja sellele mõjuvad pinged jääksid väiksemaks *shakedown* piirist ning mille tulemusena asfaldi all olev kiht ei puruneks.

Allikas [29] on välja toodud, et tihti käsitletakse pinget 350 kPa kui maksimaalset, mis võib sidumata alusele rakenduda, teisisõnu asfaltkate või muu killustikaluse peal paiknev kiht peab jaotama liiklusest tulenevad pinged väiksemaks, kui 350 kPa. Nagu eelnevalt käsitletud, sõltub killustikaluse vastupidavus väga mitmetest teguritest ning seega võib erineva päritolu ja koostisega killustikalustel olla sellele lubatav piirkoormus erinev. Sama allikas toob välja seose, et kui koormus killustikalusele jääb selgelt väiksemaks 70% materjali purunemispäästest, ei toimu peale järeltihenemist märkimisväärselt või üldse mitte püsivate deformatsioonide arenemist, ehk killustikalus käitub sarnaselt olukorrale A. Kui 70% piir ületatakse, toimuvad pidevalt arenevad püsivad deformatsioonid, ehk killustikalus käitub sarnaselt olukorrale B. Seda on illustreeritud Joonisel 11.



Joonis 11 - Kui killustikalusele tulevad pinged ületavad 70% killustiku nihketugevusest, hakkab toimuma järjest suurenev roopa areng (ehk Joonis 10 olukord B) [29]

PAEKIVIKILLUSTIKU VASTUPIDAVUS TEEKONSTRUKTSIOONIS

Eesti paekivikillustike omadusi ja käitumist alustes on käsitletud allikates [30], [31], [32], [33]. Kõikide nende uuringute ühiseks järelduseks on asjaolu, et paekivikillustik on tundlik veesisalduse suurenemise, külmumis- ja sulamistsüklike ning eriti talvise teehoolde käigus libedusetõrjeks kasutatavate kloriidide suhtes.

Paekivi on settelise tekkega karbonaatkivimi rahvapärane nimetus ning Eestis mõistetakse reeglina mõiste "paekivi" all nii lubjakivi kui dolomiiti, millest mõlemast valmistatakse killustikku. Peamine erinevus nende kahe kivimi vahel on mineraalne koostis – lubjakivi on kaltsiumkarbonaatne, dolomiit aga kaltsium-magneesiumkarbonaatne kivim. Killustikaluste toimivuse vaates on dolokivil võrreldes lubjakiviga mõnevõrra parem külmakindlus ja vastupidavus libedusetõrjesooladele, kuid mis jäävad näiteks võrreldes kõrgekvaliteedilise tardkivikillustikuga siiski umbes suurusjärgu võrra nõrgemaks. Seega käesolevas aruandes esitatud järeldused kehtivad Eestis leiduvale paekivile ning lubja- ja dolokivi ei ole omavahel eristatud, v.a kui seda on nõudnud refereering kasutatavale kirjandusallikale.

Allikas [32] kirjeldatud katsed näitasid, et kuivades tingimustes ei fikseeritud lubjakivikillustikus märkimisväärset püsiva deformatsiooni arenemist (ehk killustikalus toimis olukorras A), kuid peale killustiku märgamist hakkas toimuma kiirenev roopa areng (olukord B või C), mis kiirenes omakorda veel peale kloriidide lisamist (olukord C). See kirjeldab hästi sama nähtust, mis oli kirjeldatud eelnevalt käsitletud allikas [25], kus samadele spetsifikatsioonidele vastavad täitematerjalid võivad teekonstruktsioonis olles

käituda täiesti erinevalt. Nimelt käsitletakse Eesti katendiarvutuses sette-, tard- ja moondekivikillustikke võrdselt, kuni nende LA on võrdväärne, kuid katseandmed ja kogemused on näidanud, et tegelikult käituvad materjalid hoopis erinevalt.

Allikas [32] järeldati, et Maanteeameti nõudmine kõige kõrgemaklassiliste teede puhul kasutada killustikaluste ülaosas tardkivikillustikku, mis ei ole nii ilmastikutundlik kui paekivikillustik, on põhjendatud. Uuringus leiti, et lubjakivi kaotas niiskudes olulise osa oma kandevõimest. Analüüsidest uuringus välja toodud pingestandurite näite, saab väita, et selle elastsusmoodul vähenes niiskudes ca 60%, mille alusel võiks öelda, et LA35 kivi arvutuslik elastsusmoodul oleks vaid ca 170 MPa (katendiarvutuses kasutatakse 240 MPa).

Allikas [33] kasutati koormuskatsetes killustikaluse konstruktsiooni, kus asfaltkatte all paiknes killustikalus kahes kihis: peal graniit ja all lubjakivi. Kui vaid lubjakivikillustik käitus joonisel 8 kujutatud olukorras C (Joonis 12), siis koos graniidiga toimis killustikalus olukorras B ning killustiku purunemine oli väiksem (Joonis 13).



Joonis 12 – Pärast katset purunenud ja deformeerinud lubjakivikillustikust alus



Joonis 13 – Pärast katset heas seisukorras graniidist killustikalus

Probleem tuleneb sellest, et paekivi sees olevad jämedad kristallid muutuvad veesisalduse suurenedes libedaks (nagu saviosakesed) ning hakkavad koormuse all murduma. Sellest tulenevalt killustikuterad purunevad. Seetõttu on oluline kaitsta paekivikillustikku niiskuse eest. Allikas [30] selgitatakse lisaks, et kaltsium (Ca) reageerib libedusetõrje soolas (NaCl) oleva klooriga, misjärel hakkab lubjakivist eralduma CO₂. See omakorda moodustab koos veega loodusliku murenemise algmaterjali. Samuti tõstab NaCl kivimi hügrooskoopseid omadusi ja muudab kivimi märjaks. Selle tõttu satub soolalahus sügavamale kivimi pooridesse ja kristalliseerub seal kuivamisel. See suurendab lisaks külmumisel tekkivatele pingetele täiendavalt pingeid ning kivi puruneb.

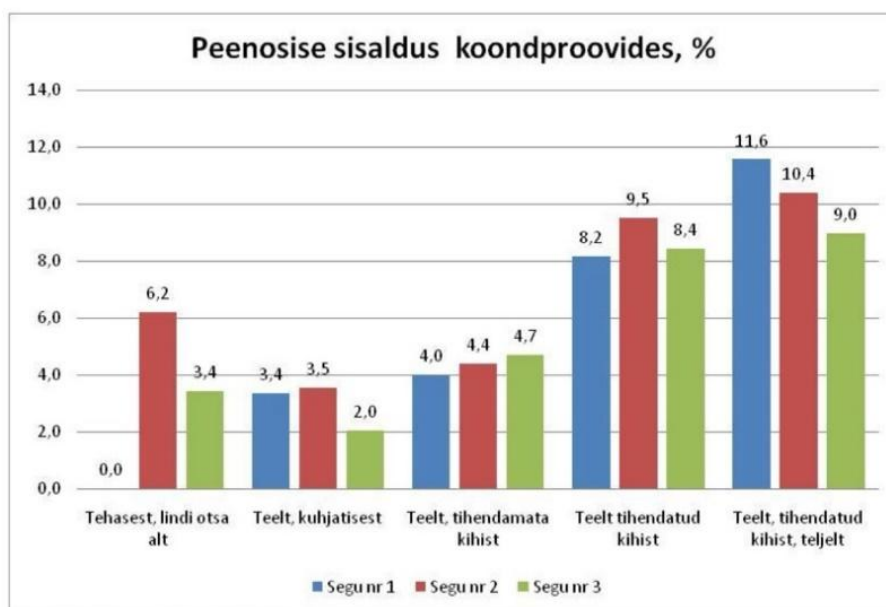
Eestis on olemasolevate teekonstruktsioonide vastupidavust killustikaluste vaates uuritud suhteliselt vähe, mistõttu pärinevad andmeid peamiselt laborikatsetest. Killustiku pikaajalist vastupidavust vaadeldi vanade killustikaluste avamisega allikas [31]. Uuringuga leiti, et pikalt eksploatatsioonis olnud killustikaluse materjali terad on purunenud ja lõhenenud. Uuritud teede teekatted olid siiski roobaste ehk püsivate deformatsioonide suhtes heas seisus, sest asfaltkatete paksused olid suured (keskmiselt umbes 20 cm), mistõttu pinged asfaldi all olevale kihile olid hajutatud tasemele, mis säilitas seal olevaid materjale/pinnaseid.

Allika [29] andmetel on umbes 20 cm paksune asfaldikiht piisav, et jaotada liikluskoormus tasemele, mille puhul killustikaluste omadused ei oma enam väga suurt tähtsust. Sama

allika lõppsõnas tuuakse seoses veokite täismasside, rehvide ja muude täiendustega seoses välja, et enamuse raskeveoktitel kasutusele võetavaid olulisi uuendusi lühendavad teede katendikihtide eluiga, kuid erandiks on teed, kus kasutatakse vähemalt 250 mm kattekihte, mis peavad koormuse suurendamisele hästi vastu.

Paekivikillustiku piiratud eluiga toetab allikas [30] toodud info Peterburi ja selle lähiümbrusest saadud kogemused. Peterburis ja Leningradi oblastis paekivi ebapiisavate kvaliteedinäitajate tõttu praktiliselt ei kasutata, kuna lähedalt on saadaval ka tardkivi (graniiti). Aastakümnete eest kasutatud paekivikillustikest (mark 600 kuni 800, mis vastab purunemiskindluse LA väärtusele ca 30 kuni 35) alustest on reeglina järel vaid pude materjal ja tolm.

Allikas [30] leiti, et kui paekivikillustikusegust valmistatud aluse ehitamise töid teostati liikluse all, siis killustikusegud peenesid protsessi käigus märkimisväärselt ja peenosise osakaal suurenes ca 2-3 korda, mida on näidatud Joonisel 14.

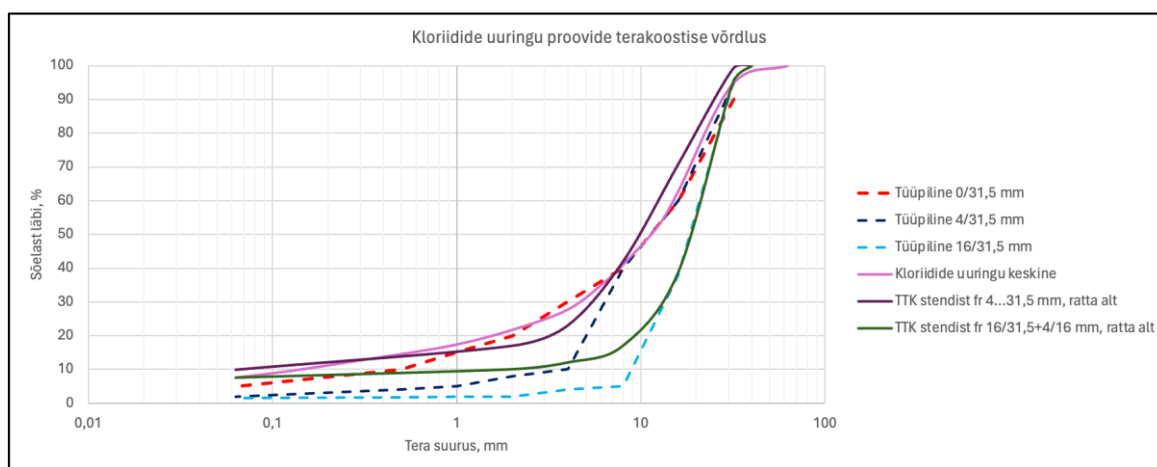


Joonis 14 – Killustiku peenosiste sisalduse kasv tootmisest paigaldamiseni

Allika [30] lisas 6 kirjeldatuke killustikuproovidest kloriidisisalduse määramist. Antud raportis on käesoleva aruande kontekstis huvipakkuvaks osaks killustikuproovide sõelkõverad, mille keskmine väärtus on koondatud Joonisel 15, kus on antud võrdlus killustikusegu 0/31,5 mm, ridakillustiku 4/31,5 mm ning fraktsioneeritud killustiku 16/31,5 mm tüüpiliste sõelkõverate vahel. Lisaks on joonisele kantud peale allikast [32] saadud pärast koormuskatset Tallinna Tehnikakõrgkooli (TTK) koormusstendis (raskeveokisimulaatoris) tugevalt purunenud ja deformeerunud ridakillustikust kihist (Joonis 12) võetud proovi andmed.

Kuna killustikusegusid hakati Eestis kasutama alles aastal 2010, siis pidi allikas [30] käsitletud proovivõtukohtadest võetud killustikalus olema ehitatud algselt fraktsioneeritud killustikust, mis on aga aja jooksul „muundunud“ killustikuseguks fr 0/31,5 mm. Sõelkõverate võrdlusest nähtub, et aja jooksul nii ehituse kui tee kasutamise käigus on killustikalus märkimisväärselt purunenud. Peenosise sisalduse suurendamine jällegi

vähendab oluliselt kihi vastupanu jäävatele deformatsioonidele [34] ning alusematerjalide liigne deformeerumine koormuse all suurendab tõmbepingeid asfaldikihtide alapinnas, mis realiseeruvad pikipraona teekatte pinnal.



Joonis 15 – Materjalide terastikulise koostise muutus eksploatatsioonis

Allikas [32] leiti, et kui paekivikillustik oli kaetud bituumenikilega, ei purunenud kivi läheski nii palju, kui ilma bituumeniga katmata. Allikas [32] on öeldud: „Mustkillustiku kihis olevad täitematerjaliosad ei purunenud katse käigus, kuigi olid valmistatud samuti paekivikillustikust. See näitab, kui oluline on katta paekivikillustik ainega, mis sulgeks selle poorid, näiteks bituumeniga.“ Sama soovitus on toodud ka allikas [30], kuid seda ei ole viimasel ajal kuigivõrd täiendavalt uuritud ega katsetatud.

Probleemi olemus on teada juba eelmise sajandi 80-ndatest aastatest. Samas on tõestatud, et kui lubjakivi on kaitstud kelmega, siis peab see vastu agressiivsele keskkonnale. Näiteks lubjakivikillustiku baasil tehtud betoonkuubikud, mis on nõuetekohase õhusisalduse ja vesitsementteguriga, peavad vastu 5% NaCl lahuses üle 500 tsükli ehk vastavad teebetooni F200 (normaalbetoon on F500, vastavalt GOST 10060-95) nõuetele. Kui aga avada betooni sisepind ja katsetada saetud betoonpinda (vastavalt EVS 814:2003), siis betoon ei pea vastu ka 28 tsükli, ega vasta külmakindlusklassi KK2 nõuetele (ilma pinda purustamata peaks lubjakivikillustiku baasil tehtud katsekeha vastu ka KK4 nõudmistele). Hea näide on Tallinn-Narva mnt Maardu järve piirkonnas olnud katselõik, kus betoon oli tehtud lubjakivi baasil ja pidas vastu üle 40 aasta. Seega on oluline, et lubjakivi oleks kaitstud kloriidide eest kas bituumeni või tsemendiga.

Paekivikillustiku kasutamiseks selliselt, et see ei vähendaks teekonstruktsioonide eluiga, oleks kivi vaja kaitsta vee sisseimbumise eest ja/või vähendada kihile jõudvaid pingeid näiteks kasutades paksemaid asfaldikihte või paigaldades asfaldi ja killustikaluse vahele mõne muu kihi, mis vähendaks paekivile jõudvate nihkepingete suurust.

Paekivikillustikule lubatavate nihkepingete suurus ja materjali väsimuskindluse näitajad on aga teadmata. Teisisõnu ei ole teada paekivikillustiku *shakedown*-piir, et killustikaluse käituks pikaajalises vaates Joonisel 10 kujutatud olukorras A, mis on eelduseks oluliselt pikemaajaliste teekonstruktsioonide jaoks. Ka ei võimalda killustike *shakedown*-piiri mitteteadmine korrektselt eristada erinevate omadustega / päritoluga killustikke, mistõttu on puudulik teadmine teekatendi elueast. Ja isegi kui see oleks teada, siis Eestis kasutav

katendiarvutusmetoodika ei võimaldaks teadmiseiga paremini arvestada, kui kehtestades mingi empiirilise piirväärtuse, nt vähendades paekivikillustiku elastsusmoodulit.

KILLUSTIKE PINGE-TUGEVUSE SÕLTUVUSED

Killustike pinge-tugevuse sõltuvuste leidmiseks katsetati erinevaid lubjakivikillustiku fraktsioone ja gneisskillustikku Tampere ülikooli geotehnikalaboris (tutkimuskeskus TERRA) ning Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis.

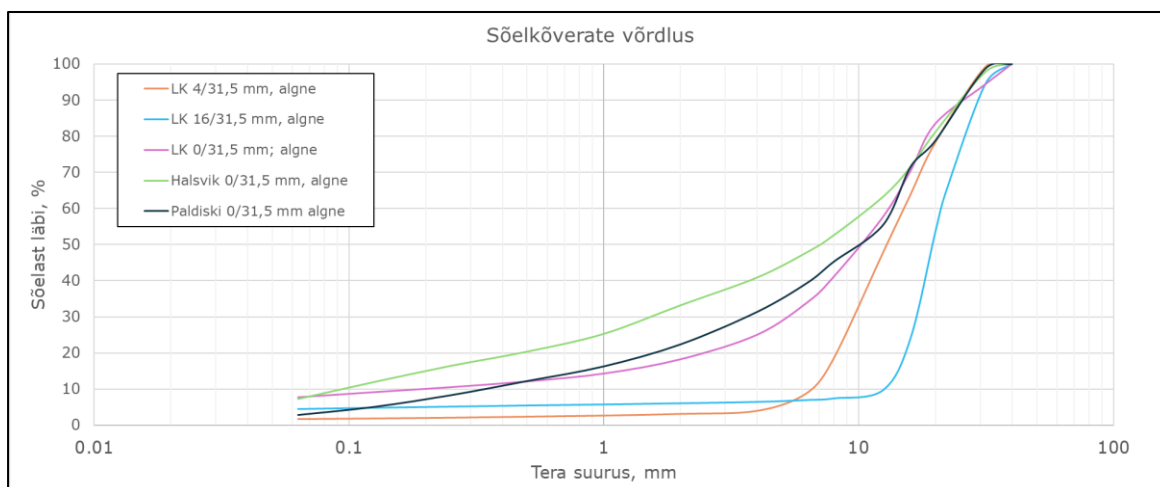
Katsetamiseks kaasatud killustikud olid:

- lubjakivikillustik fr 4/31,5 mm (ridakillustik);
- lubjakivikillustik fr 16/31,5 mm (fraktsioneeritud killustik);
- lubjakivikillustik fr 0/31,5 mm (optimaalne segu);
- moondekivimist (gneiss) killustik, mis pärineb Norrast Halsviki karjäärist, fr 0/31,5 mm (optimaalne segu);
- moondekivimist (gneiss) killustik, mis on valmistatud Paldiski pump-hüdroakumulatsioonijaama suurkehadest, fr 0/31,5 mm (optimaalne segu).

Katsetamiseks kasutatud killustike omadused on esitatud tabelis 2 ja nende terastikulised koostised Joonis 16. Tabeli 2 andmetest on näha, et kuigi materjalide purunemiskindlus LA ei ole uuringusse kaasatud lubjakivikillustike, Halsviki karjääri killustiku ning Paldiski gneissi vahel väga erinev, siis suurim erinevus ilmneb killustike kulumiskindluse Mikro-Deval tulemuste vahel. **Paldiski materjali vastupidavus mehaanilisele kulutamisele on ca 5-6 korda parem, kui uuringusse kaasatud lubjakivikillustikel.** Teine oluline erinevus ilmneb materjalide veeimavuste vahel. **Paldiski materjali veeimavus on ca 6 kuni 12 korda väiksem võrreldes lubjakivikillustikega.**

Tabel 3 - Uuringus katsetatud killustike omadused

Omadus	Materjal ja fraktsioon				
	Lubjakivi 4/31,5 mm	Lubjakivi 16/31,5	Lubjakivi 0/31,5	Halsvik 0/31,5	Paldiski 0/31,5
Näivtihedus, Mg/m ³	2,73	2,72	2,72	2,78	2,68
Veeimavus, %	1,6	1,1	2,3	0,5	0,2
Purunemiskindlus LA	30	29	31	25	23
Kulumiskindlus MDE, %	34,8	29,4	36,5	9,7	6,1
Kulumiskindlus AN, %	-	-	-	-	8,6
Optimaalne veesisaldus, % (mod. Proctor)	-	-	3	3,8	-
Maksimaalne kuivtihedus, Mg/m ³ (mod. Proctor)	-	-	2,13	2,26	-



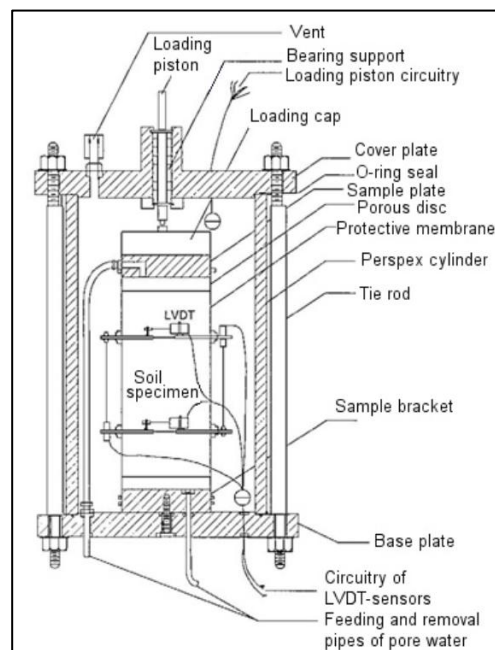
Joonis 16. Katsetatud killustike terastikulised koostised määratuna vastavalt EVS-EN 933-1.

Tampere ülikoolis teostati katsed Joonisel 17 ja Joonisel 18 kujutatud katseseadmes (edaspidi *kolmetelgne katseseade* või *kolmetelgne test*) vastavalt standardile EN 13286-7:2004 (Unbound and hydraulically bound mixtures - Test methods - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures). Katse eesmärgiks oli uurida vaadeldavate killustike püsivate deformatsioonide omadusi mitmeetapilise koormamise käigus.

Katseseadmes ei katsetatud Paldiski fr 0/31,5 mm materjali selle piiratud saadavuse tõttu asendades see Halsviki fr 0/31,5 mm killustikuga, mille omadused (sh genees) on Paldiski killustikule väga sarnased. Detailne katseraport on esitatud käesoleva töö lisa 1. Alljärgnevalt analüüsitakse katsetulemusi.



Joonis 17 - Kolmetelgse tsüklilise surveteimi katseseade



Joonis 18 - Kolmetelgse tsüklilise surveteimi seadme kirjeldus

Kolmetelgses katseseadmes määrati uuritavate killustike:

- jäikusmoodul (ing. resilient modulus, M_r), mis on oma sisult taastuv elastsusmoodul;
- nihkeparameetrid: sisehõordenurk ja nidusus;
- püsiva deformatsiooni näitajad (*shakedown*-piirid).

Tabelis 3 on esitatud kolmetelgses katses kasutatud proovikehad nende tähistustega ning tihedused, veesisaldused ja kuivtihedused pärast katsetusi. Tabelis esitatud tihendustegur ja poorsus on leitud järgmistel eeldustel:

- Lubjakivikillustik fr 4/31,5 mm: mõõdetud erimass $2,62 \text{ Mg/m}^3$, orienteeruv maksimaalne kuivtihedus $1,90 \text{ Mg/m}^3$ (poorsus maksimaalse tiheduse juures 27%);
- Lubjakivikillustik fr 16/31,5 mm: mõõdetud erimass $2,64 \text{ Mg/m}^3$, orienteeruv maksimaalne kuivtihedus $1,80 \text{ Mg/m}^3$ (poorsus maksimaalse tiheduse juures 32%);
- Lubjakivikillustik fr 0/31,5 mm: mõõdetud erimass $2,60 \text{ Mg/m}^3$, modifitseeritud Proctor-teimiga mõõdetud maksimaalne kuivtihedus $2,13 \text{ Mg/m}^3$ (poorsus maksimaalse tiheduse juures 18%);
- Moondekivimist (gneiss) killustik fr 0/31,5 mm: mõõdetud erimass $2,70 \text{ Mg/m}^3$, modifitseeritud Proctor-teimiga mõõdetud maksimaalne kuivtihedus $2,26 \text{ Mg/m}^3$ (poorsus maksimaalse tiheduse juures 16%).

Tabel 4 - Kolmetelgses katses kasutatud proovikehad nende tähistustega ning tihedused, veesisaldused ja kuivtihedused pärast katsetusi

Proovi tähistus	Tihedus, kg/m ³	Veesisaldus, %	Kuivtihedus, kg/m ³	Tihendustegur Poorsus
Lubjakivi 0/31,5 S43_200mm_3u	1,94	6,9	1,89	0,87 ja 28%
Lubjakivi 4/31,5 S43_200mm_1	1,83	3,3	1,75	0,92 ja 33%
Lubjakivi 16/31,5 S43_200mm_2	1,74	3,9	1,70	0,94 ja 36%
Halsvik 0/31,5 S43_200mm_4	2,18	7,0	2,09	0,92 ja 23%
Lubjakivi 0/31,5 S43_200mm_7	1,92	6,7	1,85	0,87 ja 29%
Lubjakivi 4/31,5 S43_200mm_6	1,83	2,7	1,78	0,94 ja 32%
Lubjakivi 16/31,5 S43_200mm_5	1,71	3,0	1,67	0,93 ja 37%
Halsvik 0/31,5 S43_200mm_8	2,16	6,2	2,07	0,92 ja 23%

Resilient modulus (Mr) (jäikusmoodul või elastsusmoodul) iseloomustab kui hästi materjal, mida teekonstruktsioonis kasutatakse, suudab vastu võtta ja taastuda dünaamilisest liikluskoormusest. See mõõdetav omadus aitab hinnata, kui hästi materjal suudab taluda korduvaid koormusi ilma püsivaid deformatsioone tekitamata. Kõrgem Mr väärtus näitab, et materjal on jäigem ja suudab paremini vastu panna koormustele, mis tähendab pikemat teekatte eluiga ja paremat vastupidavust.

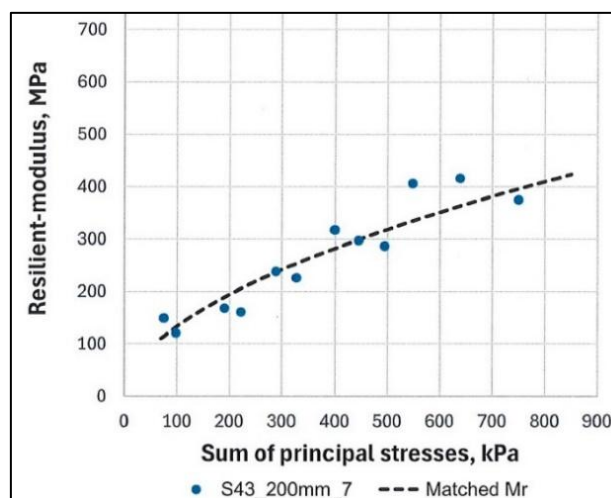
Jäikusmoodul leitakse laborikatsetega kasutades kolmetelgset katseseadet, millega rakendatakse materjalile korduvaid koormusi, millega matkitakse liikluskoormust olukorras, kus materjal on pinnasemassiivis, mõõtes selle deformeerumist ja koormusest taastumist.

Tabelis 4 on esitatud saadud jäikusmoodulite väärtused. Võrdluseks, allika [35] põhjal on peapinge 200 kPa juures fraktsioneeritud killustike jäikusmoodulid saadud umbes 50 kuni 100 MPa võrra väiksemad, kui optimaalse segu killustikel, keskmiselt vastavalt ca 250 kuni 300 MPa vs 300 kuni 350 MPa. Allikas antud katseandmed põhinevad tard- ja moondekivikillustikega tehtud katsetel, settekivimeid nagu paekivi kaasatud ei olnud.

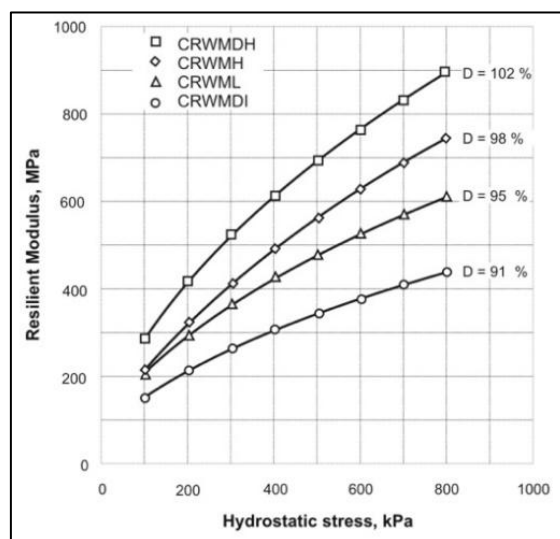
Tabel 5 - Kolmetelgses katses saadud jäikusmoodulid (resilient modulus, Mr)

Proovi tähistus	Kuivtihedus, kg/m ³	Tihendustegur poorsus	Jäikusmoodul, MPa (θ = 200 kPa)
Lubjakivi 0/31,5 S43_200mm_7	1.85	0,87 ja 28%	194
Lubjakivi 4/31,5 S43_200mm_6	1.78	0,94 ja 32%	364
Lubjakivi 16/31,5 S43_200mm_5	1.67	0,93 ja 37%	422
Halsvik 0/31,5 S43_200mm_8	2.07	0,92 ja 24%	174

Käesolevas uuringus saadud jäikusmoodulite tulemused on kirjandusega võrreldes mõneti vastuolulised. Tulemustest järeldus, et fraktsioneeritud materjalid annavad kõrgemaid jäikusmooduli väärtusi, kui optimaalsed segud, kuigi jäikusmoodulite suurusjärgud on kirjanduse andmetega üldiselt võrreldavad. Näiteks Joonis 19 ja Joonis 20 on kujutatud sarnase terakoostisega fr 0/31,5 mm killustike jäikusmoodulite tulemusi, mis madalama tihendusastme („D = 91%“) juures on peaaegu identsed.



Joonis 19 - Käesoleva uuringu lubjakivikillustiku fr 0/31,5 mm jäikusmoodul erinevate peapingete juures



Joonis 20 - Allikast [46] tuletatud graafik sarnase terakoostisega killustikuseguga, kus võrdlusena peaks kasutama tihendusteguri "D = 91%" graafikut.

Andmete vastuolulisus on selgitatav järgmiselt:

- Pehmeim lubjakivikillustik on oma mikrotekstuuurilt karedam, kui kõva tardkivi- või gneisskillustik. Sellest tulenevalt on terakestevaheline hõõrdejõud suurem ning seega on (peamiselt suuremaid, tugevalt üksteise vastu surutud) terasid üksteise suhtes raskem nihutada;
- Käesolevas uuringus leotati katsetatavaid materjale 20 tundi enne katsetust vees, misjärel proovikehades oleval veel lasti välja valguda. Tabelist 3 nähtub, et fr 0/31,5 mm killustikusegudel oli selgelt kõrgem veesisaldus (umbes kaks korda suurem), kui fr 16/31,5 ja 4/31,5 mm killustikel, mis võis mõjutada tulemusi fr 0/31,5 mm proovide kahjuks.

Katsetatud killustike kolmetelgses katseseadmes saadud **sisehõõrdenurgad ja nidusused** on esitatud tabelis 5. Andmete põhjal nähtub tugev erinevus lubjakivist ja gneissist valmistatud fr 0/31,5 mm killustikusegude osas, mis arvatavasti tuleneb materjalide väga erinevast veetundlikkusest. Tabelis 2 kirjeldatud tulemuste alusel on lubjakivi veemavus olnud oluliselt suurem kui gneissil. Kõrgem veesisaldus mõjutab lubjakivi tugevusomadusi negatiivselt, eriti lubjakivi peenemaid fraktsioone (suurusega umbes alla 4 mm) ja olukorras, kus peenosisesisaldus on kõrgem (hinnanguliselt ületab ca 5%).

Tabel 6 - Katsetatud materjalide sisehõõrdenurgad ja nidusused kolmetelgsest katsest

Proovi tähistus	Sisehõõrdenurk, °	Nidusus, kPa
Lubjakivi 0/31,5 S43_200mm_3u	27,7°	12,8
Lubjakivi 4/31,5 S43_200mm_1	41,2°	65,5
Lubjakivi 16/31,5 S43_200mm_2	36,6°	22,2

Proovi tähistus	Sisehõõrdenurk, °	Nidusus, kPa
Halsvik 0/31,5 S43_200mm_4	38,9°	52,9

Katsetatud killustike nihkeparameetrite alusel on võimalik neid võrrelda allikas [36] toodud andmetega, mille põhjal:

- Lubjakivikillustik fr 0/31,5 mm on nõrga kvaliteediga materjal;
- Lubjakivikillustik fr 4/31,5 mm on kõrge kvaliteediga materjal;
- Lubjakivikillustik fr 16/31,5 mm on keskmise kvaliteediga materjal;
- Gneiss fr 0/31,5 mm on kõrge kvaliteediga materjal.

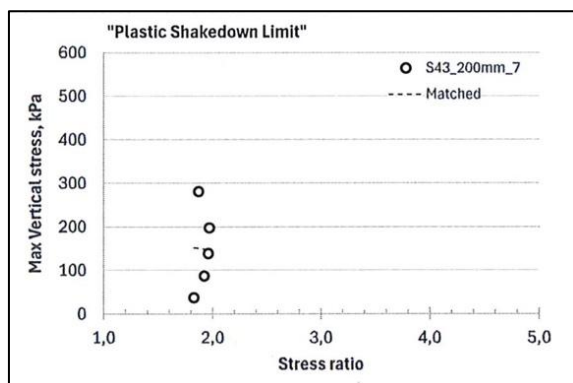
Vastavad võrdlused on esitatud lisas 1 oleva uuringuraporti lisas 5 (Appendix 5).

PÜSIVA DEFORMATSIOONI NÄITAJAD (SHAKEDOWN PIIRID)

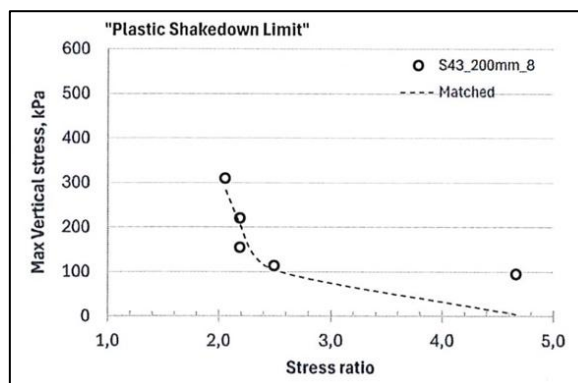
Käesoleva uurimustöö peamiseks eesmärgiks oli mõista, kuidas käituvad erinevad killustikud liikluse poolt tekitatava dünaamilise koormuse all ning mis on killustikaluste elueaks. Tallinna Tehnikakõrgkooli tudeng Ragnar Fortuna-Juks analüüsis aastal 2016 Teeregistri andmete põhjal Eesti teedevõrgu killustikaluste eluiga ning jõudis järelduseni, et: „*paekillustikust aluste eluiga sõltub suuresti liikluskoormusest, kuid ilmselt jääb 15-20 aasta vahele*” ning: „*autor soovib põhimaanteedel killustikust alustega teelõikude ülakihtides kasutada tardkivikillustikust kihte ning alumistes kihtides paekillustikust kihte*”. Nii see, kui eelnevalt käsitletud uuringud annavad põhjust järeldada, et pae- ja tardkivist valmistatud killustikukihtide vastupidavus ning eluiga ei saa samadel tingimustel olla võrdväärne (nii nagu eeldatakse kandevõimearvutusel põhinevates katendiarvutusmetoodikates, sh Eestis).

Tampere ülikoolis teostatud püsiva deformatsiooni katsed kolmetelgse seadmega ei andnud püstitatud küsimusele piisavat vastust, sest katsetulemused olid pigem nõrgemapoolsed ning need ei kirjeldanud killustike pikaajalist vastupidavust konstruktsioonis. Selgelt kõige parem materjal oli lubjakivikillustik fr 4/31,5 mm, teistest materjalidest proovid olid üksteisega sarnased ja suutsid vastu võtta sarnaste deformatsioonide juures umbes samaväärseid pingeid. Teostatud katsetega uuriti *shakedown*- ning plastse roome piire (v.t joonis 10).

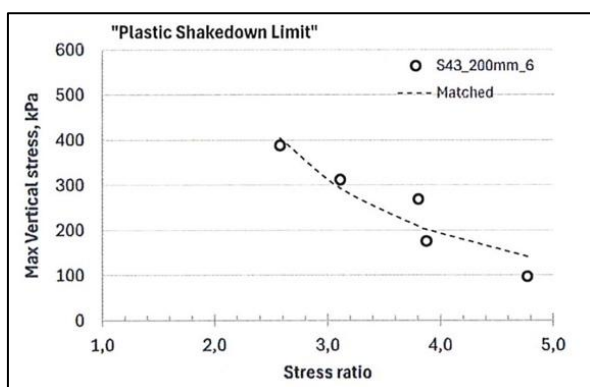
Shakedown piir on olukord, kus uuritav materjal kõigepealt deformeerub plastsel viisil (ehk toimub taastumatu deformatsioon), kuid seejärel deformatsioon stabiliseerub. Saadud katsetulemused annavad uuritavale materjalile maksimaalse lubatava vertikaalse pinge suhtes vastusurvesse tingimusel, et vertikaalpinge tagajärjel ei toimuks materjalil progresseeruvat plastset deformatsiooni. Uuritud killustike *shakedown*-piirid on esitatud Joonis 21 Joonis 22 Joonis 23 Joonis 24. Katsetulemuste kohaselt on turvaline olukord, kui pingete suhe jääb esitatud joone/punktide alla või nendest vasakule poole. Mida suurem on pingete suhe (*stress ratio*), seda vastupidavam on vaadeldav materjal katsetatud *shakedown*-piiri mõistes.



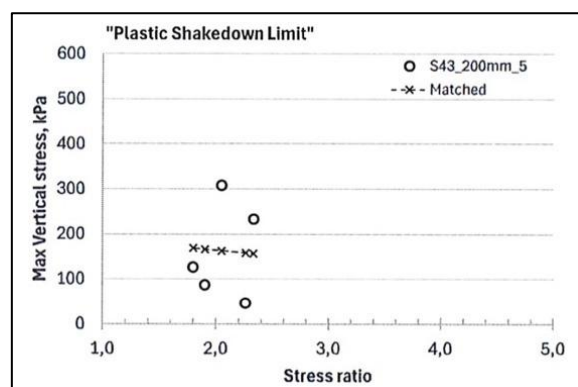
Joonis 21 - Lubjakivi fr. 0/31,5 mm shakedown piir



Joonis 22 - Halsviki gneiss fr. 0/31,5 mm shakedown piir



Joonis 23 - Lubjakivi fr. 4/31,5 mm shakedown piir

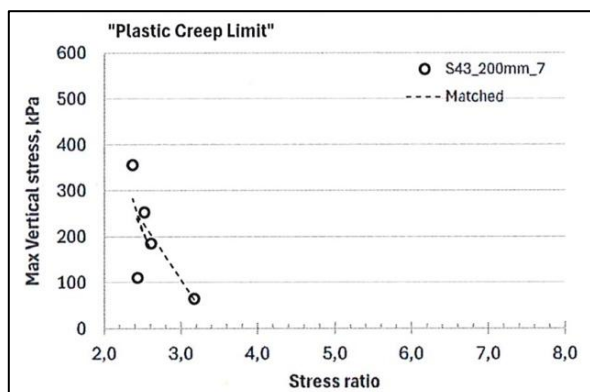


Joonis 24 - Lubjakivi fr. 16/31,5 mm shakedown piir

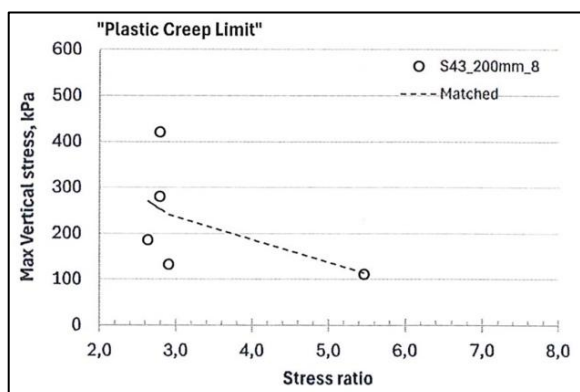
Uuritud materjalide omavaheline võrdlus seoses leitud shakedown piiriga:

- Selgelt kõige paremate näitajatega on lubjakivi fr 4/31,5 mm, millele järgneb gneiss fr 0/31,5 mm, olles siiski nõrgema koormustaluvusega, s.t sellesse kihti tekib püsiv deformatsioon ehk pikiroobas väiksemate liikluskoormuste juures;
- Lubjakivikillustikud fr 0/31,5 mm ja 16/31,5 mm on nõrgemate näitajatega ja kokkuvõtteks omavahel suhteliselt sarnased.

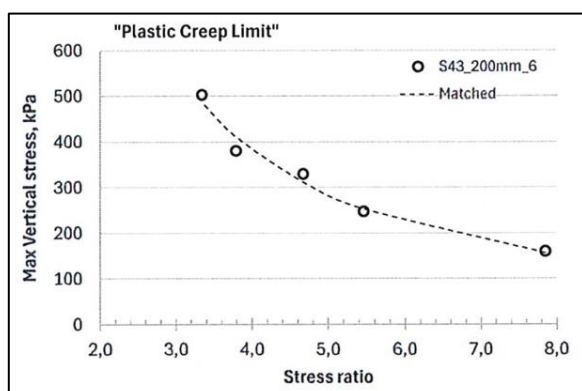
Plastse roome piir näitab maksimaalset vertikaalpinget suhtes vastusurvele, mil materjal deformeerub progresseeruvalt (ehk areneb plastne, taastumatu deformatsioon), kuid kiiret purunemist veel ei toimu. Uuritud killustike plastse roome piirid on esitatud Joonis 25 Joonis 26 Joonis 27 Joonis 28. Katstulemuste kohaselt piiri ei ületata, kui pingete suhe jääb esitatud joone alla ehk vasakule poole.



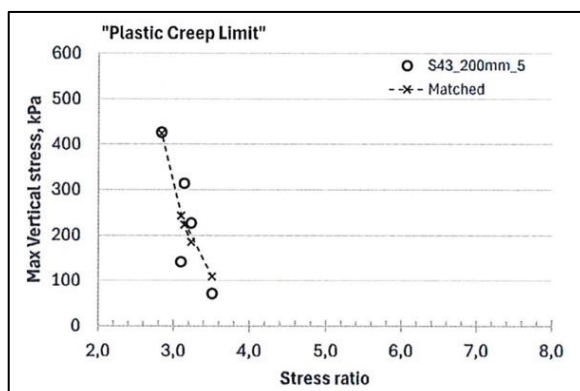
Joonis 25 - Lubjakivi fr. 0/31,5 mm plastse roome piir



Joonis 26 - Halsvik gneissi fr. 0/31,5 mm plastse roome piir



Joonis 27 - Lubjakivi fr. 4/31,5 mm plastse roome piir



Joonis 28 - Lubjakivi fr. 16/31,5 mm plastse roome piir

Plastse roome piir korreleerub hästi *shakedown*-piiri osas tehtud järeldustega.

Katendikonstruktsiooni osas saab esitatud katsetulemuste põhjal teha alljärgneva kokkuvõtte. Kui kõik muud tingimused jäävad samaks ning ainus varieeruvus on killustikaluse omadused tulenevalt saadud katsetulemustest, siis hea kandevõimega (nt liivast) muldkehale rajatud teekatendi orienteeruv asfaltkatte paksus killustikaluse peal peaks teekatendi 20 aasta eluea tagamiseks olema:

- Kumulatiivne liikluskoormus enimkoormatud sõidurajal/suunal 1 miljon 10 tonnist normtelge:
 - killustikaluse fr 4/31,5 mm kasutamisel: 6 cm;
 - ülejäänud killustike kasutamisel: 7 cm;
- Kumulatiivne liikluskoormus enimkoormatud sõidurajal/suunal 5 miljonit 10 tonnist normtelge:
 - killustikaluse fr 4/31,5 mm kasutamisel: 10 cm;
 - ülejäänud killustike kasutamisel: 11 cm;

- Kumulatiivne liikluskoormus enimkoormatud sõidurajal/suunal 20 miljonit 10 tonnist normtelge:
 - killustikaluse fr 4/31,5 mm kasutamisel: 15 cm;
 - ülejäänud killustike kasutamisel: 16 cm.

KOLMETELGSETE KATSETE KOKKUVÕTE

Kolmetelgsete katsete tulemused kinnitavad, et Eestis on seni seoses lubjakivikillustiku kasutamiseга toimitud korrektselt, kuna eelistatud on olnud fraktsioneeritud materjalid ja ridakillustikud. Need materjalid on niisketes oludes parema kandevõime ja elastse taastuvusega, kui optimaalsed lubjakivist killustikusegud.

Kolmetelgsed katsed näitasid, et üldiselt olid katsetatavad killustikud hea kvaliteediga, v.a lubjakivikillustik fr 0/31,5 mm, mis on tundlik veesisalduse suhtes.

Kõige paremate omadustega oli lubjakivikillustik fr 4/31,5 mm tulenevalt oma terakoostisest, heast veejuhtivusest ja karedast mikrotekstuurst.

Fraktsioneeritud killustiku fr 16/31,5 mm katsetulemused (oodatust madalam sisehõrdenurk ja märgatav varieeruvus shakedown testis) viitasid sellele, et materjal on ebastabiilne, mis oli tulenevalt selle terakoostisest mõnevõrra ootuspärane. Fraktsioneeritud killustik toimib suure tõenäosusega realses konstruktsioonis paremini, kui katsetulemused seda näitasid.

Kirjanduse põhjal nähtub, et tardkivist (sh gneiss) valmistatud killustikalused toimivad aga optimaalsete segudena paremini, kui fraktsioneeritud killustikud, sest nende pinna mikrotekstuur on väiksem ja seega kividevaheline hõrdejõud madalam, mistõttu teradevahelist pooriruumi on vaja väiksemate fraktsioonidega täita. Üldiselt võib öelda, et mida ebahütlasema teralise koostisega on teraline materjal, seda paremad on selle tehnilised omadused, kuna eksisteerib laiem valik erineva suurusega osakesi, mis täidavad tühimikud ja soodustavad osakeste kontakti. See suurendab tihedust, tugevust ja jäikust.

Tuginedes allikale [35] on katsetatud gneisskillustik fr 0/31,5 mm heade omadustega, kuid käesolevas uuringus saadud tulemusi mõjutas negatiivselt materjali madal tihendus, mis vähendas oluliselt materjali nihketugevust, ja tõenäoliselt ka katseaegne kõrgem veesisaldus, mis muutis kõva kivimi terad üksteise suhtes libedamaks.

KATSED GÜRAATORIGA

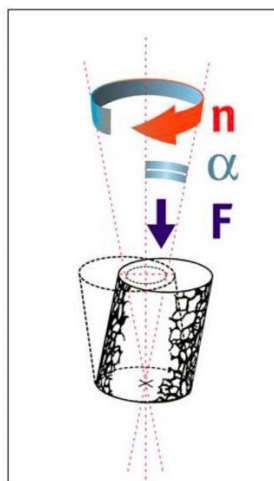
Kuigi kolmetelgsete katsetega saadakse katendiarvutuseks ja killustike omaduste hindamiseks praktilist ja väärtuslikku infot, siis sellega ei ole võimalik modelleerida killustikaluse pikaajalist käitumist. Nagu eelnevalt käsitletud, siis praktikas on leitud, et pikaajalises vaates on paekivikillustike eluiga võrreldes tardkivikillustikuga (sh gneiss) küsitav tulenedes esimese suuremast vee-, külma ja kloriiditundlikkusest. Saamaks enam võrreldavat infot seoses käesolevas uuringus kasutatavate materjalide, sh Paldiski puurkehast valmistatud killustiku koormuskäitumise kohta, teostati Tallinna Tehnikaülikoolis güraortihendajaga katsetihendamisi.

Güraatortihendajat kasutatakse peamiselt asfaltsegude, mõningates riikides ka stabiliseeritud segude laboratoorseks katsetihendamiseks, kuna seade imiteerib paremini rullile sarnast tihendamist. Samal põhjusel on seadet katsetatud ka killustikusegude tihendamisel, mistõttu kasutatakse seda ka käesolevas uuringus.

Güraatortihendaja puhul asetatakse materjal silindrilisse vormi ning asetatakse tihendamisseadmesse. Güraatortihendajaga saavutatakse proovikeha tihenemine samaaegse staatilise surve ning proovikeha nihkumisega, mis on põhjustatud katsekeha keskelte liikumisest. Katsekeha telje liikumine on põhjustatud sellest, et güraatori vorm pööratakse etteantud nurga alla ning pannakse pöörlema 30 pööret minutis. Katsekeha vertikaaltelje liikumine tekitab koonilise pöördpinna, samal ajal kui proovikeha otsad jäävad ligikaudu risti koonilise pinna teljega. Proovikeha liikumine on kujutatud joonisel 29.

Tuginedes allikatele [30] ja [37] kasutati güraatortihendajaga tihendamisel järgmisi parameetreid:

- Vormi läbimõõt 150 mm;
- Proovikehale avaldatav vertikaalne surve F :
 - Lubjakivikillustike katsetamisel kasutati 50, 150, 300 ja 600 kPa;
 - Gneisskillustike (Halsvik ja Paldiski) katsetamisel kasutati 600 kPa;
- Pöördnurk $\alpha = 1,25^\circ$;
- Pöörlemiskiirus $n = 30$ pööret/min;
- Pöörete arv kõikide katsete puhul 400 pööret;
 - Halsviki gneisskillustikule tehti lisaks täiendav katseseeria kasutades 800 pööret.



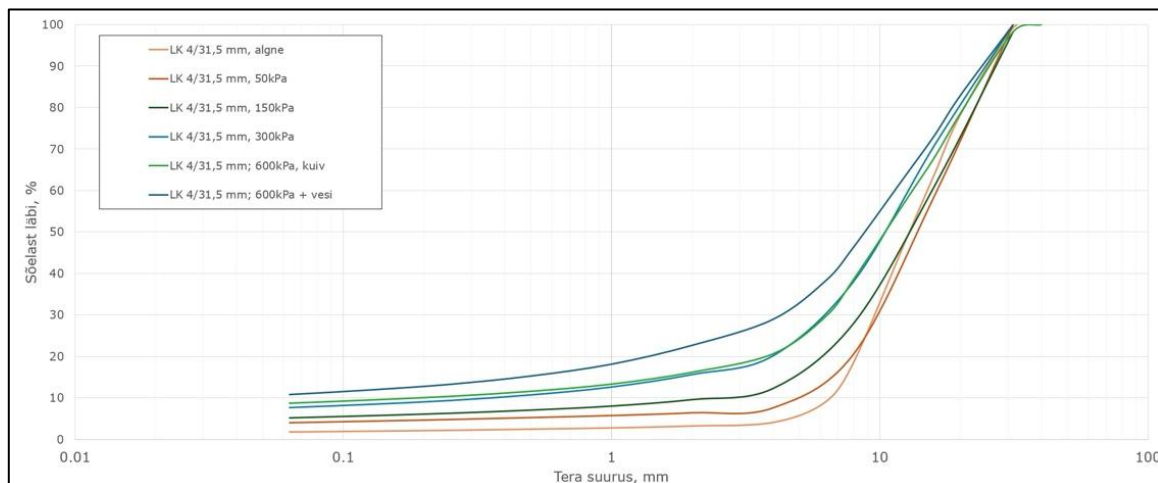
Joonis 29 - Güraatortihendaja katsepõhimõte, kus „F” on proovikehale avaldatav vertikaalne surve, „ α ” kirjeldab surve ekstsentrilisust (pöördnurka) ja „n” iseloomustab pöörete kiirust (p/min)

Katse käigus registreeriti proovikeha kõrgus peale igat pööret. Peale iga katsetust määrati materjali veesisaldus, mis võimaldas leida kuivtiheduse ja poorsuse, ja terastikuline koostis.

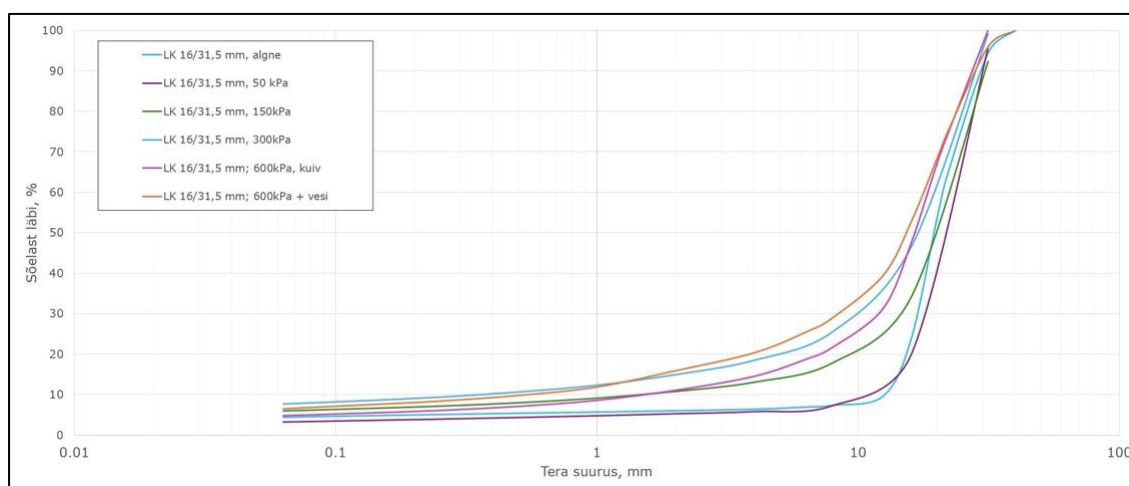
Katsetatud materjalide veesisaldusena kasutati järgmisi väärtusi:

- Lubjakivikillustik fr 4/31,5 mm:
 - 600 kPa vertikaalpinge juures: kuivalt (katsejärgne veesisaldus 0%) ja peale 20h vees leotamist (katsejärgne veesisaldus 4,5%);
 - 50, 150 ja 300 kPa vertikaalpinge juures: peale 20 h vees leotamist, katsejärgsed veesisaldused olid vastavalt 3,7%; 3,7% ja 4,4%;
- Lubjakivikillustik fr 16/31,5 mm:
 - 600 kPa vertikaalpinge juures: kuivalt (katsejärgne veesisaldus 0%) ja peale vees leotamist (katsejärgne veesisaldus 2,4%);
 - 50, 150 ja 300 kPa vertikaalpinge juures: peale 20h vees leotamist, katsejärgsed veesisaldused olid vastavalt 3,1%; 3,7% ja 3,9%;
- Lubjakivikillustik fr 0/31,5 mm:
 - 600 kPa vertikaalpinge juures: kuivalt (katsejärgne veesisaldus 0%), optimaalse veesisalduse juures (katsejärgne veesisaldus 4,0%) ja peale 20 h vees leotamist (katsejärgne veesisaldus 8,1%);
 - 50, 150 ja 300 kPa vertikaalpinge juures: optimaalse veesisalduse juures, katsejärgsed veesisaldused olid vastavalt 4,1%; 3,9% ja 3,8%;
- Halsvik gneiss:
 - 600 kPa vertikaalpinge ja 400 pöörde juures: kuivalt (katsejärgne veesisaldus 0%), optimaalse veesisalduse juures (katsejärgne veesisaldus 3,8%) ja peale 20 h vees leotamist (katsejärgne veesisaldus 5,7%);
 - 600 kPa vertikaalpinge ja 800 pöörde juures: optimaalne veesisaldus (katsejärgne veesisaldus 3,5%);
- Paldiski gneiss:
 - 600 kPa vertikaalpinge ja 400 pöörde juures: kuivalt (katsejärgne veesisaldus 0%), optimaalse veesisalduse juures (katsejärgne veesisaldus 2,8%) ja peale 20 h vees leotamist (katsejärgne veesisaldus 4,8%).

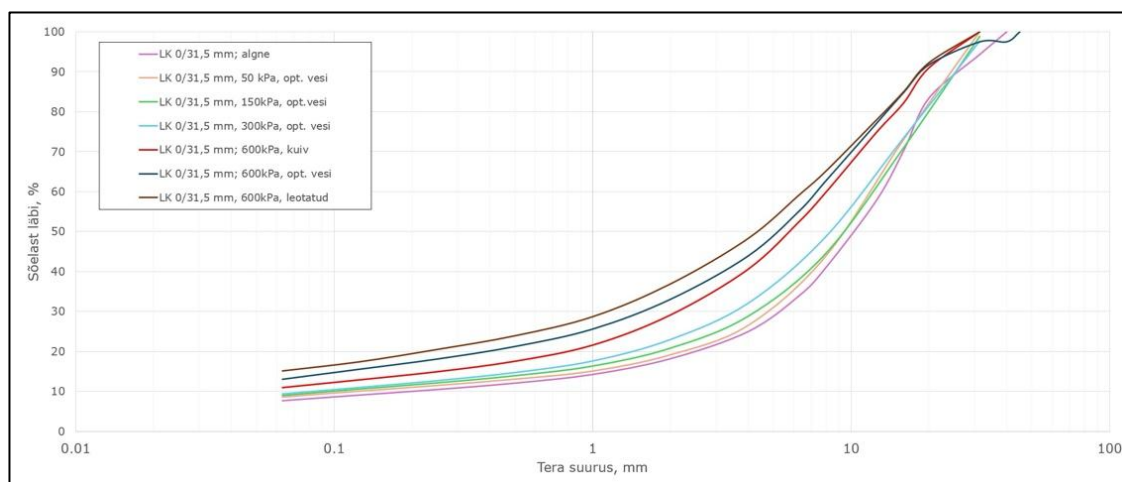
Joonistel 30 kuni 34 on esitatud katsetatud materjalide terastikulised koostised peale güraatorikatseid.



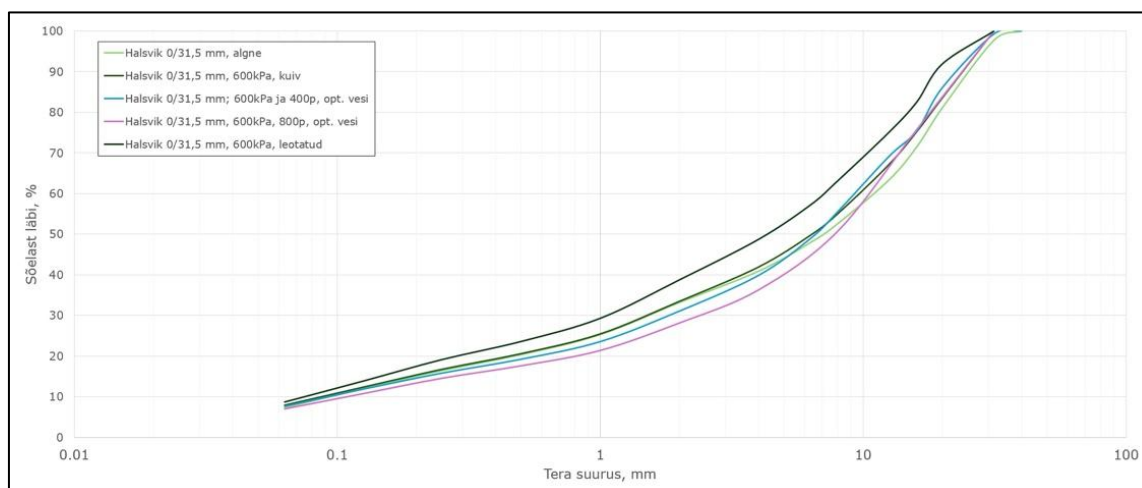
Joonis 30 - Lubjakivikillustiku fr 4/31,5 mm terakoostised enne ja peale güraatorikatseid.



Joonis 31 - Lubjakivikillustiku fr 16/31,5 mm terakoostised enne ja peale güraatorikatseid.

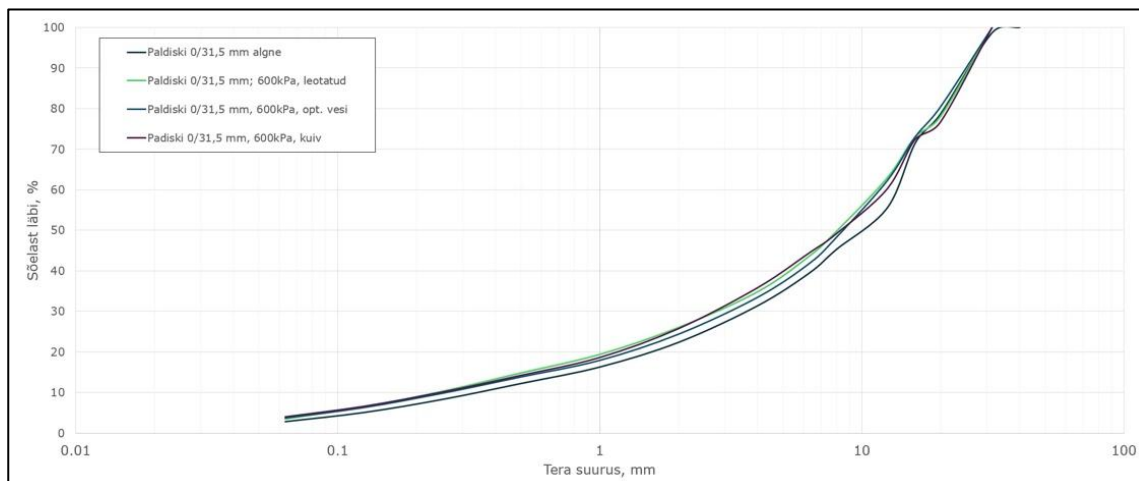


Joonis 32 - Lubjakivikillustiku fr 0/31,5 mm terakoostised enne ja peale güratorikatseid.



Joonis 33 - Halsvik gneiss killustiku fr 0/31,5 mm terakoostised enne ja peale güratorikatseid.

Halsviki osas näib terakoostise tulemusi mõjutavat killustiku mõningane ebahomogeensus, nt algne terakoostis on veidi peenemateralisem, kui güratorist peale 800 pööret saadud terakoostis.



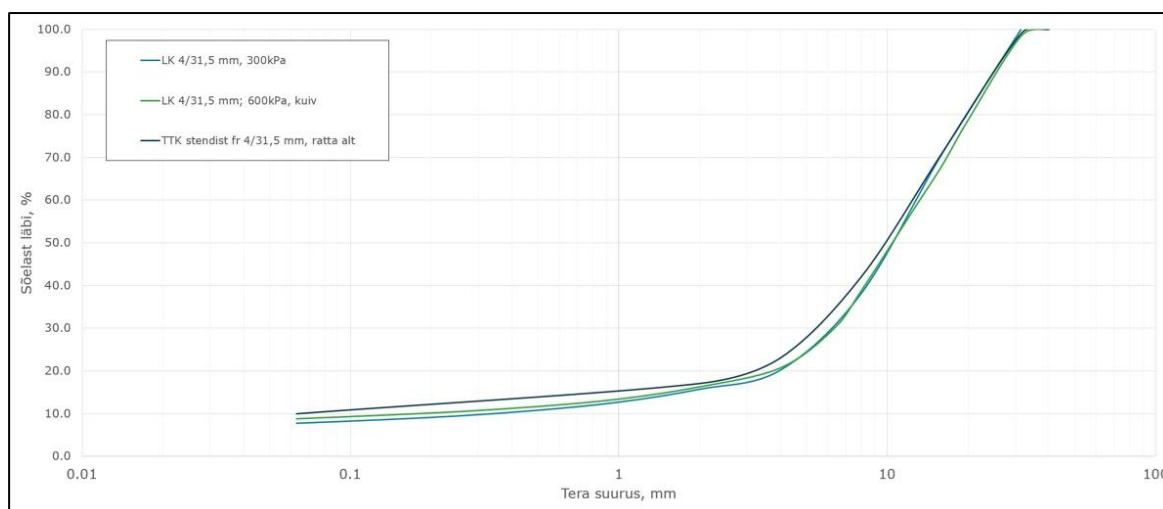
Joonis 34 - Paldiski gneissi fr 0/31,5 mm terakoostised enne ja peale güratorikatseid.

Terakoostiste põhjal nähtub järgmist:

- Vertikaalsurve 600 kPa juures toimus kõikide lubjakivikillustike osas märkimisväärne terakoostise peenenemine ehk killustikuterad purunesid. Oluline mõjutaja siinjuures oli vesi, kuivalt oli purunemine väiksema ulatusega;
 - Seega lubjakivikillustike puhul on oluline hoida killustikalused võimalikult kuivana;
- Vertikaalsurve 600 kPa juures gneisskillustikud kas ei purunenud üldse (Paldiski) või oli purunemine vähene (Halsvik);
 - Suurendades 600 kPa juures Halsviki materjalile güratori pöörded kaks korda (ehk algselt 400 pöördelt 800 pöördeni) ei mõjutanud see materjali purunemist;
 - Seega katsetatud gneissist killustikusegude omadused terakoostise mõistes ka suure liikluskoormuse tingimustes ei muutu või on muutused minimaalsed;
- Güratori vertikaalsurve 50 kPa ei mõjunud lubjakivikillustikule purustavalt;
- Güratori vertikaalsurve 150 kPa purustas lubjakivikillustikku minimaalselt, kuid 300 kPa juba selgelt rohkem;
 - Sellest tulenevalt peaks lubjakivist alustega teekonstruktsioonid (asfaltkatete ja muude pealetulevate kihtide paksused) projekteerima selliselt, et liikluskoormus oleks pealmiste kihtidega hajutatud <150 kPa juurde;
 - Katsetatud gneissist killustik liikluskoormusest tuleva vertikaalkoormuse 600 kPa (aga tõenäoliselt ka suuremate vertikaalsurvete) juures ei purune. Killustikaluse peale tuleva teekonstruktsiooni osa (asfaltkatete paksused) tuleb projekteerida tulenevalt kandevõimest ja/või asfaldi väsimuskindlusest ja/või shakedown piirist;

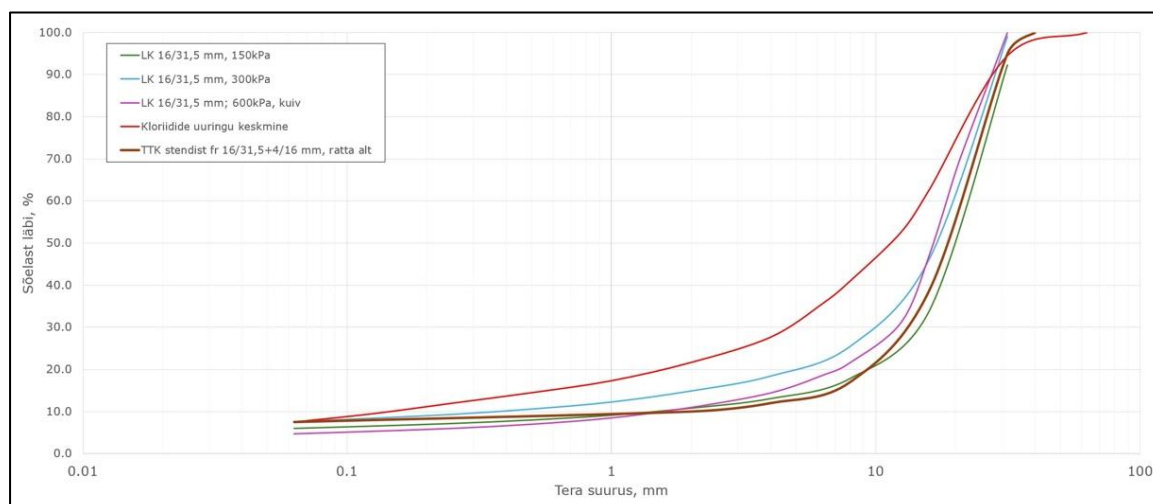
- Lubjakivikillustik purunes võrreldavalt olukordades, kus vertikaalsurve oli 600 kPa, kuid killustik oli kuiv ja kus vertikaalsurve oli 300 kPa, kuid killustik oli optimaalse veesisalduse juures (niiske). Selline tulemus viitab veelkord asjaolule, et lubjakivikillustikust alused tuleks hoida võimalikult kuivana.

Tallinna Tehnikakõrgkooli raskeveokisimulaatoriga [32] katsetati samuti lubjakivikillustikke fr 0/31,5 mm, 4/31,5 mm ja 16/31,5 mm. On tähelepanuväärne, et peale katsetust, kus killustikalustes toimus katastroofiline purunemine, oli fr 4/31,5 mm terakoostis peaaegu identne võrreldes käesoleva uuringu käigus güraatoriga optimaalse veesisalduse 300 kPa ning kuivalt 600 kPa juures saadud katsejärgsete terakoostisega, joonis 35. See kinnitab leitud järeldust, et lubjakivikillustikust aluse pikaealisuse huvides peaks selle peale tulevad vertikaalpinged olema <150 kPa.



Joonis 35 - Güraatorikatse (300 kPa optimaalse veesisalduse juures ning 600 kPa kuivalt) läbinud lubjakivikillustiku fr 4/31,5 mm terakoostis võrreldes TTK uuringust saadud terakoostisega.

Võrreldes TTK stendi terakoostist lubjakivikillustiku fr 16/31,5 mm osas, siis güraatorikatsetes toimus 300 kPa juures suurem killustiku purunemine ning TTK katsejärgne terakoostis on väga sarnane 150 kPa juures leitud terakoostisega (joonis 36). Joonisele on lisatud võrdluseks ka kloriidide uuringu [31] keskmine terakoostis, kus killustikalus oli samuti ehitatud kasutades fraktsioneeritud killustikku fr 16/31,5 mm. See viitab fraktsioneeritud lubjakivikillustiku suurele kalduvusele aja jooksul dünaamilise koormuse mõjutusel puruneda ning seda eriti olukorras, kus lubjakivikillustik on niiske või märg.



Joonis 36 - Guraatorikatse (150 ja 300 kPa optimaalse veesisalduse juures ning 600 kPa kuivalt) läbinud lubjakivikillustiku fr 16/31,5 mm terakoostis võrreldes TTK ja kloriidide uuringutest saadud terakoostisega.

Saadud andmed näitavad, et lubjakivikillustikul on dünaamilise koormuse (täpsemalt, sellise koormuse juures, mis nõ kulutab killustiku terasid üksteise vastu) juures märkimisväärne potentsiaal peenenemiseks. Avatud ja suurte pooridega killustike (nagu fr 16/31,5 mm ja 4/31,5 mm) puhul tekib seejuures oht kihipaksuse oluliseks vähenemiseks (kihi ruumala väheneb), sest dünaamilise koormuse käigus purustatakse killustike kontaktpinnad, millest vabanenud osised liiguvad pooriruumi. Sellist olukorda nähti nii TTK raskeveokisimulaatori kui ka käesoleva uuringu guraatorikatse andmetest.

Guraatorikatse 600 kPa koormuse juures saavutasid lubjakivikillustikud optimaalse veesisalduse juures maksimaalse kuivtiheduse:

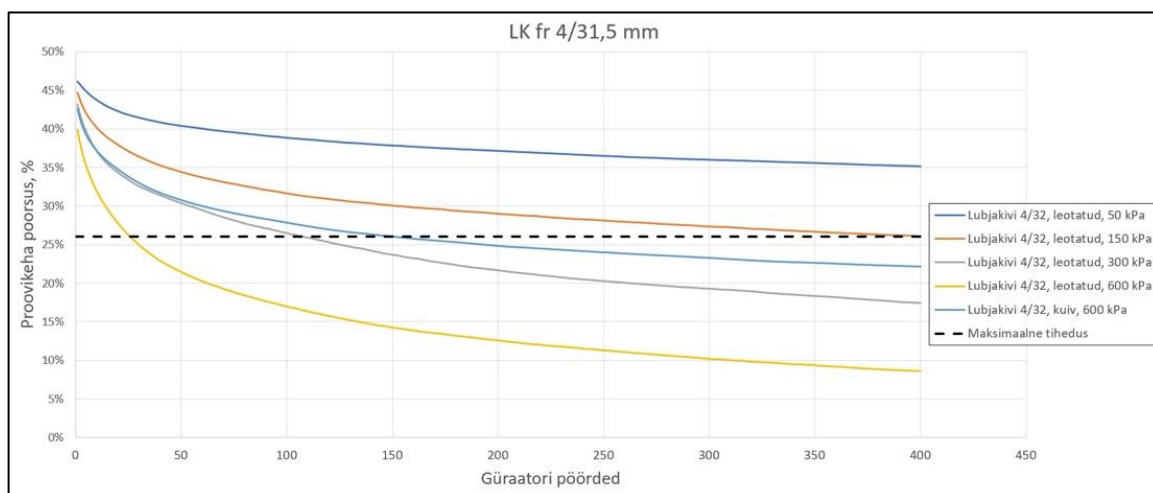
- fr 4/31,5 mm umbes 30 pöördega;
- fr 16/31,5 mm umbes 50 pöördega;
- fr 0/31,5 mm umbes 390 pöördega.

Lühikese terakoostisega ja suure poorsusega lubjakivikillustikud tihenesid kiiresti, kuid sellele järgnev täiendav koormus hakkas killustikke märkimisväärselt purustama. Materjalide kihipaksus muutus vahemikus alates maksimaalse tiheduse saavutamisest kuni 400 pöörde lõpuni:

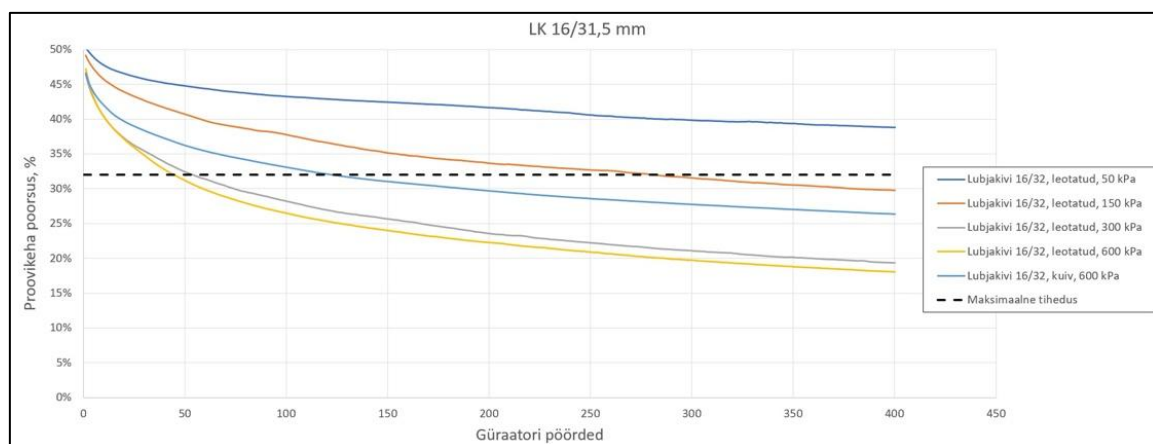
- fr 4/31,5 mm: 17,9%;
- fr 16/31,5 mm: 15,5%.

Optimaalsetes segudes (fr 0/31,5 mm) see-eest kihipaksuse muutust taolises ulatuses ei toimunud, sest maksimaalsed kuivtihedused saavutati umbes 400 pöördega, aga terakoostise analüüsi kohaselt purunes lubjakivi sellegipoolest märkimisväärselt.

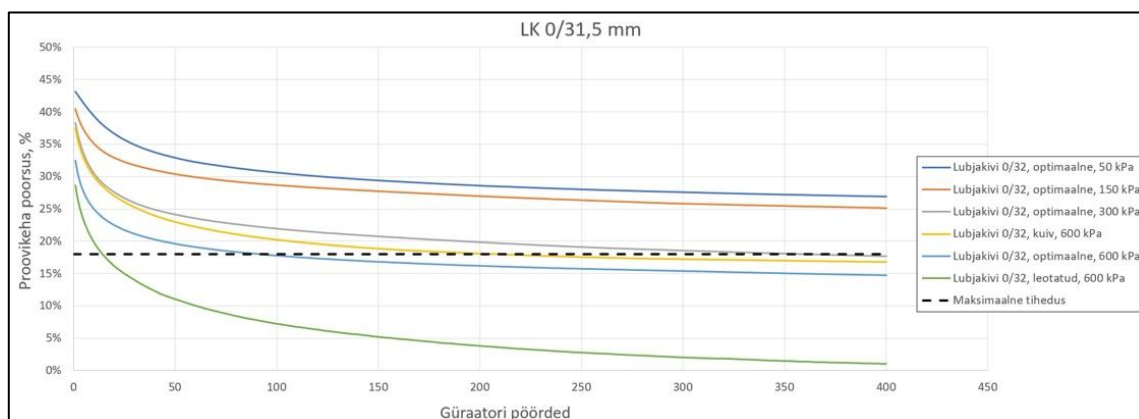
Guraatorikatsetega leitud kihipaksuste muutusi on käesolevas aruandes väljendatud läbi poorsuse, mis on arvutatud kuivmahumassi kaudu. Tulemused on esitatud joonistel 37 kuni 41, kus musta katkendjoonena on näidatud see poorsus, mis vaadeldaval materjalil maksimaalse tiheduse juures enne täitematerjaliosakeste purustamist orienteeruvalt on. Koostatud graafikutelt on tuletatavad ka need guraatori seaded, mida erinevate killustike puhul maksimaalse tiheduse määramiseks laboris kasutada võiks.



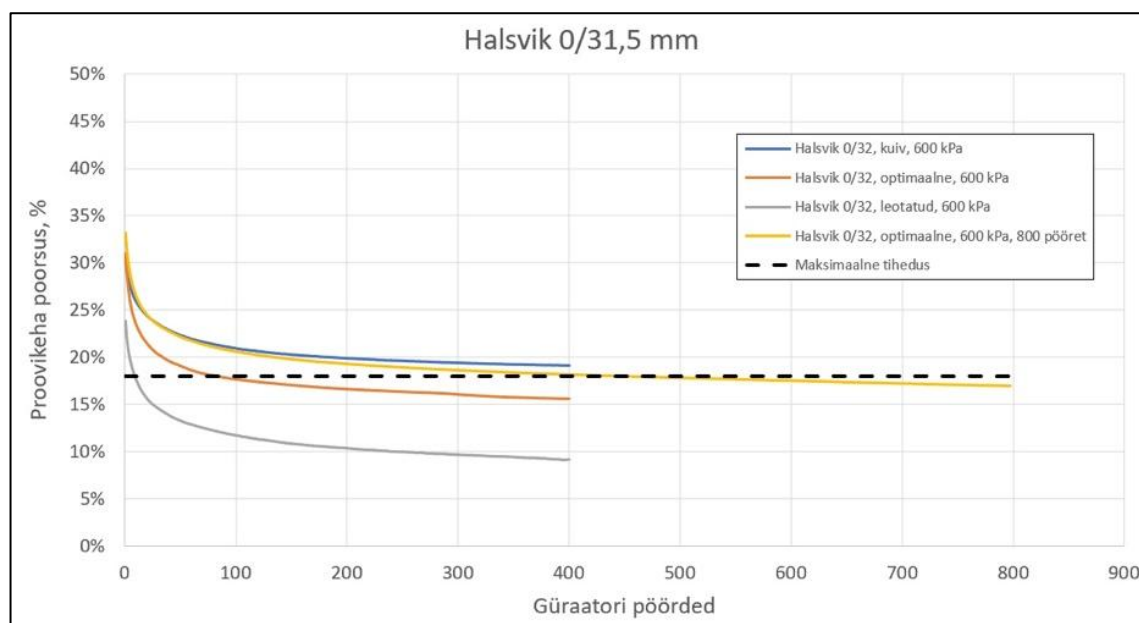
Joonis 37 - Lubjakivikillustiku fr 4/31,5 mm proovikeha poorsuse muutused güraatoriga tihendamisel võrreldes orienteeruva maksimaalse tiheduse juures oleva poorsusega.



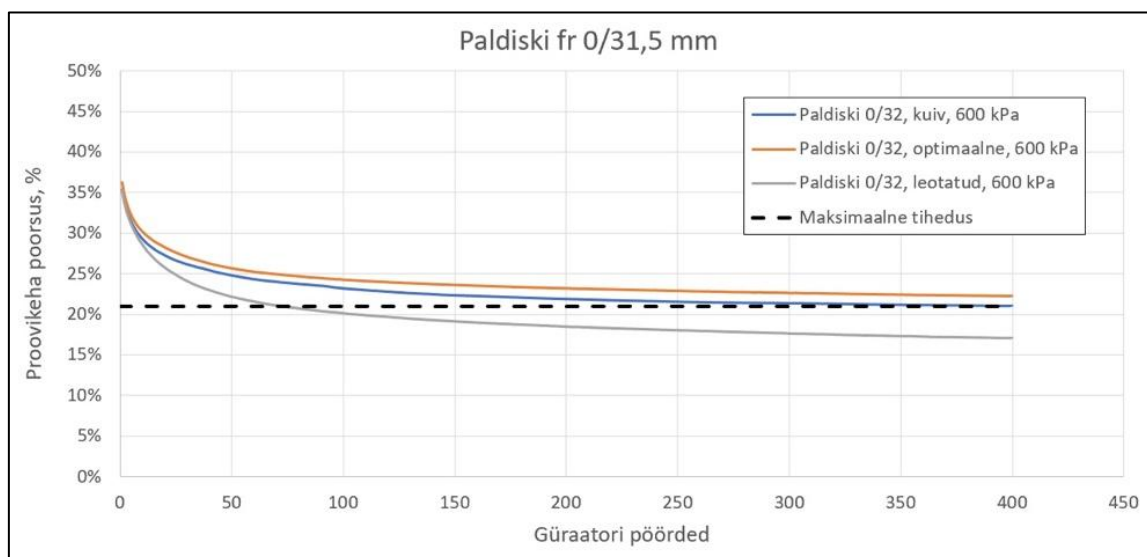
Joonis 38 - Lubjakivikillustiku fr 16/31,5 mm proovikeha poorsuse muutused güraatoriga tihendamisel võrreldes orienteeruva maksimaalse tiheduse juures oleva poorsusega.



Joonis 39 - Lubjakivikillustiku fr 0/31,5 mm proovikeha poorsuse muutused güraatoriga tihendamisel võrreldes orienteeruva maksimaalse tiheduse juures oleva poorsusega.



Joonis 40 - Halsvik gneiss killustiku fr 0/31,5 mm proovikeha poorsuse muutused güraatoriga tihendamisel võrreldes orienteeruva maksimaalse tiheduse juures oleva poorsusega.

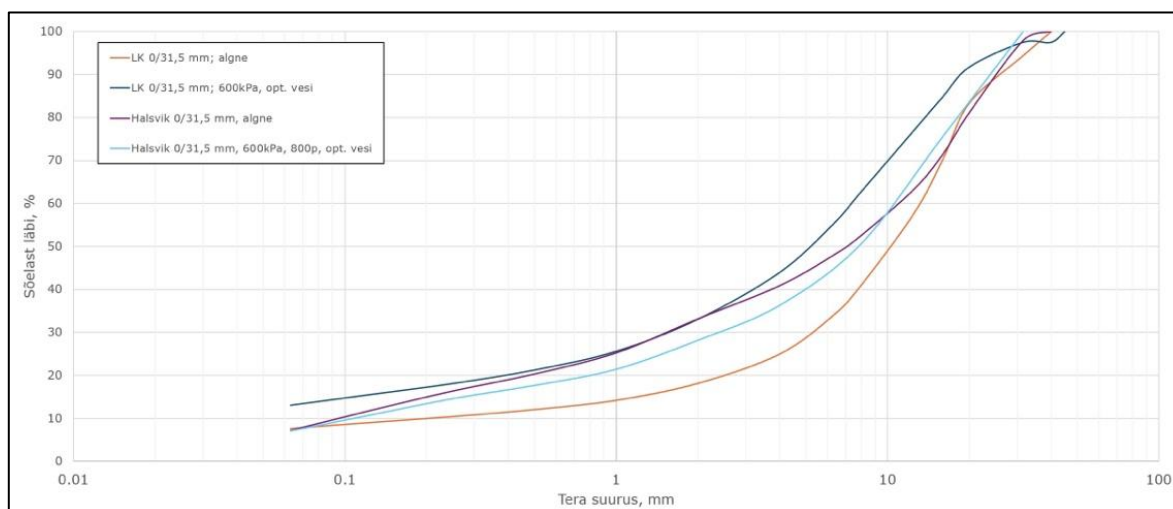


Joonis 41 - Paldiski gneiss killustiku fr 0/31,5 mm proovikeha poorsuse muutused güraatoriga tihendamisel võrreldes orienteeruva maksimaalse tiheduse juures oleva poorsusega.

Põhiline erinevus lubjakivi ja gneissi puhul seisneb asjaolus, et viimase puhul muutuvad poorsust näitavad jooned pea horisontaalseks ehk kiht tiheneb teatud piirist (mis on praktiliselt maksimaalse tiheduse piir) edasi väga aeglaselt ning materjali poorsus peaaegu ei muutu. See tähendab, et materjal säilitab oma elastsed omadused ning selle osised ei purune. Lubjakivikillustike puhul on aga kõikide fraktsioonide puhul poorsuse jooned selgelt enam langevad ehk poorsus on pidevas vähenemises. See saab toimuda vaid täitematerjaliosakeste purustamise ja pooriruumi liikumise teel.

Graafikutelt nähtub, et avatud ja suurte pooridega segude fr 4/31,5 mm ja 16/31,5 mm koormamisega jätkamisel need vajuvad kokku ehk nendes areneb püsiv deformatsioon. See tekib füüsilise täitematerjaliterakeste purunemise tõttu, mitte niivõrd *shakedown*-teooria kohaselt, kus sisuliselt määravaks on täitematerjalide nihkekindlus.

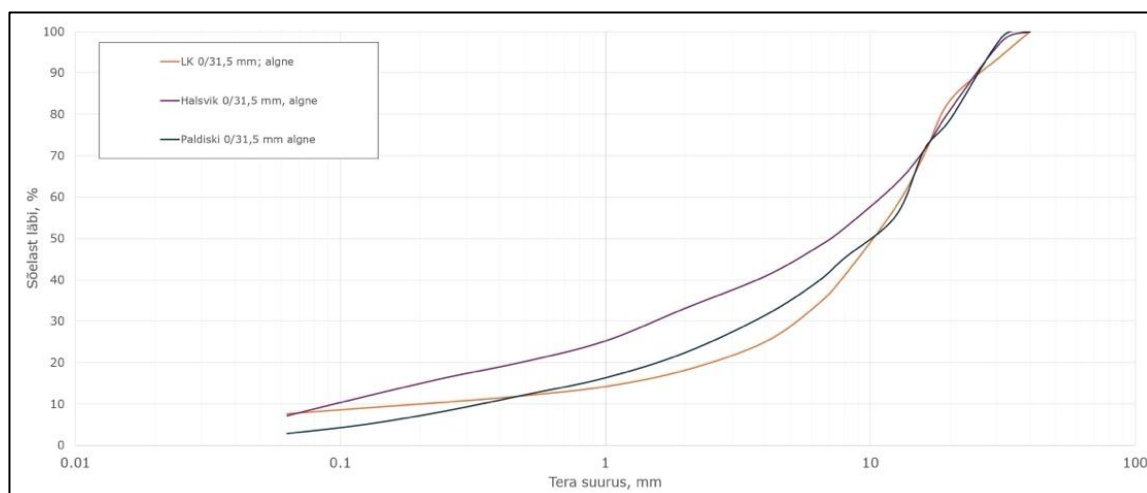
Joonis 40 on kujutatud olukorda, kus Halsvik 0/31,5 mm segu koormati 600 kPa juures kaks korda suurema pöörete arvuga ehk 400 pöörde asemel 800 pöördega. Halsvik 0/31,5 mm proovikehal saavutati 800 pöördega sama proovikeha kõrguse vähenemine (ehk püsiv deformatsioon), mis lubjakivikillustiku fr 0/31,5 mm 400 pöördega, kusjuures terakoostiste põhjal gneisskillustik pigem tihenes, kuid lubjakivikillustik purunes (Joonis 42). Siinjuures on oluline märkida, et märkimisväärselt on kasvanud proovi peenosiste sisaldus, mis on materjali omaduste ja nende säilimise seisukohalt olulise tähtsusega.



Joonis 42 - Halsvik gneiss fr 0/31,5 mm ja lubjakivi (LK) fr 0/31,5 mm terakoostise muutused peale guraatoris tihendamist 600 kPa koormuse juures.

KOKKUVÕTE

- Lubjakivikillustike kasutamisel teede aluskihina (kandva kihina) on eelistatud suurte pooridega segud ehk fraktsioneeritud killustikud (nt 16/31,5 mm) ja ridakillustikud (nt fr 4/31,5 mm). Lubjakivikillustikust optimaalsed segud (fr 0/31,5 mm) on väga tundlikud veesisalduse muutustesse ning märgunud materjal kaotab oluliselt oma omadustes. Katendiarvutuses tuleks lubjakivikillustikust optimaalsete segude elastsusmoodulina kasutada väiksemaid väärtusi, kui suurte pooridega segude osas;
- Katsetused kolmetelgses katseseadmes näitasid, et lubjakivikillustiku kasutamisel toimib kõige paremini ridakillustik ehk fr 4/31,5 mm. Nii guraatorikatsete kui Tallinna Tehnikakõrgkooli raskeveokisimulaatori katsete põhjal saadud teadmised ja kogemused on näidanud, et konstruktsioonis toimivad fraktsioneeritud killustikud ja ridakillustikud võrreldavalt/sarnaselt, kuid ridakillustikul on parem toimivus suhteliselt vahetult peale ehitust ehk killustiku järeltihenedisest tekkiv potentsiaalne algroobas teedel saab olema väiksem. Sellegi poolest toimub eksploatatsioonis materjali purunemine;
- Tardkivist (sh gneisist) killustikku on killustikaluses parem kasutada optimaalsete killustikusegudena (fr 0/31,5 mm), kusjuures väga hästi toimis killustikusegu, mis koostati käesoleva uuringu käigus Paldiski gneissile. Halsviku killustikusegu toimis hästi, kuid tõenäoliselt oleks toimunud paremini, kui terakoostis oleks olnud veidi jämedateralisem. Nende võrdlus on esitatud joonisel 42, kus on antud ka katsetes kasutatud lubjakivi fr 0/31,5 mm terakoostis;



Joonis 43 - Uuringus kasutatud fr 0/31,5 mm killustike terakoostised enne katsetusi.

Paldiski gneissi osas soovitame lähtuda sellest terakoostisest, mis käesolevas uuringus sellele koostati. Sealjuures võib sidumata segu suurim teramõõt D võib olla suurem, kui 31,5 mm.

- Katsetulemuste põhjal kolmetelgses katseseadmes ei võimalda kandevõimel põhineva katendiarvutuse jaoks kuigivõrd eristada omavahel lubja- ja gneisskillustikust materjale, mistõttu katendiarvutuses vaid elastsusmooduli kasutamisel ei saada erinevat päritolu materjalide kasutamisel võrreldavat efekti. Lubjakivi kivimi omaduste tõttu (peamiselt kareda mikrotekstuuri tõttu) omab see killustikaluse ehitamisel väga head kandevõimet;
- Güraatorikatsetused näitasid lubjakivi väga suurt potentsiaali puruneda dünaamilise koormuse mõjutusel, mis põhjustab liiga suure koormuse juures suurte pooridega segude korral märgatavalt suure kihipaksuse vähenemise.
- Teekonstruktsiooni projekteerimisel tuleks lähtuda nõudest, et liikluse poolt tulenev vertikaalsurve lubjakivist killustikalusele jääks alla 150 kPa, kuigi ka sellises olukorras jätkub killustikuterade purunemine liikluskoormuse mõjutusel.
- Güraatortihendajaga tehtud katsetega nähti, et gneissist killustik ei purune ka suurte koormuste juures. Isegi kui killustikaluses areneb *shakedown*-piiri ületamisega kaasnev püsiv deformatsioon, ehk materjal nihkub, siis selle tagajärjel killustikuterad ei purune ning killustiku kui materjali eluiga ei vähene. Seega killustikaluses olev materjal on võrreldavalt taaskasutatav võrreldes uue materjali kasutamisega. Güraatorikatsete põhjal saab eeldada / järeldada, et käesolevas uuringus katetatud gneisist killustiku ja sellest valmistatud killustikaluse eluiga on vähemalt 50 aastat, ehk 2,5 korda pikem kui lubjakivikillustikust aluse eluiga. Selline järeldus on põhjendatav ka Soome kogemusega [38].

KIVIMI OMADUSTE MÕJU ASFALTKATETE ELUEALE

Asfaltsegud ja nendest rajatud katendikihid on viskoelastsed materjalid, mis koormamisel käituvad korraka nii viskoosselt (kuju mitte taastav komponent) kui ka elastselt (kuju taastav komponent). Nende komponentide mõju asfaltkatte omadustele sõltub väga suurel määral a) temperatuurist ning b) koormamise iseloomust. [39]

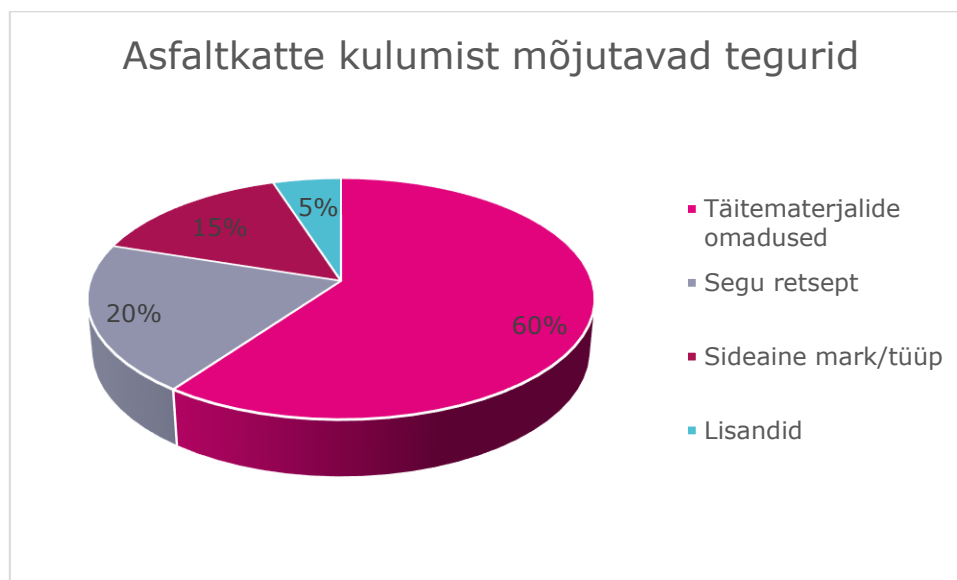
Asfaldist konstruktsioonikihi viskoelastsed omadused sõltuvad asfaltsegu koostises kasutatud sideaine ehk bituumeni omadustest. Ka asfaltkatte võime pidada vastu korduvast koormamisest tingitud väsimuspragudega ning madalatel temperatuuridel tekkida võivate põikpragudega on seotud segu retsepti ja segus kasutatud bituumeni omadustega. Asfaltkatte võime osutada vastupanu jäävdeformatsioonide, ehk pikiroobaste tekkele on seotud asfaltsegu retsepti omadustega ning eelkõige täitematerjalide terastikulise koostise, bituumeni omaduste ja asfaltsegu poorsusomadustega. [39], [40], [41], [42], [43]

Vastupidavusele orienteeritud omadustest saab välja tuua vastupidavuse külmumis- ja sulamistsükli teele. Kogemuslikult on leitud, et kui täitematerjalide massikadu pärast kümnet külmumis- ja sulamistsüklit soolvees standardi EN 1367-6 järgi määratuna jääb alla 4%, siis sobib see kasutamiseks nende teede kulumiskihis asfaltsegudes, mille libedusetõrjet teostatakse kloriidide. Tinglikult võib ka öelda, et sellisel juhul on tegemist tard- või moondekivimiga. Võrreldes tavaliste katendite erinevates kihtides kasutatavate sidumata segudega või fraktsioneeritud jämetäitematerjalidega on asfaltsegudes kasutatavad täitematerjalid konstruktsioonis bituumeniga kaetud, mis omakorda takistab vee ning soola täitematerjali sisse imbumist.

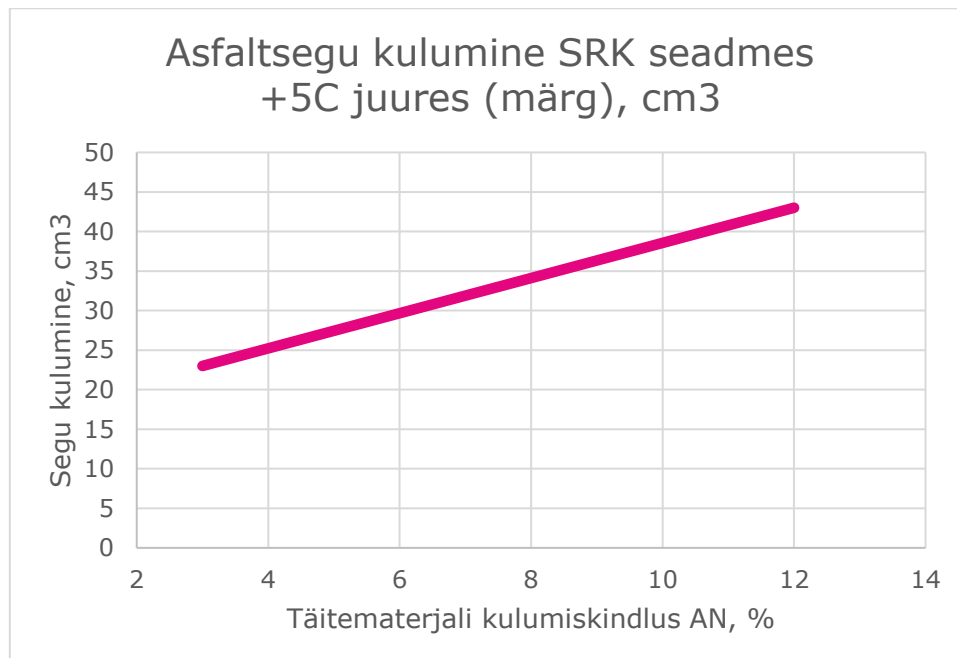
Teekatete defekti tüüp, mida täitematerjali tugevusomadused otseselt mõjutavad, on kulumisroobaste teke. Kui tee konstruktsioon on korrektselt projekteeritud ning tee kandevõime on vastavuses tee liikluskooormusega, siis on naastrehvide kasutamisest tingitud kulumine peamine roobaste arengu kiirust mõjutav tegur. Teekatete kulumist mõjutavad vaadeldava teelõigu liiklussagedus (naastrehvidega autode liiklussagedus), maksimaalne lubatav piirkiirus, tee laius ja teekatte rajamiseks kasutatud asfaltsegu omadused. Erinevad uuringud on näidanud üheselt, et asfaltkatete osas omavad kulumiskindlusele kõige suuremad mõju segus kasutatud täitematerjalide omadused ning jämetäitematerjalide osakaal segus. [44][45][46]

Esimene põhjalikum uuring, mis käsitles asfaltkatete kulumisroobaste teket ning nende arengut, pärineb Soomest, kus 1987. aastal käivitati viie aasta pikkune laiapõhjaline asfaltkatete alane uuring **ASTO** (*Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma*). Uuringuga tehti selgeks, et kaks peamist tegurit, mis mõjutavad teekatte kulumist on täitematerjalide vastupidavus mehaanilisele kulumisele (kulumiskindlus) ning segu retsept (Joonis 44). Viimase all peeti silmas jämetäitematerjali (üle 4 mm osiste) osakaalu asfaltsegus. Sisuliselt järeldati, et mida parem on täitematerjali vastupidavus mehaanilisele kulumisele ning mida rohkem on asfaltsegus jämedaid täitematerjali osiseid, seda parem on rajatud teekatte vastupidavust naastrehvidest tingitud kulumisele. ASTO uuringuga selgitati välja

ka täna praktikas laialdaselt kasutatava täitematerjali kulumiskindluse AN seos asfaltsegu laboratoorse kulumisega (Joonis 45). Laboratoorses tingimustes kulumise hindamiseks kasutati SRK (*sivurullakulutuslaite*) seadet, mis imiteerib naastrehvide mõju silindrilisele asfaldist proovikehale. Tänapäevaks meetodit laialdaselt ei kasutata ning see on asendunud Rootsis välja töötatud Prall-meetodiga. [44]



Joonis 44 - Asfaltkatte kulumist mõjutavad tegurid ning nende osakaal kulumise protsessis



Joonis 45 - Asfaltsegu kulumise ja täitematerjali kulumiskindluse vaheline seos

ASTO uuringu järglusi segu retsepti, ehk jämetäitematerjali osakaalu ja selle kulumiskindluse AN ning teekatete roobaste arengu kiiruse vahel on kinnitanud ka hilisemad Soome riigimaanteede roopasügavuste mõõtmiste ja roopa arengu modelleerimise uuringud. Soomes välja töötatud teekatete roobaste arenemise kiirust

ennustavas valemis mõjutavad täitematerjali kulumiskindlus AN ning segu tüüp (jämetäitematerjali osakaal segus) roopasügavuse juurdekasvu (valem 1). [46]

$$Ura = \{2mm\} + 0.25 \times p.ikä \times \frac{(kaistaKVL)^{1.30}}{1000} \times \left\{ \begin{array}{l} 1.0, \text{ kun tien leveys } l \leq 10.5 \\ \left(\frac{l}{10}\right)^{-0.75}, \text{ kun tien leveys } l > 10.5 \end{array} \right\}$$

$$\times \left\{ \begin{array}{l} 0.85, \text{ kun talvinopeus } w = 60 \\ 1.00, \text{ kun talvinopeus } w = 80 \\ 1.10, \text{ kun talvinopeus } w = 100 \end{array} \right\} \times \frac{MT \times (9.4 + 2.21 \times KM)}{46}$$

Valem 1

Kus:

p.ikä – asfaltkate vanus, aastat;

kaistaKVL – sõiduraja aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus, a/ööp;

l – tee laius, m

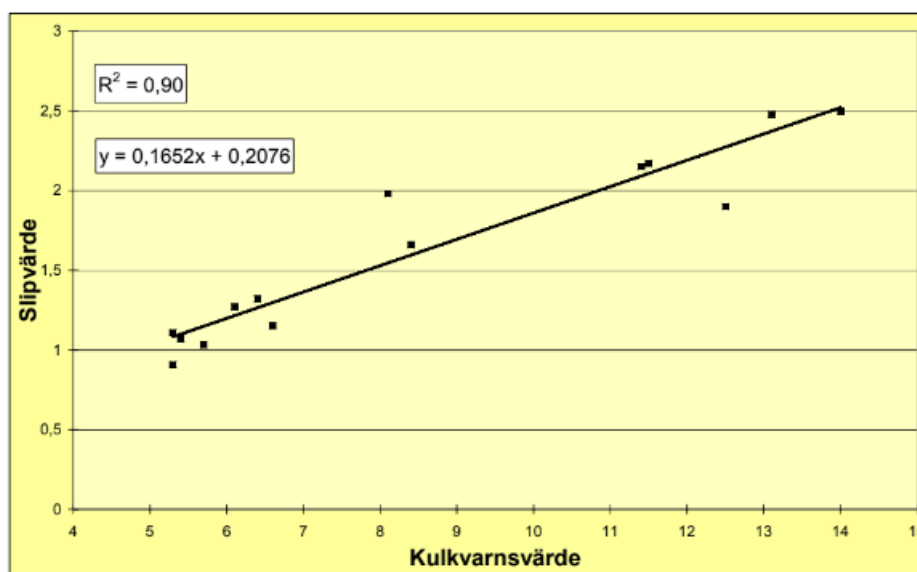
w – talvine piirkiirus, km/h

MT – segu retseptiga arvestav tegur (AC 16 surf korral 1,46, AC 20 surf korral 1,27 ning SMA korral 1,08);

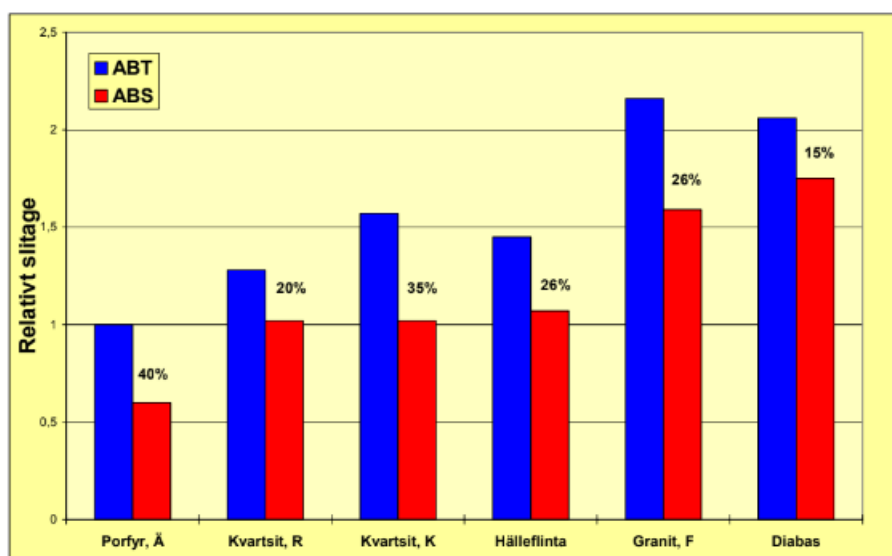
KM – täitematerjali kulumiskindlus AN, %.

Kõige hilisemad ja põhjalikumad uuringud, mis käsitlevad asfaltkattes kasutatud täitematerjalide mõju teede roobaste arenemise kiirusele, pärinevad Rootsist. Rootsist alustati 1996. aastal teekatete kulumisroobaste arengut ennustava mudeli väljatöötamisega ning viimane mudeli uuendus teostati 2007. aastal. [45]

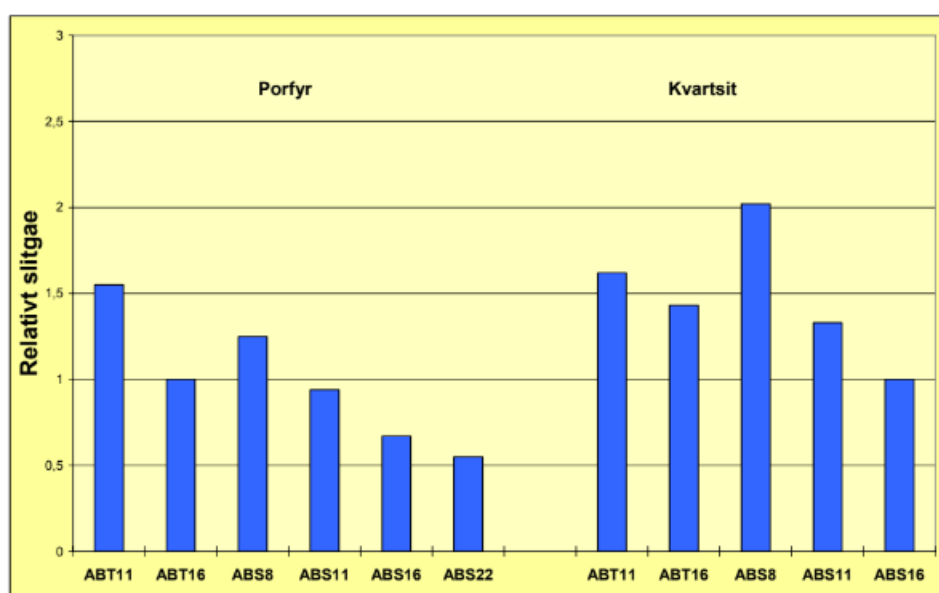
Uuringu käigus tehti põhjalikud eeluuringud, et selgitada välja erinevad tegurid, mis mõjutavad asfaltkate kulumist ja kulumisroobaste arengu kiirust. Rootsi uuringute tulemused kattuvad Soomes tehtud uuringutega ning leiti, et kulumisroobaste arengu seisukohast mängivad suurimat rolli asfaltkattes kasutatud täitematerjalide kulumiskindlus AN ning jämetäitematerjali osakaal segus (Joonis 46 ja Joonis 47). [45]



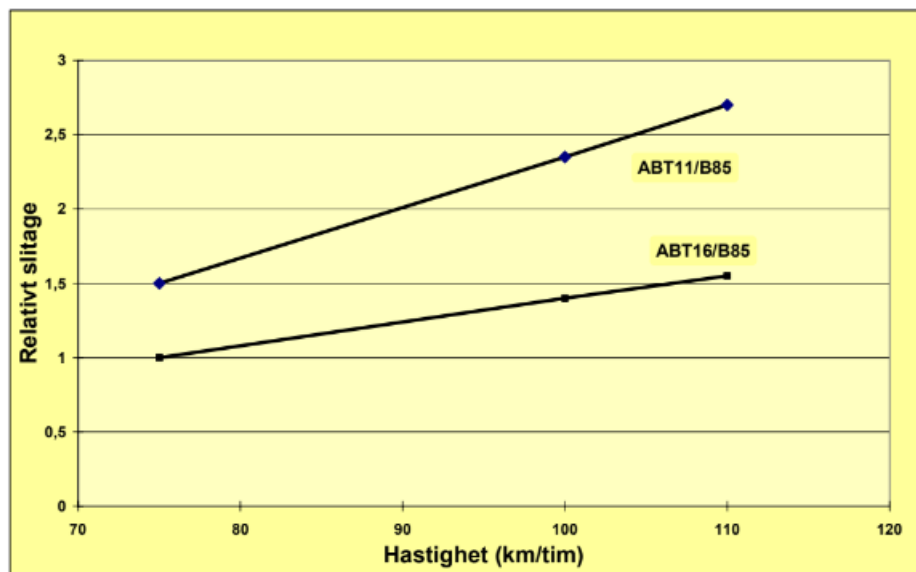
Joonis 46 - Täitematerjali kulumiskindlus AN (kulkvarnsvärde) ja suhteline kulumismäär (slipvärde)



Joonis 47 - Pideva terakoostisega (ABT) ja katkeva terakoostisega (ABS) asfaltsegu suhteline kulumine. ABS tüüpi segudes on jämetäitematerjali (üle 4 mm osakeste) sisaldus suurem, kui ABT tüüpi segudes



Joonis 48 - Pideva terakoostisega (ABT) ja katkeva terakoostisega (ABS) asfaltsegu suhteline kulumine. ABS tüüpi segudes on jämetäitematerjali (üle 4 mm osakeste) sisaldus suurem, kui ABT tüüpi segudes



Joonis 49 - Teelõigule seatud piirkiiruse mõju suhtelisele kulumisele

ROOTSI KULUMISMUDEL


Rootsis teostatud teekatete kulumist mõjutavate tegurite väljaselgitamist käsitlevate uuringute põhjal on koostatud eraldiseisev kulumismudel, mis võimaldab tee kulumiskihi asfaltsegus kasutatavate materjalide omaduste põhjal ennustada teelõigu kulumisroopa arengut. Kulumisroopa arengu kiirust ja eluiga saab arvutada kahel erineval viisil [45]:

- Võttes arvesse asfaltsegus kasutatud täitematerjali kulumiskindlust AN, segu suurimat teramõõtu D ning jämetäitematerjali (üle 4 mm osiste) osakaalu asfaltsegu retseptis;
- Võttes arvesse asfaltsegule katseliselt määratud kulumiskindluse AbrA tulemust.

Eraldi teguritena võetakse mudelis arvesse tee laiust, piirkiirust, sõiduautode liiklussagedust, naastrehvide protsentuaalset kasutusmäära ja talverehvide kasutamishooaja pikkust. Laiemad teed, väiksem piirkiirus, väiksem naastrehvide protsentuaalne kasutusmäär ning lühem talverehvide kasutamishooaja pikkus vähendavad erineval määral kulumisroopa arenemise kiirust. Lisaks saab mudelis juba arvestada ka roobast põhjustavate muude teguritega (näiteks järeltihenemine). Rootsi kulumismudeli sisendi näidis on esitatud Joonis 50 ning väljundi näidis Joonis 51. [45]

Resultat enligt Prall

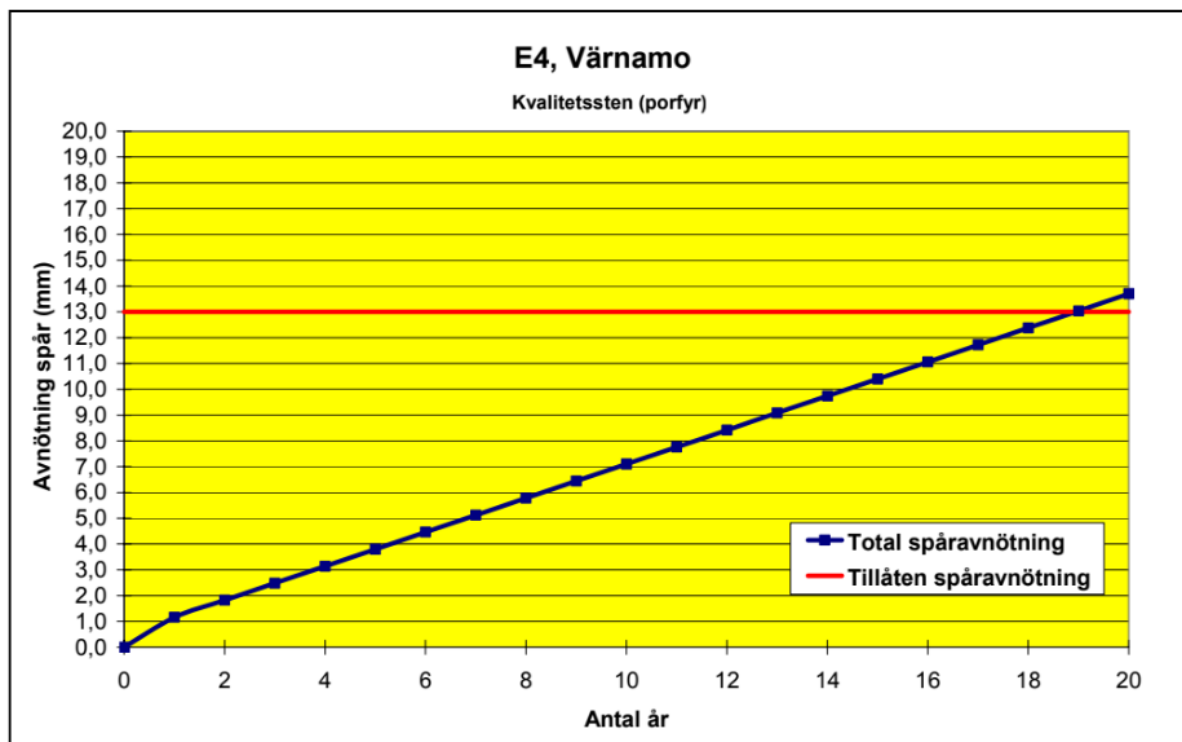
Indata

	Rubrik i diagram: E4, Värnamo		
	Underrubrik i diagram: Kvalitetssten (porfyr)		
Typsektion (1/2/3/4/5/6/7/8):	5	(1=7 m; 2=9 m; 3=13 m; 4= breda körfält; 5=motorväg; 6=tunnel & (2)+1 vägar; 7=2+(1) vägar; 8= extr smala körfält)	Version 3.2.03 oktober 2006
Tillåten hastighet:	110	(50, 70, 90 alt 110 km/h)	
ADT körfält:	4000	fordon/dygn	
Slitageperiod/år:	180	vinterdygn/år	
Dubbandel:	60	% (medel under slitageperioden)	
Saltad väg (J/N):	J		
Tillåtet spårdjup:	17	mm	
Uppskattat övrigt spårdjup:	4	mm	
Tillgängligt slitage-spårdjup:	13	mm	
Prallvärde (950 varv):	15	cm ³	

Resultat:

Spårtillväxt per år (mm):	0,73	mm
Livslängd (år):	17	år
Årskostnad (kr/kvm):	3,24	kr/m ²
SPS-tal:	4,3	gram per dubbat fordon och kilometer
Bortsliten mängd per 100 m körfält och år:	0,19	ton

Joonis 50 - Rootsi arvutusmudeli sisendid (indata). Antud näite korral on arvutused teostatud asfaltsegu kulumiskindluse AbrA tulemusega 15 cm³



Joonis 51 - Rootsi kulumismudeli väljund. Punase joonega on näidatud maksimaalne lubatav roopa sügavus (13 mm). Teel, mille aasta keskmine sõiduautoade liiklussagedus on 4000 autot ööpäevas ning millest 60% kasutab naastrehve, jõuab roobas areneda lubatud maksimaalse sügavuseni 18-19 aasta jooksul pärast asfaltkatte valmimist.

TEE KONSTRUKTSIOONIDE VALIKU ALUSED

Erinevate liiklussagedusega teede konstruktsioonide maksumuste välja selgitamiseks koostati erinevatele tee klassidele arvutuslikud katendikonstruktsioonide stsenaariumid. Stsenaariumite välja töötamiseks lähtuti Eesti riigiteede võrgust (vt lk 7 tabel 6), mille kohta on olemas kvantitatiivne informatsioon [47]. Transpordiamet haldab Teeregistrit ning korraldab iga-aastaselt liiklusloendusi, mille alusel avaldab ülevaate riigiteede liiklusest. Teeregistrist on leitavad iga riigitee lõigu alljärgnev informatsioon:

- Liiklussagedus AKÖL – aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus;
- Liikluskoosseis
 - o SAPA – sõidu- ja pakiautode osakaal;
 - o VAAB – veoautode ja autobusside osakaal;
 - o AR – autorongide osakaal.

Riigiteede kogupikkus on üle 16 000 km, kuid sellest ca 10 000 km on kohaliku tähtsusega teed, kus liiklussagedused on alla 500 auto ööpäevas.

Teede konstruktsioonide konstrueerimiseks võeti aluseks käesoleva uuringu ajal kehtinud Transpordiameti „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend“ (nn KAP ehk katendite arvutusprogramm). Konstruktsioonide arvutused teostati vaid nende riigimaanteede andmete põhjal, mille liiklussagedus on üle 500 auto/ööpäevas.

Riigimaanteed jaotati liiklussageduse järgi erinevateks gruppideks ehk tee klassideks (tabel 6). Selline jaotus on sarnane Transpordiameti poolt tellitud uuringus (Leping 3.2-4/22/2483-1) „Raskemate ja pikemate veoste mõju arvutamine riigiteede taristule“ (nn 60-tonnise täismassiga raskeveokite uuring) [48]. Lisaks on eeldatud, et 50% teede osas on aluspinnaseks kerge saviliiv (A-grupp) ning 50% osas liivsavi (D-grupp).

Tabel 7 - Arvutatavad riigimaanteede klassid ja pikkused

Liiklussagedus a/ööp	Riigiteede pikkus kategoorias, km			
	Põhimaanteed	Tugimaanteed	Kõrvalmaanteed	Kokku
I klass Üle 14500	83,283	0,753	5,271	89,307
II klass 6000-14499	488,309	65,463	60,998	614,77
III klass 3000-5999	492,118	217,974	65,739	775,831
IV klass 500-2999	539,845	1882,447	2007,567	4429,859
Kokku	1603,555	2166,637	2139,575	5909,767

Kuna liiklussagedused ajas muutuvad, siis on oluline nendega arvestada ka arvutuslikes stsenaariumites. Üldistatult kasvab liiklussagedus kiiremini suurema liiklusega teedel

(põhi- ja tugimaanteedel) ning aeglasemalt kõrvalmaanteedel. Tallinna Tehnikaülikool koostas 2020. aastal uuringu „Liiklusuuringu juhendi ja baasproгноosi koostamine“ raames baasproгноosi aastani 2050, mille alusel valiti liikluse kasvutegurid ja koostati proгноositavad liiklussagedused riigiteedele [49].

Käesolevas uuringus on liiklussageduseks võetud 2023. a statistilised andmed Teeregistrist. Teede projekteerimisel koostatakse proгноos eeldatava tee valmimisjärgseks 20 aastaks. Kuna hetkel ei ole kogu eespool kirjeldatud võrku veel projekteerima hakatud, siis käesolevas uuringus on eeldatud alljärgneva ajakavaga:

- 2025. a teostatakse teede projekteerimine;
- 2026 ja 2027. a teostatakse teede ehitus
- eksploatatsioon 20 aastat, ehk aastad 2028...2047.

Tallinna lähistel on 2+2 ristlõige mitmes suunas piisavalt välja ehitatud, seega proгноosi kontekstis valitakse piirkondliku arengutrendina Rapla maakonna kohta kehtivad tegurid (tabel 7), eraldi põhi-, tugi- ja kõrvalmaanteedele (kasv aastaks 2047 aasta 2023 suhtes).

Tabel 8 - Liikluse kasvutegurid aastatel 2023 kuni 2027

Riigitee	SAPA	VAAB	AR
Põhimaanteed	1,36	0,94	1,33
Tugimaanteed	1,25	0,90	1,23
Kõrvalmaanteed	1,21	0,96	1,20

Kuna proгноosis kasutatakse juba rajategureid ning proгноos teostatakse tee klasside piires, ei arvestata asjaoluga, et liiklussageduse tõusuga üle tee klassi piiride muutub ka rajategur (osa kogukoormusest, mis langeb enamkoormatud sõidurajale). Liikluse taandamisel 10-tonnisteks normtelgedeks lähtutakse 60-tonnise täismassiga raskeveokite uuringus koostatud siirdeteguritest (VAAB 1,27 ja AR 4,67) [48].

Tabel 9 - Liiklus 2023 ja perspektiivsed koormused

AKÖL (üle)	2023 liiklusloenduse andmetel					Raja- tegur	Q15 (KAP)	AKÖL (2047)	KKL
	meetrid	SAPA	VAAB	AR	AKÖL				
14500	89307	17884	812	1364	20060	0,45	6046	26713	20,66
6000	614770	7678	284	803	8766	0,50	3765	11554	12,84
3000	775831	3717	127	340	4184	0,55	1749	5450	5,97
500	4429859	1158	31	72	1261	0,55	363	1560	1,26
50	7992561	193	4	7	205				
0	2637296	28	1	1	29				
	16539624	964	31	76	1072				

Kuna katendiarvutuse meetodis on seos arvutusliku koormuse (koormussageduse) ja vajaliku kandevõime vahel lahendatud logaritmfunksiooniga, siis arvutustulemused, mis tuginevad koormusklasside keskmistel koormustel (keskmisele koormusele arvestatud grupi arvutuslik vajalik kandevõime), erinevad märkimisväärselt sellest, kui keskmistada igale teelõigule logaritmivalemiga arvutatud vajalikud kandevõimed (keskmistada juba detailides arvutatud kandevõime väärtused). Käesolevas töös on leitud grupi keskmine

liikluskoosseis ja koormus 20 aasta kohta ning sellest keskmisest on arvatud vajalik kandevõime, millele vastavalt konstrueeritakse katendid erinevatele stsenaariumitele ja arvutatakse nende maksumused. Selline viis on sobiv erinevate variantide võrdluseks.

VALITUD TEEKONSTRUKTSIOONIDE STSENAARIUMID

Käesolevas töös on lähtutud kahest valitud katendite ülesehituse stsenaariumist:

1. **Traditsiooniline stsenaarium**, kus tee konstruktsiooni alustes kasutatakse paekivikillustikku ja liiva ning täielikult või osaliselt (I ja II klassi teedel) paekivikillustikku. Stsenaariumid on liigitatud alljärgnevalt:

- a. A-grupi aluspinnasel tähistusega V1 või V5
- b. D-grupi aluspinnasel tähistusega V2 või V5

Märkus: V5 stsenaariumid kirjeldavad olukorda, kus aluspinnas on 75 cm ulatuses asendatud liivaga Tm_105, mille korral ei pea arvestama katendiarvutustes allolevate kihtide omadustega.

Traditsioonilises stsenaariumiga konstrueeritud teekonstruktsioonide korral on arvestatud, et katendid peaksid etteantud liikluskoormusele vastu 20 aastat (eluiga 20 aastat).

2. **Rootsi stsenaarium**, kus kõigil aluspinnastel ja liikluskoormustel on killustikaluse paksuseks 50 cm. Stsenaariumid on liigitatud alljärgnevalt:

- a. A-grupi aluspinnastel tähistusega V3
- b. D-grupi aluspinnastel tähistusega V4

Rootsi stsenaariumis kirjeldatud 50 cm aluse kiht koosneb aluse ala- ja ülakihist. Aluse alakiht koosneb 42 cm paksusest purustatud kaljupinnasest fr 0/125 ning aluse ülakiht koosneb 8 cm paksusest tasandus- ja kiilumiskihist 0/32 mm. Rootsis kasutatavaid aluste konstruktsioone on täpsemalt kirjeldatud allikates [50], [51], [52].

Rootsi stsenaariumiga konstrueeritud teekonstruktsioonide korral on arvestatud, et katendid peaksid etteantud liikluskoormusele vastu 25 aastat (eluiga 25 aastat).

Arvutuslikud konstruktsioonid on kirjeldatud tabelites 9 ja 10. Iga stsenaariumi korral võrreldi teeklassile vastavate konstruktsioonide maksumust ning valiti odavaim klassile vastav maksumus. Tabelites on rohelistena välja toodud lõplikud konstruktsioonid, mille alusel teostati finantsarvutused.

Tabel 10 - Arvutuslikud stsenaariumid paekivikillustiku korral

Arvutatud konstruktsioonid	Traditsiooniline stsenaarium (V1, V2, V5)											
	I klass 14500+			II klass 6000-14500			III klass 3000-6000			IV klass 500-3000		
Konstruktsioon	V1	V2	V5	V1	V2	V5	V1	V2	V5	V1	V2	V5
SMA	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

AC surf/bin	5	5	4	5	5	5	5	5	5	4	5	4
AC base	10	10.5	8	10	10	8	10	10	8	8	8	6
Graniit	30	30	15	15	15	15	0	0	0	0	0	0
E280 (paas LA30)	0	0	24	25	22	27	15	15	15	0	0	0
E240 (paas LA35)	0	0	0	0	0	0	16	15	23	27	25	36
Liiv Tm:105 (uMSa)	25	20	75	30	20	75	28	20	75	30	20	75
Liiv Tm_90 (uFSa)	38	67		0	58		0	44		0	30	
Konstruksioon kokku, cm	112.0	136.5	130.0	85.0	130.0	130.0	74.0	109.0	126.0	69.0	88.0	121.0
	Rootsi stsenaarium (V3, V4)											
	V3	V4		V3	V4		V3	V4		V3	V4	
SMA	4	4		0	0		0	0		0	0	
AC surf/bin	5	5		5	5		4	5		4	4	
AC base	10	9		11.5	8		11	8		8	6	
Graniit	15	15		15	12		0	0		0	0	
E280 (paas LA30)	35	35		35	38		15	12		0	0	
E240 (paas LA35)	0	0		0	0		35	38		50	50	
Liiv Tm:105 (uMSa)	0	20		0	20		0	20		0	20	
Liiv Tm_90 (uFSa)	0	43		0	48		0	25		0	20	
Konstruksioon kokku	69.0	131.0		66.5	131.0		65.0	108.0		62.0	100.0	

Tabel 11 - Arvutuslikud stsenaariumid Paldiski gneissist killustiku korral

Arvutatud konstruktsioonid	Traditsiooniline stsenaarium (V1, V2, V5)											
	14500+			6000-14500			3000-6000			500-3000		
Konstruktsioon	V1	V2	V5	V1	V2	V5	V1	V2	V5	V1	V2	V5
SMA	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AC surf/bin	5	5	4	5	5	5	5	5	5	4	5	4
AC base	10	10.5	8	10	10	8	10	10	8	8	7	6
Graniit/gneiss	30	30	39	40	37	42	30	29	37	24	25	34
Liiv Tm_105 (uMSa)	25	20	75	30	20	75	28	20	75	27	20	75
Liiv Tm_90 (uFSa)	38	67		0	58		0	44		0	30	
Konstruksioon kokku	112.0	136.5	130.0	85.0	130.0	130.0	73.0	108.0	125.0	63.0	87.0	119.0
	Rootsi stsenaarium (V3, V4)											
	V3	V4		V3	V4		V3	V4		V3	V4	
SMA	4	4		0	0		0	0		0	0	
AC surf/bin	5	5		5	5		4	5		4	4	
AC base	10	9		11.5	8		11	8		7	6	
Graniit/gneiss	50	50		50	50		50	50		50	50	
Liiv Tm_105 (uMSa)	0	20		0	20		0	20		0	22	
Liiv Tm_90 (uFSa)	0	43		0	48		0	25		0	0	
Konstruksioon kokku	69.0	131.0		66.5	131.0		65.0	108.0		62.0	82.0	

ASFALDIST KATENDIKIHTIDE ELUIGA

Transpordiameti „Asfaldist katendikihtide ehitamise juhise“ üldosaga on määratletud, et siduv- ja kandevkihi asfaltkatete projektne eluiga peab olema vähemalt 20 aastat [53]. Käesolevas uuringus on siduv- ja kandevkihi (AC bin ja AC base) asfaldikihtide elueaks võetud traditsioonilise stsenaariumi korral 20 aastat ning Rootsi stsenaariumi korral 25 aastat.

Kulumiskihist kasutatavate asfaldikihtide (SMA ja AC surf) eluead ja remondivälp on mõjutatud pikiroobaste arengust teedel. Roopa arengut põhjustavad tegurid saab jagada mitmeks, kuid peamisteks nendest on allolevate konstruktsioonikihtide (aluse) deformeerumine ja naastrehvidest põhjustatud kulumine. Viimased andmed naastrehvide kasutamise osakaalust pärinevad 2020. a Tallinna Tehnikaülikoolis kaitstud magistritööst, mille raames leiti, et keskmiselt ca 61% sõiduautodest kasutab naastrehve [54].

Käesolevas töös on kulumiskihide eluigade arvutamisel lähtunud Rootsis teostatud uuringutega välja töötatud kulumismudelid, mida on täpsemalt kirjeldatud käesoleva aruande eelmises peatükis. See võimaldab kulumiskihis kasutatavate materjalide omaduste põhjal ennustada teelõigu kulumisroopa arengut. Kulumisroopa arengu kiirust ja eluiga saab arvutada kahel erineval viisil [45]:

- Võttes arvesse asfaltsegus kasutatud täitematerjali kulumiskindlust A_N , segu suurimat teramõõtu D ning jämetäitematerjali (üle 4 mm osiste) osakaalu asfaltsegu retseptis;
- Võttes arvesse asfaltsegule katseliselt määratud kulumiskindluse $AbrA$ tulemust.

Eraldi teguritena võetakse mudelis arvesse tee laiust, piirkiirust, sõiduautode liiklussagedust, naastrehvide protsentuaalset kasutusmäära ja talverehvide kasutamishooaja pikkust. Laiemad teed, väiksem piirkiirus, väiksem naastrehvide protsentuaalne kasutusmäär ning lühem talverehvide kasutamishooaja pikkus vähendavad erineval määral kulumisroopa arenemise kiirust. Lisaks saab mudelis juba arvestada ka roopa arengu komponente, mis ei ole otseselt tingitud kulumisest (järeltihenemine liikluse toimel, aluskihtide nihkumine). [45]

Käesolevas töös lähtuti eeldusest, et talvel on kõikidel teedel piirkiiruseks 90 km/h. Lisaks eeldati, et 90% liiklussagedusest moodustavad sõiduautod- ja autobussid, millest omakorda 60% kasutab naastrehve. Naastrehvide kasutushooaja pikkuseks valiti 165 päeva, mis on kooskõlas lubatud talverehvide kasutusperioodiga (15. oktoober kuni 31. aprill).

Eluead arvutati kulumismäära ja muudest teguritest põhjustatud roopa sügavuse järgi, lähtudes tee klasside keskmistest liiklussagedusest. Lisaks eeldati, et I klassi teedel sõidavad 80% sõiduautodest esimesel sõidurajal ning II klassi teedel sõidavad 75% sõiduautodest kaherealise sõiduteeosa esimesel sõidurajal.

Muudest teguritest põhjustatud roopasügavuse piiriks valiti lubjakivikillustikust aluste korral 8 mm ning gneissiga konstruktsiooni korral 4 mm. Nende valikute kahekordne erinevus on põhjendatud asjaoluga, et lubjakivikillustikust aluste korral eeldatakse materjali purunemist ja järeltihenemist eksploatatsioonis. Gneissiga rajatud

konstruktsioonide korral materjal aluses ei purune. Teistest teguritest tingitud kahekordne erinevus roopasügavuse juurdekasvule on põhjendatav ka guraatortihendajast saadud andmetega. Lubatavaks kulumisroopaks valiti Transpordiameti „*Asfaldist katendikihtide ehitamise juhise*“ üldosas kirjeldatud alljärgnevad maksimaalsed lubatavad piirväärtused [53]:

- AKÖL üle 6000 a/ööpäevas – maksimaalne kulumisroobas 15 mm;
- AKÖL alla 6000 a/ööpäevas – maksimaalne kulumisroobas 17 mm.

Valitud liiklussagedustel tekkiva kulumismäära arvutamiseks lähtuti Rootsi kulumismudeli võimalusest lähtuda segu tüübist, segus kasutatud suurimast täitematerjali terasuurusest, üle 4 mm terade osakaalust. Arvutuslikele kulumiskihtide eluea tulemustele on suur mõju asfaltsegu koostises olevate üle 4 mm osakeste sisaldusel. Käesolevas aruandes arvestati, et SMA 16 tüüpi asfaltsegu on see 75%, AC 16 surf segus 55% ning AC 12 surf segus 50%.

Rootsi kulumismudeliga saadud arvutuste stsenaariumid ja kulumismäärad on kirjeldatud tabelis 11.

Tabel 12 - Erinevate stsenaariumite kulumiskihtide eluiga

Tee klass ja AKÖL	Kulumiskihti segu	Traditsiooniline		Paldiski gneiss aluses ja asfaldi kulumiskihtis	
		A_N^1	Eluiga, aastates	A_N	Eluiga, aastates
I AKÖL 14500+	SMA 16	7	8	10	8
II AKÖL 6000-14500	AC 16 surf	10	8/11 ²	10	11/16 ²
III AKÖL 3000-6000	AC 16 surf	14	15	10	20/25 ³
IV AKÖL 500-3000	AC 12 surf	19	20/25 ³	10	20/25 ³

Tabeli märkus:

1. Tee klassile vastavad kulumiskindluse A_N väärtused pärinevad standardist EVS 901-3 [55]

2. Murru lugejas on 2+1 tee üherealise teeosa eluiga ning murru nimetajas kaherealise teeosa esimese sõiduraja eluiga.

3. Murru lugejas on traditsioonilise stsenaariumi järgi koostatud teekonstruktsiooni kulumiskihti eluiga ning murru nimetajas Rootsi stsenaariumi konstruktsiooni kulumiskihti eluiga.

Finantsarvutuste stsenaariumites arvestatakse, et I klassi 2+2 teedel vajab esimene sõidurada vahetamist vastavalt 8 (traditsiooniline) ja 8 (Paldiski gneiss) aasta järel, mis moodustab rajatud teekatte pinnast 50%. II klassi ehk 2+1 teedel vajab kolmandik katte

pinnast vahetamist iga 8 aasta tagant 2+1 tee üherajalisel teosal ning kolmandik kattest iga 11 aasta tagant 2+1 tee kaheajalise tee esimesel sõidurajal. Kui tee konstruktsiooni aluses kasutatakse gneissi, on selle vahetusvälp vastavalt 11 ja 16 aastat.

III klassi teedel oleks traditsioonilise konstruktsiooniga kulumiskihi vahetusvälp iga 15 aasta järel. Kui III ja IV klassi teedel kasutada aluses ning kulumiskihis AN 10 omadustega gneissi, oleksid arvutuslikud maksimaalsed kulumiskihi eluead traditsioonilise stsenaariumi korral 20 aastat ning Rootsi stsenaariumi korral 25 aastat.

SEADUSTE, MÄÄRUSTE JA STANDARDITE MUUTMISE VAJADUS

Paldiski gneissi kasutusele võtmine ei vaja otseselt riiklike regulatsioonide ja standardite muutmist. Paldiskist saadava gneissi omadused on tõenäoliselt piisavad kõikides teede konstruktsioonikihtides kasutamiseks. Lõplikud materjalide omadused selguvad siis, kui materjali hakatakse maapõuest eraldama ning toodeteks tegema. Samas tuleb arvestada, et regulatsioonide ja juhendite muutmata jätmisel tuleb gneissi enne kasutamist töödelda.

Eraldi asjaoluna tuleb juhtida tähelepanu Eesti (teede)ehitussektoris käibel olevale terminoloogiale. Tihti viidatakse Eesti riiklikes regulatsioonides, Transpordiameti juhendites ja juhistes ning standardites terminitele tardkivi või graniit. Kivimid jagunevad kolmeks – settekivimid, moondekivimid ja tardkivimid. Paldiski gneiss liigitub moondekivimi hulka, kuid selle peamised, teedehituse kontekstis olulised omadused on võrdväärised või paremad enamike Eestisse imporditavate tardkivi- ja graniitkillustikega. Lisaks imporditakse Eestisse erinevaid moondekivimeid, mida teedehituses sobivate omaduste tõttu kasutatakse tardkivi ja graniitkillustiku asemel (nt Halsvik karjääri gneiss). Sellest tulenevalt peaks rakendama üht järgnevast:

- a) Terminoloogia uuendamine, mille tulemusena kaasatakse tardkivi ja graniidi juurde moondekivimi termin;
 - b) Nõuete uuendamine omaduste põhiseks, mille tulemusena kirjeldatakse materjalide nõuded läbi omadustest, sealjuures viitamata näiteks kivimi päritolule.
- Valikutest viimane, ehk nõuete uuendamine oleks kõige korrektsem.

TEEKONSTRUKTSIOONIDE ELUIGA

Teede kasutusega reguleerib Kliimaministri määrus nr 71 „Tee projekteerimise normid“ (projekteerimisnormid), mis võeti vastu 17.11.2023 ning Transpordiameti 2023. aasta „Elastsete teekatendite projekteerimise juhend“ (*KAP juhend*). [56], [57]

Projekteerimisnormid sätestavad asfaltbetoonist rajatud püsikatenditele vähimaks kasutuseaks 15 aastat (määruse § 6. Tee kasutusega) Transpordiamet on KAP juhendiga täpsustanud, et püsikatendi eluiga peab olema vähemalt 20 aastat (KAP juhendi punkt 6.7 Kasutusaeg).

NÕUDED ALUSTES KASUTATAVATELE TÄITEMATERJALIDELE

Killustikaluste omadusi käsitleb Majandus- ja taristuministri määrus nr 101 „Tee ehitamise kvaliteedi nõuded“ (*kvaliteedimäärus*), mis võeti vastu 03.08.2015 (kehtiva redaktsiooni kuupäev on 23.11.2020), ning Transpordiameti 2022. aasta „Killustikust katendikihtide ehitamise juhend“ (*KKEJ*). [58], [59]

Kvaliteedimäärus käsitleb optimaalsest ehk sidumata segust (nt fr 0/32 mm), mustkillustikust (MUK), ridakillustikust (nt 4/32 mm) või fraktsioneeritud killustikust (nt 16/32 mm) rajatavaid teede aluseid. Määrus ei sätesta, millistel juhtudel peab kasutama lubja- ja dolokivist, kruusast või tard- ja moondekivimist valmistatud aluse materjale. Seda täpsustab KKEJ tabelid 1 ja 2.

Küll aga on määrusega rangelt sätestatud, et tardkivikillustiku (ja sh ka moondekivikillustiku) korral tuleb kasutada sidumata segusid, mille terastikuline koostis jääb määruse Lisas 10 kirjeldatud terastikulise koostise positsioonide 1 ja 3 nõuete piiridesse. Sellega on piiritletud materjali terastikuline koostis ja segu maksimaalne terasuurus D, milleks on 31,5 või 63 mm. Muid valikuid määrus ei võimalda.

KKEJ tabel 1 täpsustab alustes kasutatavate ridakillustikust ja fraktsioneeritud killustikust materjalide nõudeid Transpordiameti hallatavatel teedel. Sisuliselt viitab tabel, et purustatud kruusast valmistatud materjale võib kasutada teedel, mille liiklussagedus tee 20-ndal aastal (AKÖL 20) kuni 6000 a/ööp. Kõrgematel liiklussagedustel peab kasutama juba lubja- või dolokivikillustikku. Kui tee AKÖL 20 on üle 6000 a/ööp ja tee vajalik arvutuslik kandevõime on üle 300 MPa, siis võib kaaluda aluste ülakihis või ühekihilistes alustes tard- ja moondekivikillustiku kasutamist. Siinkohal viitab tabeli märkus 1, et vastava otsuse teeb Tellija enne pakkumuste küsimist lähtudes majanduslikust otstarbekusest. Ühe alternatiivina tuuakse välja mustkillustiku ehk MUK-i kasutamist tardkivi asemel.

KKEJ tabel 2 täpsustab alustes kasutatavate sidumata segude materjalide nõudeid Transpordiameti hallatavatel teedel. Tabel viitab, et purustatud kruusast valmistatud sidumata segusid võib kasutada ühekihilistes alustes kuni liiklussagedusteni AKÖL 20 3000 a/ööp ning aluste alakihtides kuni liiklussagedusteni AKÖL 20 8000 a/ööp. Kui AKÖL 20 on 3000 kuni 8000 a/ööpäevas, siis tuleb aluste ülakihis ja ühekihilistes alustes kasutada juba lubja- ja dolokivikillustikust valmistatud sidumata segusid. AKÖL 20 üle 8000 a/ööp eeldab aluste ülakihtides ja ühekihilistes alustes LA₂₅ ja F_{NaCl4} nõuetele vastavatest täitematerjalidest valmistatud sidumata segude kasutamist. Selliseid nõudeid kohalik lubja- ja dolokivikillustik ära ei täida.

Kui seni on tellijad soovinud selgelt tard- ja moondekivimitest toodetud materjalide kasutamist, siis on lähtunud peamiselt kahest nõudest – LA₂₅ ja F_{NaCl4}. Käesolevas uuringus on tõendatud, et väiksema kui 10 ühikulise LA tulemuste erinevusega lubjakivikillustik ja moondekivimist killustik on dünaamilisel koormamisel erineva vastupidavusega, mistõttu ei ole purunemiskindlus LA niivõrd oluline tegur vastupidavuse seisukohast.

Küll aga eristab neid materjale kulumiskindlus Mikro-Deval (M_{DE}). Käesolevas uuringus käsitleti kolme lubjakivikillustikku (fr 4/32, 16/32 ja 0/32 mm), mille kulumiskindlus M_{DE} jäi vahemikku 29,5 kuni 36,5%. Paldiski gneissil oli M_{DE} väärtus 6,1%, mis on lubjakivikillustikuga võrreldes ca 5-6 korda parem tulemus. Kui alustes soovitakse kasutada killustikku, mille eluiga oleks lubja- ja dolokivikillustikust rajatud alustega võrreldes pikem, peaks reguleerima seda läbi kulumiskindluse M_{DE} , mitte purunemiskindluse LA. Soovitav nõue oleks näiteks $M_{DE} \leq 11\%$.

NÕUDED ASFALTSEGUDES KASUTATAVATELE TÄITEMATERJALIDELE

Asfaltsegudes kasutatavate täitematerjalide omadusi käsitleb rahvuslik standard EVS 901-3 [55]. Kohustus lähtuda avalikult kasutatavatel teedel EVS 901-3 nõuetest tuleneb eelpool viidatud kvaliteedimäärusest [58].

Peamisteks täitematerjalide põhiomadusteks, mis defineerivad ära materjali kasutatavuse, on kulumiskindlus A_N ja purunemiskindlus LA. Tellija poolt laborisse toodud proovi katsetamise tulemusena selgus, et Paldiski gneissi kulumiskindlus A_N tulemus oli 8,3% ning purunemiskindluse LA tulemus oli 23% (tabel 2). Nende tulemuste põhjal liigituks Paldiski gneiss AN10 ja LA25 kategooria materjalideks.

Standard EVS 901-3 sätestab, et asfaltsegudes kasutatavate täitematerjalide kulumiskindlus ja purunemiskindlus sõltuvad tee liiklussagedusest (AKÖL) (tabelid 12 ja 13).

Tabel 13 - Kulumiskihi asfaltsegude täitematerjalide kulumiskindluse nõuded erinevatel liiklussagedustel

	Tee aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus, a/ööp			
	1500 Kuni 3000	3000 kuni 6000	6000 Kuni 12000	Üle 12000
Täitematerjali kulumiskindlus AN	19	14	10	7

Märkus: SMA tüüpi asfaltsegusid ei kasutata liiklussagedustel alla AKÖL 3000.

Tabel 14 - Kulumiskihi asfaltsegude täitematerjalide purunemiskindluse nõuded erinevatel liiklussagedustel

	Tee aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus, a/ööp					
	Alla 900	900 kuni 1500	1500 kuni 3000	3000 kuni 6000	6000 Kuni 12000	Üle 12000
Täitematerjali Purunemiskindlus LA	35	30	30	25	25	25/20

Märkus: Liiklussagedustel üle AKÖL 12 000 lähtutakse purunemiskindluse nõudest LA25, kui tegemist on AC surf tüüpi asfaltsegudega ning purunemiskindluse nõudest LA20, kui tegemist on SMA tüüpi asfaltsegudega.

Laborisse toodud proovi põhjal ei sobiks Paldiski gneiss kasutamiseks nendel teedel, mille AKÖL on üle 12 000 auto ööpäevas kulumiskindluse AN tulemuse põhjal ning SMA tüüpi segudes nii purunemiskindluse LA kui ka kulumiskindluse A_N põhjal.

Liiklussagedustel üle 12 000 a/ööp kasutatakse üldjuhul SMA 16 tüüpi asfaltsegusid, mille koostises on kasutatud AN7 kulumiskindlusega täitematerjale. Kui SMA 16 tüüpi asfaltsegus kasutada väiksema kulumiskindlusega täitematerjale, siis väheneks kulumiskihi eluiga. Samas saab kulumiskihi eluiga tõsta, kui aluses kasutatakse tervenisti gneisskillustikku või kui suurendada segu maksimaalset terasuurst ja üle 4 mm terasuureusega osiste osakaalu segureseptis. SMA 20 tüüpi asfaltseguga saaks kompenseerida AN10 täitematerjali kasutamist üle 12 000 a/ööp liiklussagedustega teedel.

PALDISKI MATERJALI OMADUSTE VÕRDLU EESTIS, LÄTIS JA LEEDUS KEHTIVATE NÕUETEGA

Käesolevas peatükis võrreldakse Paldiski gneissi omadusi Lätis ja Leedus kehtivates normdokumentides nõutud materjalide omadustega. Kokkuvõttes tuginetakse alljärgnevatele allikatele:

- Läti:
 - o Teede tehnilised nõuded „Autoceļu būvdarbu specifkācijas 2023” [60]
- Leedu:
 - o Autoteede asfaltsegudele esitatavad nõuded „TRA ASFALTAS 08” [61]
 - o Teede alustes kasutatavate materjalide nõuded „TRA SBR 19” [62]

Eesti, Läti ja Leedu nõudeid kirjeldav kokkuvõttev tabel on esitatud käesoleva töö Lisas 2. Kui võrrelda Baltimaade normdokumentides kirjeldatud nõudeid, siis osutuvad kõige olulisemateks omadusteks alljärgnevad kivimi omadused:

- Purunemiskindlus LA,
- Kulumiskindlus AN,
- Külmaskindlus destilleeritud vees F , soolvees F_{NaCl} , magneesiumsulfaadi katsel MS või läbi veeimavuse WA_{cm} ,
- Poleeritavus PSV (Leedus).

Paldiski materjal täidab ära kulumiskindluselt AN10 nõude ning purunemiskindluselt LA25 nõude (tabel 2). Lisaks omab Paldiski materjal väga head vastupidavust külmumis- ja sulamistsüklitele soolvees, täites ära kategooria F_{NaCl4} nõude.

Leedus kasutatakse alustes sidumata segusid ning materjalidele on purunemiskindluse LA ülempiiriks seatud nõue LA35. Asfaltsegudes on kõige kõrgem nõue LA20. Purunemiskindluse kategooriale LA25 vastava täitematerjali kasutamine on asfaltsegudes lubatud vaid juhtudel, kui tellijal on varasem positiivne kogemus materjali sobivuse osas. Leedus ei ole nõuet täitematerjalide kulumiskindlusele, kuid on kehtestatud nõue täitematerjali poleeritavusele PSV. Kõrgeimaks poleeritavuse kategooriaks on PSV50 ning nõuded varieeruvad tee klassi kaupa vahemikus PSV 44 kuni 50. Kulumiskihi asfaltsegudes (AC surf, SMA, MA ja PA) on külmaskindluse nõudeks F1 ja F_{NaCl8} . Siduv- ja kandevkihi asfaltsegudes on külmaskindluse nõudeks kehtestatud vastavalt F1 ja F2.

Lätis kasutatakse alustes sidumata segusid ning rangeim purunemiskindluse nõue on LA30. Purunemiskindluse vahemik sõltub tee klassist ning nõuded jäävad 45 kuni 30 vahele. Sarnaselt aluses kasutatavate materjalide nõuetega varieeruvad asfaltsegude täitematerjalide nõuded purunemiskindluse ja kulumiskindluse osas vastavalt tee klassile vahemikus LA 40 kuni 20 ning AN 30 kuni 10. Külmaskindlust hinnatakse magneesiumsulfaadi katsega ning nõuded jäävad vahemikku MS 35 kuni 18.

Kokkuvõtvalt saab öelda, et Paldiski materjaliga teostatud eelkatsete tulemused annavad alust järeldada, et Paldiski gneiss sobib kasutamiseks kõikides Baltimaades nii teede aluste kui ka asfaltkatete täitematerjalina.

UURINGU TULEMUSTE LAIENDAMINE TEISTELE AVALIKELE TEEDELE

Käesoleva uuringu järeldused on teostatud Transpordiameti poolt hallatavate riigimaanteed baasil, mida on kokku 16 686 km. Riigimaanteed jagunevad põhimaanteedeks, tugimaanteedeks ja kõrvalmaanteedeks. Põhimaanteed ühendavad suuremaid linnu ja regioone, tugimaanteed tagavad piirkondlikud ühendused ning kõrvalmaanteed teenindavad kohalikke liikumisvajadusi. Lisaks riigimaanteedele koosneb Eesti teedevõrk kohalike omavalitsuste teedest ja eraomandis olevatest teedest. Kohalikud omavalitsused haldavad 23 588 km teid. Era- ja metsateede kogupikkuseks on 48 882 km. Eesti teedevõrgu kogupikkuseks on seega ca 89 tuhat kilomeetrit. [63]

Siinjuures tuleb arvestada, et suurim liikluskoormus- ja sagedus langeb siiski riigimaanteedele. Lisaks tuleb arvestada, et suur osa teedevõrgust moodustavad teed, mille liiklussagedus on alla 500 a/ööpäevas ning mida käesolevas uuringus ei käsitletud. Et kanda uuringu tulemusi üle teistele avalikult kasutatavatele kohalike omavalitsuste teedele, saab paremate andmete puudumisel lähtuda raskeveokite läbisõitude võrdlemisel riigimaanteedel ning teistel avalikult kasutatavatel teedel. Raskeveokite koormussagedus on ka üheks peamiseks sisendiks katendite konstrueerimisel.

Transpordiameti andmetel on Eesti autopargi koguläbisõit 2023. a olnud ca 13 miljardit kilomeetrit. Raskesõidukid (veoautod ilma N1 kategooriata, autobussid ja autorongid) on läbinud kokku ca 785 miljonit kilomeetrit, millest ca 650 miljonit riigiteedel. [64] Järelikult on raskeliikluse läbisõit teistel avalikel teedel 135 miljonit kilomeetrit ehk ligikaudu viiendik (20%) riigiteede raskesõidukite läbisõidust. Viidatud analüüsile tuginedes saab anda kaudse hinnangu, et kui lisada riigimaanteed mahtudele 20%, siis saab uuringu tulemusi laiendada ka muudele avalikult kasutatavatele teedele.

KOKKUVÕTE

- Gneisskillustiku kasutuselevõtu majandusanalüüs lähtub valitud teekonstruktsioonidest. Analüüs põhineb killustiku valikust ja võrdleb gneissidest valmistatud killustiku kasutamise tasuvust tee ehitamisel ja remondil lubjakivikillustiku ja imporditava graniitkillustiku asemel.
- Arvutuste tulemuste põhjal saab järeldada, et gneisskillustiku kasutamine uue tee ehitamisel on majanduslikult tasuv kõikides analüüsitud tee klassides. Gneisskillustikust tee katendi aluskihtide pikem eluiga kajastub majandusanalüüsis tunduvalt madalama kuluga hindamisperioodi teisel poolel. Eeldusel, et gneisskillustiku hind võrdub kõrgemargilise paekivikillustiku hinnaga on esimese ja teise tee klassi ehitamiskulu madalam kui tänaste materjalidega ehitatud tee.
- Paekivikillustiku asendamine gneisskillustikuga riigiteede renoveerimisel tingib mõnevõrra suurema kulu võrreldes tänaste materjalidega hindamisperioodi alguses (erinevus 2 kuni 3 protsenti). Pikas perspektiivis on gneisskillustikuga traditsiooniline katendikonstruktsioon kõige soodsam, sest ajaldatud kulu on kuni 15 protsenti väiksem tänaste materjalidega tee konstruktsioonist. Kui katendis on kasutatud gneisskillustiku on tee renoveerimise kulu umbes 40 protsenti madalam võrreldes stsenaariumiga, kus tee katendi konstruktsioonis kasutatud tänaseid materjale.
- Gneisskillustiku tasuvus kajastub ka ressursi tootlikkuse tõusuga. Põhiline ressursitootlikkuse muutus seoses materjali kokkuhoiuga tekib alates teisest remonditsüklist.
- Teedehituses kasutatavate materjalide välikulude kvantifitseerimine ja sisestamine näitab gneisskillustiku kasutuselevõtu sotsiaalset mõju. Otseselt materjalide seotud väliskulude tekkimise põhjuseks on killustike tootmisel tekkivad emissioonid (nii lubjakivi kui graniitkillustikul 6 kg CO₂ tonni kohta), millele lisandub graniitkillustiku impordiga kaasnev meretranspordi emissioon.
- Materjalidega seotud kaudsetest väliskuludest kvantifitseeriti paekivikarjäärade laienemisega seotud välikulud. Karjäärade aluse pindala suurenemisega lendub pinnase orgaanilises osas olev süsinik CO₂ kujul atmosfääri. Arvestades pinnase suurt süsinikusaldust kaasneb teede konstruktsioonides kasutatava lubjakivi kaevandamisega 16 kg CO₂ emissiooni tonni killustiku kohta, mille rahaline ekvivalent üle 3,20 euro (2027. a CO₂ soovituslikes hindades).
- Lubjakivikarjäärade laienemisega seotud sotsiaalne kahju kvantifitseeriti tingliku hindamise (ingl.k. *contingent valuation*) meetodit kasutades. Välja selgitatud Eesti elanikkonna aastane kogumaksevalmidus lubjakivikarjäärade laienemise peatumise eest seostati ühe tonni lubjakivikillustikuga, mis lisab lubjakivikillustiku tonnile 8,5 eurot kaudseid, karjäärade laienemisega seotud väliskulusid.
- Lubjakivikillustiku kaudne (karjäärade laienemisega) seotud väliskulu sisestati tundlikkuse analüüsi kasutades käesolevas töös käsitletavatesse teede

stsenaariumidesse. Tulemused näitavad, et tänaste materjalidega stsenaariumid on kaudsete väliskulude sisestamisel gneisskillustikku kasutavatest stsenaariumidest tunduvalt ebasoodsamad, kusjuures erinevus on oluliselt suurem kui stsenaariumide finantsanalüüsil välja selgitatu. Üldiselt võib väita, et väliskulude sisestamine näitab gneisskillustikku kasutavate stsenaariumide tugevat sotsiaalset paremust lubjakivikillustikku kasutavate traditsiooniliste stsenaariumide ees.

- Nii varasemad uuringud, kogemus ja ka käesoleva uuringu raames tehtud laboratoorsed katsetused viitavad, et lubjakivikillustikul on suurt potentsiaali dünaamilise koormuse toimel eksploatatsioonis puruneda. See omakorda põhjustab fraktsioneeritud killustikust rajatud kihi teradest moodustunud karkassi kokku kukkumise ehk märgatava kihipaksuse vähenemise.
- Võrreldes lubjakivikillustikuga erineb Paldiski gneiss kulumiskindluse M_{DE} poolest. Tegemist on omadusega, mida seni Eestis nõudena kirjeldatud ei ole. Katsete tulemusena leiti, et Paldiski gneissi kulumiskindlus on 5-6 korda parem, kui uuringus käsitletud kolme lubjakivikillustiku kulumiskindlus. Kui alustes soovitakse kasutada killustikku, mille eluiga oleks lubja- ja dolokivikillustikust rajatud alustega võrreldes pikem, peaks reguleerima seda läbi kulumiskindluse M_{DE} , mitte purunemiskindluse LA. Soovitav nõue oleks näiteks $M_{DE} \leq 11\%$.
- Uuringu raames tehtud katsete tulemuste põhjal on nähtav, et gneissist killustik konstruktsioonis ei purune. Isegi kui gneissist rajatud killustikaluses areneb püsiv deformatsioon tulenevalt materjali terade ümberpaigutumisest teineteise suhtes (nihkumisest), siis selle tagajärjel killustikuterad ei purune ning killustiku kui materjali eluiga ei vähene. Seega killustikaluses olev materjal on võrreldavalt taaskasutatav võrreldes uue materjali kasutamisega. Katsetega on tõendatud ka Soome kogemus, et gneissist killustikaluse eluiga on vähemalt 50 aastat.
- Kui kasutada teekonstruktsioonide aluses gneissist sidumata segusid ja kasutada kulumiskihi asfaltsegu koostises gneissist valmistatud täitematerjale, pikeneksid kulumiskihtide asendusvälbad võrreldes traditsiooniliste konstruktsioonidega. Selline kulumiskihtide eluea kasv tuleneb gneissist aluse väiksemas järeltihenemises eksploatatsioonis võrreldes fraktsioneeritud lubjakivist alustega ning III ja IV klassi teedel nõutavast parema kulumiskindlusega gneissi kasutamisest asfaltkatte kulumiskihtides.

VIIDATUD ALLIKATE LOETELU

- [1] European Commission, "Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects for Cohesion Policy 2014-2020," 2014.
- [2] European Commission, "Economic Appraisal Vademecum 2021-2027: General Principles and Sector Applications," 2021.
- [3] T-konsult, "Raskemate ja pikemate veoste mõju arvutamine riigiteede taristule," Transpordiamet: Leping 3.2-4/22/2483-1, 2024.
- [4] UN Kyoto Protocol. Kättesaadav: https://unfccc.int/kyoto_protocol
- [5] UN The Paris Agreement. Kättesaadav: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [6] [EU Carbon Permits - Price - Chart - Historical Data - News \(tradingeconomics.com\)](https://tradingeconomics.com)
- [7] EU Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027. Kättesaadav: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/23a24b21-16d0-11ec-b4fe-01aa75ed71a1/language-en>
- [8] [Infrarakentamisen päästötietokanta \(co2data.fi\)](https://co2data.fi)
- [8A] CIVITTA. Life Cycle Assessment of Energioasav's pumped Hydro-Energy storage, Final Report, 21.04.2022
- [9] Statistikaamet, väliskaubanduse andmebaas. stat@stat.ee
- [10] Searoutes, "SeaRoutes is a professional tool for route and distance calculation, voyage planning of seagoing vessels.," Searoutes, [Online]. Available: <https://classic.searoutes.com/>.
- [11] [Ehitusmaavarad | Eesti Geoloogiateenistus \(egt.ee\)](https://egt.ee)
- [12] [Maavaravarude koondbilansid | Geoportaal | Maa-amet \(maaamet.ee\)](https://maaamet.ee)
- [13] Helm, A., Kull, A., Kiisel, M., Poltimäe, H., Rosenvald, R., Veromann, E., Reitalu, T., Kmoch, A., Virro, H., Mõisja, K., Nurm, H.-I., Prangel, E., Vain, K., Sepp, K., Lõhmus, A., Linder, M., Otsus, M., Uemaa, E. (2023). Eesti maismaaökosüsteemide hüvede (ökosüsteemiteenuste) majandusliku väärtuse üleriigiline hindamine ja kaardistamine. Tehniline lõpparuanne. Riigihange "Maismaaökosüsteemiteenuste üleriigiline rahaline hindamine, sh meetoodika väljatöötamine" (viitenumber 235366, Keskkonnaagentuur). Tartu Ülikool. Eesti Maaülikool.
- [14] Garrod, G.; Willis, K.G. Economic Valuation of the Environment. Methods and Case Studies. Edward Elgar, UK, 2001.
- [15] Jõelähtme valla üldplaneering, Ruumilise keskkonna analüüs 2017. Kättesaadav: https://maja.joelahtme.ee/Yldplaneerin_alg_2012/2017.02.14_kooskolastamine/Lisa2_Ruumilise_keskkonna_analyys/2014.11.17_Ruumilise_keskkonna_analyys.pdf

- [16] Portney, R. "The Contingent Valuation Debate: Why Economists Should Care", *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 8, No. 4, 1994, pp. 9-17[57]¹ Mitchell, R ja Carson, R.T. 1990. *Using Surveys to Value Public Goods*. Washington, D.C : Resources for the Future, 1990.
- [17] Carson, R.T. 2011. *Contingent Valuation: A Comprehensive Bibliography and History*. s.l. : Edward Elgar Publishing Inc, 2011.
- [18] Ehrlich, Ü ja Habicht, K. 2001. Non-Use Value and Maintenance Costs of Estonian Ecological Seminatural Communities. In: Ü. Ennuste and L. Wilder (Toim.). *Factors of Convergence: A Collection for the Analysis of Estonian Socio-Economic and Institutional Evolution*. Estonian Institute of Economics at TTU. 2001. a.
- [19] Ehrlich, Ü. 2021. Contingent Valuation as a Tool for Environmental Economic Accounting: Case of Estonia. *Estonian Discussions on Economic Policy*, 29 (1-2), 56–70. DOI: 10.15157/tpep.v29i1-2.18342.
- [20] Ehrlich, Ü. 2022. Willingness to pay for urban ecosystem services as input for statistics: a case of Estonia. *Estonian Discussions on Economic Policy*, 30 (1-2), 85–103. DOI: 10.15157/tpep.vi1-2.22088.
- [21] A. G. Alabaster and D. Steven, "Prediction of pavement performance from repeat load triaxial tests on granular materials," 2001.
- [22] L. Korkiala-Tanttu, R. Laaksonen, and J. Törnqvist, "Effect of the spring and overload to the rutting of a low-volume road," 2003.
- [23] P. H. Little, "The design of unsurfaced roads using geosynthetics," 1993.
- [24] B. D. Pidwerbesky, "Fundamental Behaviour of Unbound Granular Pavements Subjected to Various Loading Conditions and Accelerated Trafficking. PhD Thesis," Christchurch, 1996.
- [25] N. Thom and S. F. Brown, "The mechanical properties of unbound aggregates from various sources," 1989.
- [26] L. Korkiala-Tanttu, "Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials," 2008.
- [27] J. Englund, "Analysis of Resilient Behaviour of Unbound Materials for the Purpose of Predicting Permanent Deformation Behaviour," 2011.
- [28] S. Werkmeister, F. Wellner, M. Oeser, and B. Moeller, "Design criteria of granular pavements layers," *Proceedings of the 6th international symposium on pavements unbound (UNBAR 6)*, 2004.
- [29] P. Varin and T. Saarenketo, "Effect of Axle and Tyre Configurations on Pavement Durability – a Prestudy," 2014.
- [30] M. Truu, O. Talvik, and J. Gulevitš, "Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses," 2010.

- [31] M. Truu, S. Siht, M. Jentson, E. Horg, P. Ilves, and E. Puusaag, "Vanade teekonstruktsioonide ja killustikaluste vastupidavuse teadusuuring (lõpparuanne)," 2013.
- [32] S. Sillamäe, "Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses. Erinevatest karbonaatsetest settekivimitest valmistatud aluste vastupidavuse erinevuste väljaselgitamine. Kvarts- ja paekiviliivast mulde vastupidavuse võrdlus koos tasuvusanalüüsiga. Materjalide kasutamiskriteeriumite ettepanekud," 2013.
- [33] S. Sillamäe, "Kohalike mineraalmaterjalide optimaalse kasutamise uuring Eesti teedemajanduses. Killustikaluse vastupidavuse võrdlus kompleksstabiliseeritud alusega," 2015.
- [34] R. D. Barksdale and S. Y. Itani, "Influence of Aggregate Shape on Base Behaviour," *Transportation Research Record 1227*, 1989.
- [35] P. Kolisoja, "Resilient deformation characteristics of granular materials," Thesis for the degree of Doctor of Technology, Tampere University of Technology, 1997.
- [36] P. Kolisoja, "Mode 2 Rutting Design Approach. Research report. The Roadex IV," 2012.
- [37] European Commission, "Construction with unbound road aggregates in Europe. (COURAGE)," 1999.
- [38] Liikennevirasto, "Tierakenteen suunnittelu," 2018.
- [39] R. N. Hunter, A. Self, and J. Read, *The Shell Bitumen Handbook*. ICE Publishing, 2015. doi: doi:10.1680/tsbh.58378.
- [40] C. Dawley and B. Pulles, *TAC User Guide to CAN/CGSB-16-3-M90 "Asphalt Cements for Road Purposes."* Ottawa: Transport Association of Canada, 1996.
- [41] S. A. M. Hesp *et al.*, "Asphalt pavement cracking: Analysis of extraordinary life cycle variability in eastern and northeastern Ontario," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 209–227, Jun. 2009, doi: 10.1080/10298430802343169.
- [42] G. Dore and H. K. Zubeck, *Cold Regions Pavement Engineering*, 1st ed. 2009.
- [43] J. B. Sousa, J. Craus, and C. L. Monismith, *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*. Washington, D.C: Strategic Highway Research Program. National Research Council, 1991.
- [44] A. Saarela, *Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma, ASTO 1987-1994. Asfalttipäällysteet. Osa I: Suunnittelu*. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, 1992.
- [45] J. Torbjörn and L.-G. Wågberg, *Utveckling och uppgradering av prognosmodell för beläggningsslitage från dubbade däck samt en kunskapsöversikt över inverkan av faktorer*. 2007.

- [46] Tiehallinto, "Ura- ja sivukaltevuustunnusluvun määrittäminen kuntovastuurakkaan," 2005.
- [47] "Transpordiameti koduleht <https://www.transpordiamet.ee/eesti-teedevork>."
- [48] A. Kendra, "Raskemate ja pikemate veoste mõju arvutamine riigiteede taristule," 2024.
- [49] L. Kaal, T. Metsvahi, and A. Kendra, "Liiklusuuringu juhendi ja baasprognoosi koostamine," 2020.
- [50] A. Kendra, E. Rohelsaar, P. Škepast, A. Brakmann, and R. Sõrmus, "Riigimaanteede ja sildade tugevdamise maksumuse hindamine tulenevalt 52 t veoste aastaringse liikumise võimalusest," 2011.
- [51] A. Kendra *et al.*, "Elastsete teekatendite arvutusmetoodika arendamine," 2016.
- [52] P. Talviste and A. Kendra, "Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring I etapi vahearuanne," 2021.
- [53] Transpordiamet, *Asfaldist katendikihtide ehitamise juhised*. 2021.
- [54] T. Väli, "Naastrehvide kasutamine Tallinnas ning sellest tulenevate probleemide vähendamine Soome, Rootsi ja Norra näitel," 2020.
- [55] *EVS 901-3:2021 Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud*. 2021.
- [56] Määrus nr 71, "Tee projekteerimise normid (redaktsioon 25.11.2023)."
- [57] Transpordiamet, "Elastsete teekatendite projekteerimine," 2023.
- [58] Majandus- ja taristuministeerium, *Tee ehitamise kvaliteedi nõuded (määrus nr 101, vastu võetud 03.08.2015)*.
- [59] Transpordiamet, "Killustikust katendikihtide ehitamise juhend," 2022.
- [60] Latvijas Valsts ceļi, "Autoceļu būvdarbu specifikācijās 2023," 2022.
- [61] "Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas (TRA ASFALTAS 08)," 2020.
- [62] "Automobilių kelių nesurištųjų mišinių ir gruntų, naudojamų sluoksniams be rišiklių, techninių reikalavimų aprašas (TRA SBR 19)," 2019.
- [63] Transpordiamet. Eesti teedevõrk. <https://www.transpordiamet.ee/eesti-teedevork>
- [64] Transpordiamet. Autopargi läbisõit 2023.

LISA 1. TARKVARALIIDES

Tarkvaraliides "Pakri OÜ_majanduslik ja sotsiaalmajanduslik uuring".

Edastatud lõpparuandega eraldi failina.

LISA 2. TAMPERE ÜLIKOOLI KATSETE TULEMUSTE KOKKUVÕTE

Katsete tulemused "Test report GeoLa 43_2024".

Edastatud lõpparuandega eraldi failina.

LISA 3. KOONDTABEL BALTIMAADES KEHTIVATE NÕUETE KOHTA

Baltimaade nõuete koondtabel.

Edastatud lõpparuandega eraldi failina.

LISA 4. HINNANG TEE KASUTAJA AJAKULULE

Järgnev analüüs annab esialgse hinnangu gneisskillustiku kasutuselevõttust tingitud teekasutajate ajakulu vähenemisele riigimaanteede I-IV klassis.

Analüüsis on selgunud, et gneisskillustiku kasutuselevõtt hoiab kokku teede remondikulu, sest iga 20-e aasta taguse (Rootsi stsenaariumi puhul iga 25-e aasta taguse) asfaldi vahetamise käigus ei ole vaja vahetada asfaldi all katendis olevaid killustiku kihte.

Asfaldi vahetamise remonditööd koosnevad tänaste materjalide (lubjakivi- ja graniitkillustik) puhul neljast etapist. Eksperthinnangute alusel on määratud järgmised teetööde ajalise kestvuse näitajad, mida kasutatakse käesolevas hinnangus.

1. Ettevalmistustööd 1 kuu (kiirusepiirang sõltub tee klassist)
2. Tasandusfreesimine 1 kuu (kiirusepiirang sõltub tee klassist)
3. Uue killustikaluse paigaldus 2 nädalat (kiirusepiirang sõltub tee klassist)
4. Asfaldikihtide paigaldus ja uus markeering: 1) tee klassid I ja II: 1 kuu ja 4 nädalat: 2) tee klassid III ja IV 1 kuu ja kaks nädalat

Hinnangute alusel on järeldatud, et tänaste materjalidega asfaldi vahetus kestab esimese teise klassi teedel kolm kuud ja 6 nädalat ning kolm kuud ja neli nädalat kolmanda ja neljanda klassi teedel. Gneisskillustiku kasutuselevõtt lühendaks remondi aega kahe nädala võrra, sest katendis olevat killustiku ei ole vaja vahetada. Sellest lähtuvalt on igale tee klassile arvatud remondil killustiku vahetamisega lisanduv tee kasutaja ajakulu.

Tee klassidel II, III ja IV on killustiku vahetuse ajal kiiruse piirang 30 km/h. Arvestades, et liiklusel on kasutada mõlemas suunas ainult ühte sõidurada, reguleeritakse liiklust kas fooride või reguleerija abiga, mille tõttu lisandub keskmiselt 5 minutiline ooteaeg ühe kilomeetri läbimisel.

Tabel L1 näitab arvutustes kasutatud eeldusi tee klasside kaupa.

Tabel L1. Kiirusepiirangud tee klasside kaupa ja tee tööde puhul keskmine ooteaeg läbides 1 km

	I	II	III	IV
Tavakiirus (km/h)	110	100	90	90
Killustiku vahetamise töö ajal				
Kiirus ehitaja tööde ajal (km/h)	70	30	30	30
Keskmine ooteaeg (minutid)	0	5	5	5

Ülaltoodud eelduste juures on renoveerimistööde välisel ajal ühe kilomeetri läbimise aeg 36 sekundit II tee klassil ja 40 sekundit tee klassidel III ja IV. Killustiku vahetamise ajal pikeneb tee klassidel II, III ja IV ühe kilomeetri läbimise aeg ooteaja ja madalama kiiruse tõttu 420-le sekundile. Seega lisandub 380 kuni 384 sekundit.

Tabel L2. Ühe kilomeetri läbimise aeg tavakiiruse puhul ja tee tööde ajal, sekundites

	I	II	III	IV
Läbimise aeg tavakiirus (sekundites)	33	36	40	40
Läbimise aeg killustiku vahetamise töö ajal				
Kiirus tööde ajal (sekundites)	51	120	120	120
Keskmine ooteaeg (sekundites)	0	300	300	300
Lisanduv läbimise aeg tee töö ajal (sekundites)	19	384	380	380
Lisanduv läbimise aeg tee töö ajal (tundides)	0,0052	0,1067	0,1056	0,1056

Ühe kilomeetri kohta lisanduvat aega, mis on tingitud pikematest renoveerimistöodest, on võimalik, kui arvestada keskmist liiklussagedust, sõidukite täituvust ja aja väärtust.

Sõidukite arv aastal 2023 lähtub liiklusloendusest ja keskmine ööpäevane liiklus aastal 2047, mis eeldatavasti on 21-e aasta peale gneisskillustiku kasutuselevõtu, baseerub Tallinna Tehnikaülikooli 2020. aastal koostatud keskmistest kasvuteguritest, mis on esitatud töös „Liiklusuuringu juhendi ja baasprognoosi koostamine“.⁸ Eeldatud on, et keskmine sõiduki täituvus on 2 inimest, mis tähendab, et korrutades keskmist ööpäeva liiklust kahega on võimalik hinnata inimeste arvu kellele lisandub ajakulu.

Järgmine tabel näitab arvutusliku hinnangut lisanduvale ajale ühe tee kilomeetri läbimisel remondi ajal tee klasside kaupa aastal 2023 ja 2047 eeldusel, et aja väärtus on keskmiselt 8 eurot tund⁹. Gneisskillustiku kasutuselevõtt võimaldaks vältida näidatud lisanduvat ajakulu aastal 2047. Vastavad andmed I-IV teeklassi ühe kilomeetri kohta on esitatud all olevas tabelis L3.

Tabel L3. Ühe kilomeetri ajakulu ühe kilomeetri läbimisel tee klasside kaupa, eurodes aastal 2023 ja aastal 2047

	I	II	III	IV
Aja väärtus €/h	8	8	8	8
Keskmine sõiduki täituvus	2	2	2	2
Lisanduv ajakulu keskmine sõiduk, €	0,08	1,71	1,69	1,69
Killustiku vahetamise kestvus (ööpäevades)	14	14	14	14
Keskmine ööpäevane liiklus (loendus 2023)	20 060	8 766	4 184	1 261
Keskmine ööpäevane liiklus (aastal 2047)	26 713	11 554	5 450	1 560
Lisanduv ajakulu (aastal 2023) €/km	23 343	209 449	98 928	29 816
Lisanduv ajakulu (aastal 2047) €/km	31 084	276 064	128 862	36 885

⁸ L. Kaal, T. Metsvahi, and A. Kendra, "Liiklusuuringu juhendi ja baasprognoosi koostamine," 2020.

⁹ David Meuniera, Emile Quinetb. Value of Time estimations in Cost Benefit Analysis: the French experience. Transportation Research Procedia 8 (2015) 62 – 71

Eeldades, et olemasolevaid teid on vaja remontida iga 20 aasta järel (s.t. vahetada kõik asfaltkatted ja kui kasutusel on lubjakivikillustik, ka aluskihid) võime eeldada, et järgmise 20 aasta jooksul on igal aastal vaja remontida 1/20 (ehk 5 protsenti) olemasolevatest teedest. Gneisskillustiku kasutuselevõtt aastal 2027 tähendaks, et Eesti riigimaanteede võrgustikule liiklussagedusega 500 või enam AKÖL-i on asendatud katendi aluses olevad tänased materjalid (lubjakivikillustik ja graniitkillustik). Aastal 2047 vähendab gneisskillustiku kasutuselevõtt tee kasutajate ajakulu lähtuvalt tee klasside kilometraažist. Kokku väheneb ajakulu rohkem kui 21 miljonit eurot. Aja võit on kõige suurem tee klassides II ja IV, milledes väheneb ajakulu aastal 2047 umbes 8 miljonit eurot.

Tabel L4. Välditav remondi ajal lisanduv ajakulu tee klasside kaupa aastal 2047 eeldusel, et gneisskillustik võetakse kasutusele aastal 2027, tuhandes eurodes. (2023. aasta hindades)

	I	II	III	IV	Tee klassid kokku
Kokku teede km	89,3	614,8	775,8	4 429,9	5 909,8
Igal aastal remonditakse, 5%	0,05	0,05	0,05	0,05	
Remonditakse, km	4,5	30,7	38,8	221,5	
Välditav ajakulu aastal 2047, tuhat €	139	8 486	4 999	8 170	21 794

Kokku oleks võimalik vältida lisanduvat ajakulu hindamisperioodi aastatel 2047-2076 tee klassides II, III ja IV vahemikus 177 kuni 300 miljonit eurot ja umbes 5 miljonit tee klassis I.

Tabel L5. Välditav remondi ajal lisanduv ajakulu tee klasside kaupa kokku aastatel 2047-2076 eeldusel, et gneisskillustik võetakse kasutusele aastal 2027, tuhandes eurodes (2023. aasta hindades).

	I	II	III	IV	Tee klassid kokku
Välditav ajakulu kokku aastatel 2047-2076, tuhat €	4 977	302 289	176 733	279 540	763 539

Arvestades, et aja võit tekib aastal 2047, on välditav ajakulu ajaldatud 3 protsendilise intressimääraga aastale 2027. Tulemus (Tabel L6) viitab sellele, et tänane hinnang välditavale ajakulule tee klassides II ja IV on umbes 100-110 miljonit eurot ja tee klassis III umbes 65 miljonit eurot.

Tabel L6. Välditav remondi ajal lisanduv ajakulu tee klasside kaupa kokku aastatel 2047-2076 eeldusel, et võetakse gneisskillustik kasutusele aastal 2027, nüüdispuhasväärtus tuhandes eurodes (2023. aasta hindades).

	I	II	III	IV	Tee klassid kokku
Välditav ajakulu kokku aastatel 2047-2076, tuhat €	1 806	109 819	64 275	102 147	278 047

Teekasutaja ajakulu esialgne analüüs näitab, et gneisskillustiku kasutuselevõtuga riigimaanteede katendikonstruktsioonides kaasneb märkimisväärne teekasutaja ajakulu vähenemine, sest gneisskillustikuga konstruktsioonid on vastupidavamad ja langeb ära vajadus iga 20 aasta tagant vahetada katendi aluses olevat killustikku.

LISA 5. HINNANG TEEDE KONSTRUKTSIOONIDES KASUTATAVATE KILLUSTIKE VAJADUSELE HINDAMISPERIOODI JOOKSUL

Tabelis L7 on toodud ligikaudne hinnang materjali kulule 50 aastase hindamisperioodi jooksul uuringus käsitletud stsenaariumide kaupa. Praegu kasutatava stsenaariumi Trad_Paas materjalivajadus hindamisperioodi jooksul on paekivikillustiku osas veidi üle 80 miljoni tonni ja imporditava graniitkillustiku osas ca 36 miljonit tonni. Katendikonstruktsioonis ainult gneisskillustikku kasutava stsenaariumi Trad_Gneiss1 materjalivajadus hindamisperioodi jooksul on ca 65 miljonit tonni gneisskillustikku. Nende kahe stsenaariumi materjalikulu erinevus on 45 protsenti. Lisaks teistele positiivsetele teguritele, nagu laienemissurve pidurdumine paekarjäärیده ja graniitkillustiku impordivajaduse vähenemine on kodumaist gneisskillustikku kasutatavate stsenaariumide rakendamisega teede remondil seotud ka suur materjali kokkuhoid.

Tabel L7. Hinnang killustike kulule 50 aastase hindamisperioodi jooksul, (tuhandetes tonnides) ja materjali kulu suhteline erinevus võrreldes stsenaariumiga Trad-Paas.

Stsenaariumi variant	Paekivikillustik	Graniitkillustik	Gneisskillustik	Kokku materjali kulu	Materjali kulu vahe protsentides
Trad Paas	80 884	36 145	0	117 029	0%
Trad Gneiss1	0	0	64 893	64 893	-45%
Trad Gneiss2	0	23 126	41 727	64 853	-45%
Rootsi_Paas	121 618	32 413	0	154 031	32%
Rootsi_Gneiss1	0	0	97 213	97 213	-17%
Rootsi_Gneiss2	0	18 068	78 645	96 713	-17%

LISA 6. TÖÖ TULEMUSTE LAIENDAMINE TEISTELE AVALIKULT KASUTATAVATELE TEEDELE

Tuginedes peatükis „Uuringu tulemuste laiendamine teistele avalikele teedele“ (lk.116) toodud analüüsile saab anda kaudse hinnangu, et kui lisada riigimaanteede mahtudele 20%, siis on uuringu tulemusi võimalik laiendada ka muudele avalikult kasutatavatele teedele. Allpool toodud tabelites on käesoleva töö tulemusi laiendatud selliselt, et riigimaanteedele on lisatud ka muud avalikult kasutatavad teed. Hinnanguliselt on muude avalikult kasutatavate teede teeklasside struktuur teeklasside kaupa sarnane riigimaanteede struktuurile. Allolevates tabelites L7-L10 olevad arvnäitajad on saadud käeoleva, I-IV teeklassi riigimaanteid käsitleva töö tulemuste korrutamisel 1,2-ga. Seejuures ei muutu lubjakivikillustikku ja gneisskillustikku kasutatavate stsenaariumide tulemitte omavaheline suhe.

Tabel L8. Riigimaanteede ja muude avalikult kasutatavate teede remondikulu (renoveerimise ja asfaldi ülemise kihi asendamise kulu) 50-aastase hindamisperioodi jooksul, kulude summa teeklasside kaupa, miljon eurot 2023. aasta hindades.

Variant	I klass 14500+	II klass 6000-14500	III klass 3000-6000	IV klass 500-3000	Kokku
Trad_PAAS	460	1 698	1 304	3 992	7 454
Trad_Gneiss1	358	1 214	859	3 241	5 674
Trad_Gneiss2	298	1 246	876	3 307	5 726
Rootsi_Gneiss1	372	1 243	906	3 634	6 154
Rootsi_Gneiss2	365	1 273	1 142	3 688	6 467

Tabel L9. Hinnang killustike vajadusele 50 aastase hindamisperioodi jooksul, (tuhandetes tonnides) ja materjali kulu suhteline erinevus võrreldes stsenaariumiga Trad-Paas. Riigimaanteed ja muud avalikult kasutatavad teed.

Stsenaariumi variant	Paekivikillustik	Graniitkillustik	Gneisskillustik	Kokku materjali kulu	Materjali kulu vahe protsentides
Trad Paas	97 061	43 347	0	140 435	0%
Trad Gneiss1	0	0	77 872	77 872	-45%
Trad Gneiss2	0	27 751	50 072	77 834	-45%
Rootsi_Paas	14 5942	38 896	0	184 837	32%
Rootsi_Gneiss1	0	0	116 655	97 213	-17%
Rootsi_Gneiss2	0	21 682	94 374	96 713	-17%

Tabel L10. Riigimaanteede ja teiste avalike teede remondiga seotud kulud ja väliskulud 50-aastase hindamisperioodi jooksul. Katendivariantide võrdlus

Variant	Remondikulu, kokku (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.17)		Remondikulu, nüüdispuhasväärtus (NPV) (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.18)		Väliskulu otsene kokku (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.47a)		Väliskulu otsene + kaudne kokku (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.47)	
	milj. €	erinevus, %	milj. €	erinevus, %	milj. €	erinevus, %	milj. €	erinevus, %
Trad_PAAS	7 454	0	3 952	0	2 551	0	4 369	0
Trad_Gneiss1	5 674	-24	3 311	-16	1 950	-24	1 950	-55
Trad_Gneiss2	5 726	-23	3 340	-15	1 922	-25	1 922	-56
Rootsi_Gneiss1	6 154	-17	3 838	-3	1 634	-36	1 634	-63
Rootsi_Gneiss2	6 467	-13	4 004	1	1 742	-32	1 742	-60

Tabel L11. Killustikega (aluskihis ja asfaldis olev killustik) otseselt ja kaudselt seotud CO₂-e emissioonid stsenaariumide kaupa 50-aastase hindamisperioodi jooksul. Katendivariantide võrdlus, riigimaanteed ja teised avalikud teed.

Variant	Killustikega otseselt seotud CO ₂ emissioon (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.33)		Killustikega otseselt ja kaudselt seotud CO ₂ emissioon (teeklasside kaupa vt. Tabel 1.33a)	
	tuhat tonni	erinevus, %	tuhat tonni	erinevus, %
Trad_PAAS	1 277	0	2 830	0
Trad_Gneiss1	220	-83	220	-92
Trad_Gneiss2	568	-59	525	-81
Rootsi_Gneiss1	197	-85	197	-93
Rootsi_Gneiss2	494	-61	495	-83

LISA 7. PAEKIVIKILLUSTIKU HINNA TUNDLIKKUSE ANALÜÜS

Paekivikillustiku hinna tundlikkuse analüüs näitab olemasolevate riigimaanteede aastast remondikulu teeklasside kaupa sellises turuolukorras, kus paekivikillustiku hinnaks on võetud 10 €/t varasema 17 €/t asemel. Teiste materjalide hinnad, sh gneisskillustiku hind on jäänud varasemas analüüsis kajastatuga võrreldes muutmata. Tundlikkuse analüüsi tulemused on toodud tabelis L12. Variantis 1 vahetatakse välja asfalt ja aluse killustikukihid ning asendatakse tänaste materjalidega. Variantides 2 ja 3 vahetatakse välja asfalt ja aluskihtide killustik, asendades see gneisskillustikuga.

Gneisskillustiku kasutuselevõtu hinnaks teeklassides kokku oleks aastane renoveerimiskulude 13 protsendiline tõus esimese 20 aasta jooksul. Alates 21.aastast on iga-aastane kulu 36-37 protsenti madalam, kui tee remontimisel on katendi konstruktsioonis kasutatud gneisskillustikku (eeldab, et renoveerimisel on valitud alternatiiv 2 või 3).

Tabel L12. Olemasolevate teede iga-aastane remondikulu teeklasside kaupa erinevatel perioodidel, remondi ja ülemise asfaldikihi vahetamise kulu teeklasside kaupa erinevatel perioodidel, Stsenaarium Traditsiooniline, tuhandetes eurodes, paekivikillustiku hind 10 euro/tonn, (LA30, LA35 (AC base)), 2023 aasta hindades.

Alt.	Aasta	Variant	I klass 14500+	II klass 6000- 14500	III klass 3000- 6000	IV klass 500- 3000	Tee klassid kokku	Tee klassid kokku (%) muutus*
1	1-20	Trad_ PAAS	7 191	25 717	19 175	56 998	109 081	0%
2	1-20	Trad_ Gneiss1	7 032	26 775	18 501	70 454	122 762	13%
3	1-20	Trad_ Gneiss2	6 022	27 290	18 766	71 557	123 634	13%
1	21-50	Trad_ PAAS	7 191	25 717	19 175	56 998	109 081	0%
2	21-50	Trad_ Gneiss1	5 020	14 743	10 353	38 996	69 113	-37%
3	21-50	Trad_ Gneiss2	4 011	15 258	10 619	40 099	69 987	-36%