TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOOL
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

PESTUD PAEKIVILIIVA KASUTAMINE TALLINNA TEEDE JA TÄNAVATE EHITAMISEL

II etapp

Tallinn 2010

SISUKORD

Sissejuhatus 3

1. Teekonstruktsiooni töötamisest 4

2. Laboratoorsed katsetused 8

2.1. Paekivi- ja kvartsliiva segu 8

2.1.1. Tulemused 9

2.2. Puhta paekiviliiva katsetused 11

2.2.1. Esimene laboratooriumikatsetus 11

2.2.2. Teine laboratooriumikatsetus 14

2.3. Peenosiste sisalduse seos filtratsioonimooduliga 18

3. Teekonstruktsiooni arvutused 20

4. Soovitused paekiviliiva kasutamisele 24

5. Edasised uuringud 27

Kokkuvõte 30

Kasutatud kirjandus 32

Lisad 33

SISSEJUHATUS

Paekiviliiva uuringute esimene etapp tegi kokkuvõtte siiamaani toimunud uuringutest antud materjaliga ja tõi välja küsitavusi, mis nende uuringutega tekkis. Samuti rõhutati, et seda materjali ei saa kui teede-ehituses kasutuskõlbmatut kõrvale heita ja pakkus välja kaks lahendit – segades paekiviliiva kvartsliivaga ja/või kasutades armeerivat geosünteeti, soovitavalt geovõrku ja –tekstiili koos, kergendades konstruktsioonis toimuvat pingeolukorda, mis võiks potensiaalselt paekiviliiva terakesi purustada, tekitades liialt peenikest osist (osakese suurus alla 0,006mm) ja vähendades filtratsioonimoodulit alla nõutava taseme (muldkehas kasutataval materjalil ≤0,5m/ööp).

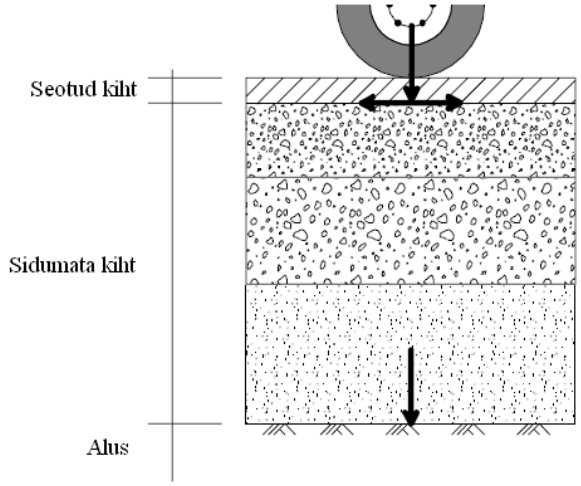
Paekiviliiva uuringute teine etapp keskendub laboratoorsetele uuringutele ja lisasoovitustele, kuidas antud materjali teede-ehituses kasutada. Mõningal määral on käsitletud ka vertikaal- ja nihkepingete arvutustemaatikat. Laboratoorsete uuringutega uuriti paekiviliiva vastupidavust nihkejõududele ning kvartsliiva segu sisehõõrdenurka ja nidusust.

1. TEEKONSTRUKTSIOONI TÖÖTAMISEST

Olemasolevad uuringud paekiviliivale näitasid, et paekiviliival on kalduvus puruneda dünaamilise koormuse all; see ei sisendanud piisavalt kindlust, et liikluskoormuse all säiliksid tema omadused pikaajalises perspektiivis, mis omakorda võiks põhjustada erinevaid probleeme teekonstruktsiooni püsivusega, eriti, mis puudutas materjali filtreerivate omaduste säilimist.

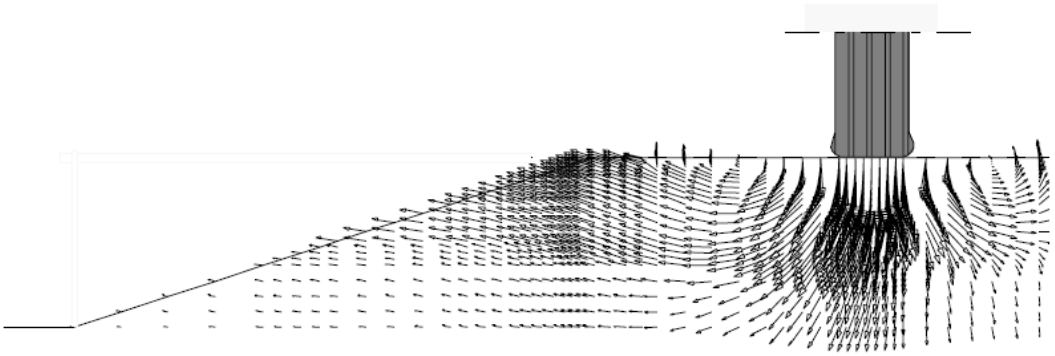
Koormus teekonstruktsioonile tuleb liiklusest, ilmastikust ja omakaalust. Liikluskoormust ja sellega seotud probleemidest arutleti mõningal määral paekiviliiva uuringute esimese etapi aruandes, kuid saamaks selget pilti koormuse mõjust teekonstruktsioonile, käsitleme seda temaatikat pisut ka siin.

Teekonstruktsioonis asetsevad kihid töötavad erineval viisil. Koormates asfalttee pinda, tekivad asfaltkatte (seotud kihi) alapinda tõmbepinged ja sidumata kihtides survepinged (joonis 1). Survepinged sidumata kihtides mõjutavad teekonstruktsiooni läbi järeltihenemise ja nihkepingete. Näiteks üheks roobaste tekke põhjuseks on erinevate kihtide järeltihenemine suure liikluskoormuse all, kiht vajub ja tekkinud vajum peegeldub ülapinda. Jämedamateralised materjalid, eriti kui nende osakesed mineroloogilise tausta tõttu on suhteliselt nõrgad (nt. kvartsi osakesed on üle saja korra tugevamad kui paekivi osakesed), võivad suurte survepingete tõttu hakata massiliselt purunema, purunenud osadest tekib peenem osis, mis võib nihkuda allapoole, tekitades tühimiku ehk vajumi. Seega, soovides kasutada nõrgemat materjali, on oluline määrata materjali osakeste tugevuspiir.



Joonis 1. Asfaltkatte alapinda tekivad liikluskoormusest tõmbepinged ja sidumata kihtidesse survepinged, mis põhjustavad omakorda materjali sees nihkepingeid.

Survepinged tekitavad veel materjali kihis nihkeid. Materjali osakesed üritavad liikuda sõidujälgede all allapole (ehk toimub tihenemine) ja külgedele, kus on väiksem tihedus (joonis 2)[2]. Külgsuunalisi liikumisi takistavad materjali sisehõõrdenurk ja nidudus. Nendega arvestatakse ka teekonstruktsiooni tugevusarvutustel, mis aga näitavad vaid kihi täielikku lagunemist, mitte üksikute osiste purunemist, mis toimub enne, kui kogu kihis tekib täielik stabiilsuse kadu. Seega, soovides kasutada nõrgemat materjali, on oluline määrata materjali osakeste tugevuspiir.

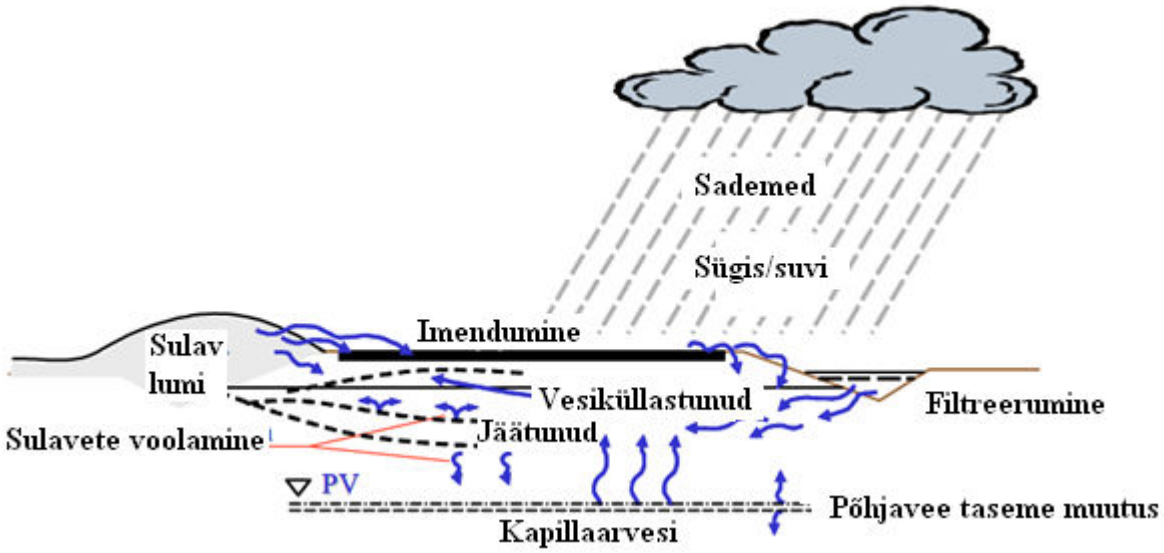


Joonis 2. Materjaliosakesed üritavad liikuda vähem tiheda keskkonna poole. [2]

Peatükis 2 kirjeldatakse laborikatsetusi ja tulemeid, mis saadi segude ja puhta paekiviliiva testimisel.

Oluline on veel märkida, et teekonstruktsioonis püsivad deformatsioonid muutumatutena või minimaalsetena siis, kui liikluskoormus ei ületa 60-70% materjali staatilisest tugevusest (J.Belt. Oulu 2006). [1]

Teine tegur, mis mõjutab tugevalt teekonstruktsiooni ning seal olevate materjalide püsivust ja vastupidavust, on ilmastik, Eesti kliimas täpsemalt niiskus, külmumine ja sulamine. Katendis asetsev ülemäärane niiskus pärineb peamiselt sade- ja sulavetest. Osa veest imbub kruusapeenardelt, nõlvadelt või otse läbi katte. Sademed mõjutavad ka põhjavee taset ja läbi selle aluspinnase veesisaldust (joonis 3), miskaudu muldesse ja katendisse võib läbi kapillaartõusu tulla oluliselt vett juurde.



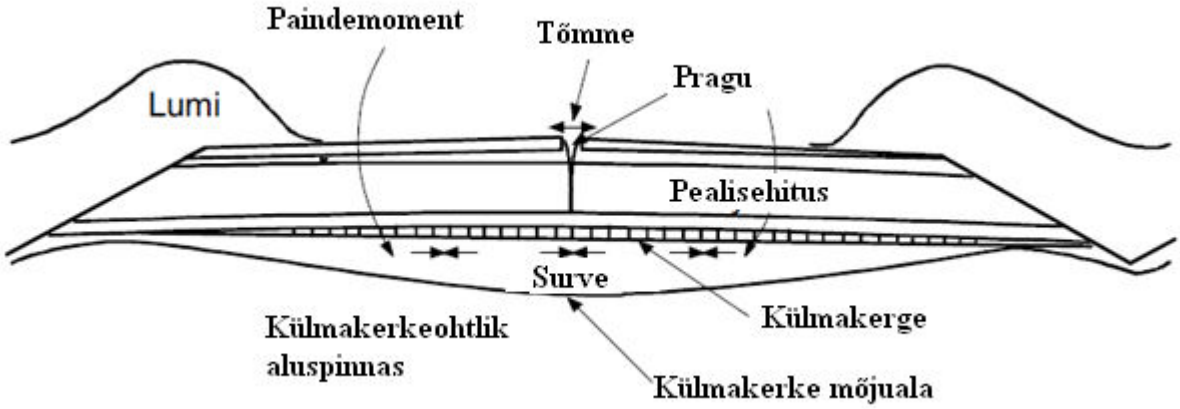
Joonis 3. Teekonstruktsiooni ja aluse veesisaldust mõjutavad tegurid. [2]

Ülemäärane niiskus mõjutab suuresti materjalide tugevusomadusi nagu nähtub tabelist 1, seega on oluline hoida teekonstruktsioon võimalikult kuivana (mõningatest võimalustest peatükis 4). Paekiviliiv on suhteliselt vett kartev – osakesed on poorsed ja imavad endasse vett, seeläbi kaob mingil määral tugevus.

Pinnas	Kevadine E-moodul	Suvine ja sügisene E-moodul
Savi (mitte pehme)	35 (50)	45 (50)
Möllsavi, möll, savimöll	20 (25)	25 (35)
Mölline ja savine liiv	35 (50)	45 (50)
Jämeliiv, kruusliiv	130 (130)	130 (130)
Liivane kruus, kruus	150 (150)	150 (150)

Tabel 1. Erinevate materjalide tugevusomaduste sõltuvus aastaajast (sisuliselt niiskusest). [2]

Talvel suur niiskus teekonstruktsioonis külmub tekitades jääläätsi. Vee üheks omaduseks on liikumine soojemast keskkonnast külmemasse; kui põhjavesi on kõrgel tasemel ja aluspinnas või materjalid teekonstruktsioonis külmakerkeohtlikud (peamiselt tolmsed pinnased), tõuseb põhjaveest läbi kapillaartõusu külmunud tsooni veel vett, mis samuti jäätub. Piisava vee hulga korral pinnase poorid ei suuda mahutada enam jäätumisest tekkivat vee mahumuutust ja tekib külmakerge, mis enamasti väljendub pikipraona tee keskel (joonis 4).



Joonis 4. Külmakerke tekkimise protsess. [2]

2. LABORATOORSED KATSETUSED

Esimeses paekiviliiva uuringu aruandes soovitati laboratoorseteks katsetusteks muuhulgas kahte võimalust – paekiviliiva segu kvartsliivaga ja testides paekiviliiva osakeste vastupanuvõimet erinevatele koormustele, täpsemalt nihkejõududele. Neid kahte laboratoorsed katsed hõlmasidki.

Laboratoorsete katsetuste konsultandiks oli Peeter Talviste, IPT Projektijuhtimise OÜ juhataja. Katsed viidi läbi Eesti Keskkonnauuringute Keskuse Geotehnikalaboris, Suur-Sõjamäe 34 Tallinn.

2.1. Paekivi- ja kvartsliiva segu

Segude koostiseks valiti 30/70% ja 50/50%, vastavalt kvarts- ja paekiviliiva. Kuna paekiviliivas on tühje poore umbes 30%, siis eeldati, et seda hakkavad täitama tugevamad kvartsliiva osakesed, mis moodustavad tugevama struktuuri ja ei lase paekiviliiva osakestel nii palju puruneda, teoreetiliselt peaks muutuma nii sisehõõrdenurk kui nidusus, mis arvutustel annaks materjalile suurema nihketugevuse. Vahekord 50/50% peaks teoreetiliselt olukorda veelgi parandama ehk segumaterjal oleks veel tugevam.

Kvartsliiv (ehitusliiv) toodi Männiku karjäärist, OÜ C.B.A kaevandusmaardlast, ning pestud paekiviliiv (0/4) Väo karjäärist (mõlema sertifikaadid on esitatud lisades 1 ja 2, kvartsliivast sõeluti suuremad kui 4mm osad välja), segati kaalu järgi kokku (3kg kvartsliiva ja 7kg paekiviliiva) ning kuivatati laboratooriumis õhkkuivaks. Katse eesmärk oli määrata segude sisehõõrdenurk ja nidusus nii õhkkuivalt kui lähedal optimaalsele niiskusele (w=8%).

Sisehõõrdenurga ja nidususe määramise tingimused olid samad, mis esimese paekiviliiva uurimisaruande lisas esitatud puhta paekiviliiva sisehõõrdenurga määramisel (IPT Projektijuhtimise OÜ. Pestud paesõelmete (paeliiva) sisehõõrdenurk ja hõõrdetegur. Uurimistöö aruanne. Tallinn 2009).

2.1.1. Tulemused

Tabelis 2 on esitatud kokkuvõtvalt tulemid nii segudest (õhkkuivalt ja märjalt), kui tulemid puhta paekiviliiva katsetustest. Labori väljastatud tulemused on esitatud täismahus lisas 3.

Tabelist nähtub, et antud uuringu käigus tehtud laborikatsetustega pole näha kvartsliiva positiivset mõju paekiviliiva omadustele. Lõplike ja täpsete järelduste tegemiseks on siiski katseseeriaid vähe, kuid praegused andmed annavad aimduse, mis tulemused on, vähemalt arvutuslike parameetrite osalt. Tabelist nähtub ka, et niiskus avaldab segudele tugevat mõju ja kvartsliiv seda mõju ei vähenda.

Labori nr.	**Materjal**	**Pinnas**	**σ kPa**	**τ_f kPa**	**w_1 %**	**w_2 %**	**ρ_d g/cm^3**	**ρ_{d1} g/cm^3**	**φ kraad**	**c kPa**
6063-1	segu: 30% liiva + 70% paeliiva	õhkkuiv	50	67,5	0,6	0,1	2,01	2,02	43	45
			100	135	0,5	0,1	2,03	2,05		
			200	220	0,6	0,1	2,00	2,06		
			400	480	0,4	0,1	2,00	2,05		
			800	760	0,4	0,1	1,99	2,08		
6063-2	segu: 30% liiva + 70% paeliiva	õhkkuiv	50	72,5	0,5	0,1	2,01	2,03	44	34
			100	135	0,1	0,1	2,03	2,05		
			200	240	0,1	0,1	2,02	2,05		
			400	400	0,2	0,1	2,01	2,06		
			800	800	0,1	0,1	2,01	2,13		
6063*-1	segu: 30% liiva + 70% paeliiva	märg, w = 8%	50	45	7,9	7,5	1,75	1,78	33	34
			100	85	8,1	7,6	1,75	1,83		
			200	170	7,8	7,2	1,76	1,82		
			400	340	7,6	7,1	1,79	1,90		
			800	520	7,6	7,0	1,79	1,94		
6063*-2	segu: 30%	märg, w =	50	45	7,7	7,3	1,77	1,80	32	25

	liiva + 70%	8%								
	paeliiva		100	90	7,7	7,3	1,78	1,81		
			200	150	8,0	7,6	1,75	1,82		
			400	300	7,8	7,5	1,79	1,88		
			800	520	8,0	7,7	1,79	1,98		
6064-1		õhkkuiv	50	57,5	0,1	0,1	2,00	2,02		
	segu: 50%		100	115	0,1	0,1	1,99	2,01		
	liiva + 50%		200	210	0,1	0,1	1,99	2,02	38	45
	paeliiva		400	400	0,2	0,1	2,00	2,05		
			800	640	0,1	0,1	1,98	2,04		
6064-2		õhkkuiv	50	62,5	0,2	0,1	2,00	2,01		
	segu: 50%		100	105	0,2	0,1	1,99	2,01		
	liiva + 50%		200	200	0,2	0,1	2,00	2,05	38	43
	paeliiva		400	420	0,3	0,1	1,97	2,03		
			800	640	0,2	0,1	1,98	2,04		
6064*-1		märg, w = 8%	50	47,5	7,6	7,3	1,76	1,79		
	segu: 50%		100	80	7,5	7,2	1,80	1,84		
	liiva + 50%		200	140	7,5	7,0	1,75	1,82	34	6
	paeliiva		400	260	7,6	7,1	1,74	1,84		
			800	560	7,7	7,1	1,76	1,91		
6064*-2		märg, w = 8%	50	40	7,9	7,6	1,75	1,77		
	segu: 50%		100	80	7,9	7,5	1,79	1,84		
	liiva + 50%		200	130	7,6	7,2	1,74	1,80	33	9
	paeliiva		400	200	7,8	7,4	1,78	1,88		
			800	520	7,8	7,3	1,75	1,90		
4670		kruusaga	50	55	8,5		1,83	1,87		
		jämeliiv	100	95	8,6		1,83	1,89		
	pestud		200	200	8,5		1,83	1,91		
	paesõelmed		400	320	8,6		1,83	1,92		
			800	600	8,5		1,83	1,99		
4671		kruusaga	50	52,5	8,9		1,83	1,87		
		jämeliiv	100	95	8,8		1,83	1,89		
	pestud		200	170	8,7		1,83	1,90	36	25
	paesõelmed		400	320	8,8		1,83	1,93		
			800	640	8,9		1,83	1,97		
4670-4671	pestud	kruusaga	50	52,5	8,7		1,83	1,87		
	paesõelmed	jämeliiv	100	100	8,7		1,83	1,94		

			200	170	8,7		1,83	1,90		
			400	300	8,8		1,83	1,94		
			800	600	9,0		1,83	2,00		

Tabel 2. Pestus paekiviliiva (0/4) nihketeimide tulemid.

2.2. Puhta paekiviliiva katsetused

Esimeses paekiviliiva uuringu aruandes kirjeldati pingete arvutamist homogeenses pinnases. Eelpool kirjeldatud põhjuste tõttu otsiti viise, kuidas leida jõude, mis purustavad paekiviliiva üksikuid osakesi. Tallinna Tehnikakõrgkooli assistent Sven Sillamäe koostöös Peeter Talvistega töötasid välja eriprogrammi nihkeaparaadile TSNIIS.

2.2.1. Esimene laboratooriumikatsetus

2.2.1.1. Metoodika

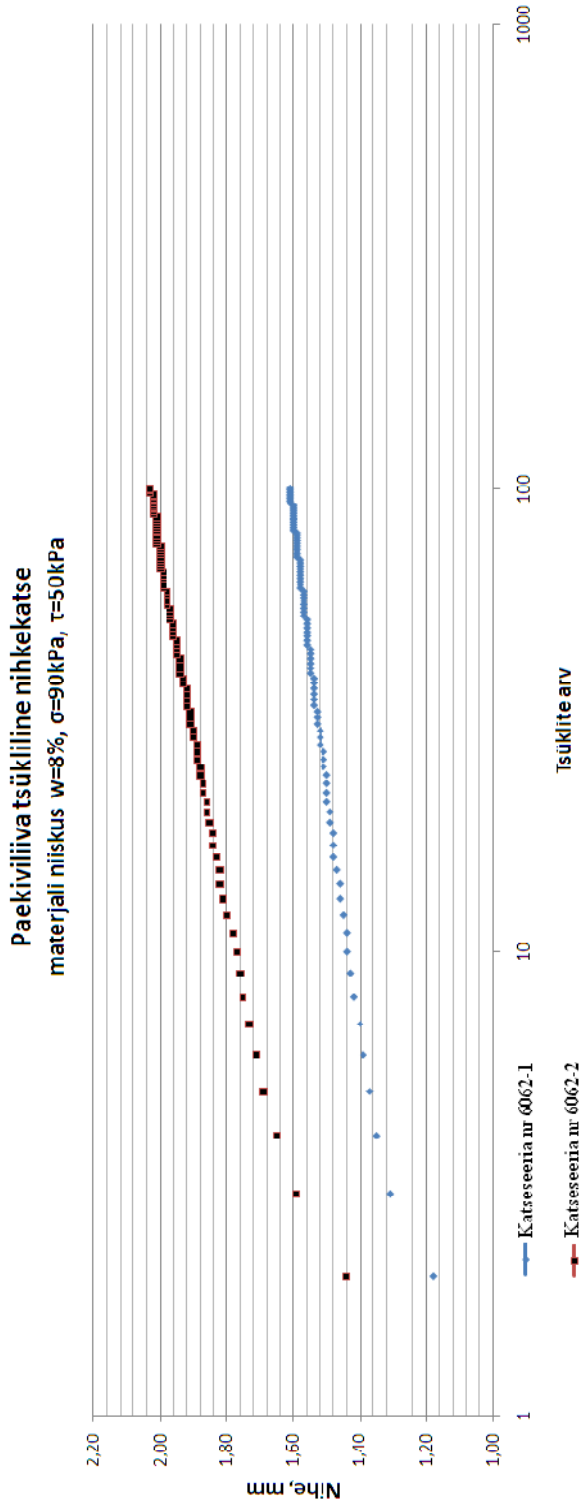
Esimeseks katseseeriaks ja katsetuste aluseks valiti vertikaal- ja nihkepingete väärtused, mis vastasid homogeenses pinnases vastavalt 90 ja 50kPa ja tehti nihketeim nihkeaparaadis TSNIIS. Valmistati ette proov, mille kõrgus oli 24mm ja läbimõõt 71mm. Proovid tihendati käsitsi vastavalt valitud niiskuse juures (kas õhkkuiv või märg). Enne nihketeimi toimus proovi eeltihendamine 1 tunni vältel vertikaalpinge 90kPa juures.

Katse näol oli tegemist tsüklilise nihkega, kus kummagi (vertikaal- ja nihkepinge) väärtusi ei muudetud. Sellega üritati läbi mängida ühe normbussi ületust homogeense paekiviliiva kihi peal. Kuna varem pole antud katsetust tehtud, kirjandusest infot selle kohta ei õnnestunud leida, siis proovimise mõttes tehti katsed kahes niiskusrežiimis – materjal õhkkuivalt ja optimaalse niiskuse (w=8%) juures. Ühe tsükli aeg oli kaks minutit – üks minut koormamist ja teine nullkoormust. Peale igat tsüklit võeti näidikutelt lugem saamaks toimunud nihke väärtust. Teimi kestus oli 106 tsüklit.

Algne eesmärk tsüklilisel nihkekatsel oli uurida, kuidas materjal ja selle osakesed peavad vastu nihkele, seega mõõdeti peale igat koormamist nihke väärtus ja kanti tabelisse. Teiseks eesmärgiks oli vaadata, kas peenosise sisaldus suureneb, sellega saaks kindlaks määrata, kas ja kui palju materjaliosakesed purunevad.

2.2.1.2. Tulemused

Tsüklilise nihketeimide kogu tulemused on esitatud tabelite ja graafikutena lisas 3. Ka siin on märgatav vahe materjali õhkkuiva ja märja oleku vahel – järgmisteks katseteks andis see suuna keskenduda vaid märja materjali edaspidistele katsetustele. Joonisel 5 on kujutatud materjali nihe logaritmilises süsteemis. Nii laboratoorsetele tabelitele kui ka logaritmilisele graafikule tuginedes on näha, et materjali sees selliste jõudude puhul võivad toimuda pikemas perspektiivis püsivad nihked. Samuti suurenes mõningal määral materjali peenosiste sisaldus, märja materjali puhul 2,2->2,6% ja 2,2->3,0%. Siiski tasub märkida, et selline peenosise sisalduse suurenemine veel ei tekita materjali filtreerivate omaduste kadu (väidet selgitatud peatükis 2.3).



Joonis 5. Esimese laborikatsetuste seeria tsüklilise paekiviliiva nihketeimi tulemid logaritmilise graafikuna.

2.2.2. Teine laboratooriumikatsetus

Esimene laboratooriumikatsetus tsüklilise nihketeimina oli proov, kas antud viis võiks anda kasutatavaid ja tõeseid tulemeid. 106 tsükli juures oli näha materjalis toimunud nihkumisi ja peenosiste hulga suurenemist. Edasi otsustasime suurendada tsüklite arvu 500ni jättes koormuse samaks, kontrollimaks, kas saadud andmetest tuletatud logaritmiline skaala on tõene ja kas peenosiste sisalduse kasv jätkub samas tempos. Võtsime võrdluseks ka Kuusalu karjääri kvartsliivast toodetud libedusetõrje liiva terasuurusega 2/8, mida saab igaüks ehituspoodidest osta ja mille kvaliteet on kindel. Tsüklite arv siin oli 100, vertikaal- ja nihkepinged jäid samad. Kasutatud kvartsliiv ja paekiviliiv on esitatud fotodena 1, 2 ja 3. Kvartsliiva terasuurus oli 2/8, millest sõelumisega sai 2/5. Antud materjal sai valitud, kuna selle kvaliteet on püsiv ja tulevasteks uuteks katsetusteks kergesti kättesaadav.

Fotod 1 ja 2. Kontrollkatsetusteks kasutatud kvartsliiv.

Foto 3. Katsetatud pestud paekiviliiv 0/4.

Kolmanda katseseeriana otsustasime langetada vertikaal- ja nihkepingete väärtusi vastavalt 50 ja 25kPa ning jälgida nihkeid ja peenosiste kasvu väiksemate jõudude juures. Tsüklite arv siin oli 100.

2.2.2.1. Metoodika

Muud tingimused jäid samaks, mis esimese tsüklilise katse märja (w=8%) puhul, peale lugemite võtmise tiheduse. 500 tsükli puhul võeti lugemid peale igat 10ndat tsüklit. Tehes võrdluseks nimetatud kvartsliiva tsüklilise nihketeimi, oli niiskuse määr w=6%. Esimesed 25 lugemit võeti iga ühe minuti järel, edasi iga 10 tsükli järelt.

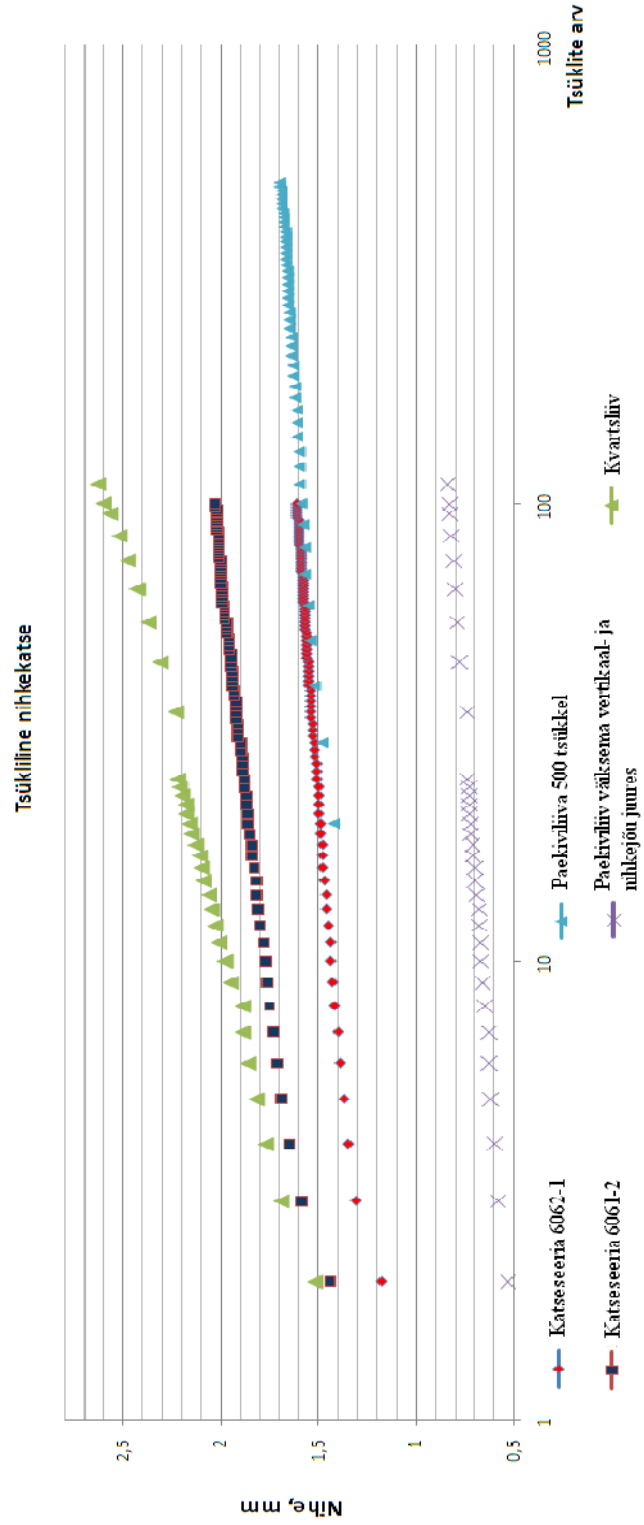
Kolmanda nihkekatsetuse puhul, kui materjalile avaldatavad pinged olid väiksemad, jäid tihendamise ja niiskuse nõuded samaks. Kokku tehti 100 tsüklit, esimesed 25 lugemit võeti iga ühe minuti järel, edasi iga 10 tsükli järelt.

2.2.2.2. Tulemused

Tsüklilise nihketeimide tulemused on esitatud tabelite ja graafikutena lisas 4. Tõstes paekiviliiva tsüklite arvu 106lt 500ni toimus just selline nihkedeformatsioonide kasv kui logaritmiline graafik andis oletada (joonis 6). Samas peenosiste kasvus olulist suurenemist ei olnud – tsüklit alustades oli peenosiste sisaldus 1,9 ning pärast 2,9. Võrreldes seda väiksema tsüklite arvuga näeme, et peenosiste kasvu suhe ei ole drastiliselt kasvanud, seega võiks järeldada, et pärast 100ndat tsüklit hakkab juba toimuma peenosiste suurenemise vaibumine.

Võrdluseks tehtud kvartsliiva tsükliline nihketeim näitas märgatavalt suuremat nihkedeformatsioonide teket. Põhjus võis olla liiga väheses peenosiste hulgas, mis hoiaks materjali nihkekindlamana (<0,006mm materjali oli 0,1%), samas peenosise hulk tsükli lõppedes ei muutunud. Suur nihkedeformatsioon näitas, et antud jõudude juures puudub materjalil kui tervikul piisav nihkejõud, mida tegelikus teekonstruktsioonis ei kohta, kuna arvutustega sellist olukorda ei lubataks. Arvestades seda, et avaldatud jõud olid selgelt liiga suured, oleks võinud paekiviliivas tekkida rohkem peenenemist, kui see hetkel oli – seega võib öelda, et materjal siiski talus antud koormust suhteliselt hästi.

Tsükliline paekiviliiva nihketeim väiksemate koormuste juures näitas ka nihkedeformatsioonide teket ja peenosise sisalduse suurenemist, kuid väiksemal määral. Arvutused peatükis 3 näitavad, et asfaltkattega teede puhul ei teki reaalselt paekiviliivas ka nii suuri nihkepingeid nagu katsetustega modelleeriti (τ=25kPa ületab materjali tegeliku nihketugevuse, seetõttu ka nihkedeformatsioonide teke). Sellegi poolest ei täheldatud tegureid, mis võiks põhjustada materjali drastilist purunemist. Tuginedes suure tsüklite arvuga katsele (500 tsüklit) poole suurema nihkejõu juures (τ=50kPa) võib oletada, et siin peenosiste sisalduse kasv kas peatub või kasvab väga vähesel määral.



Joonis 6. Kõik tsükliliste nihketeimide nihketulemid ühel logaritmilisel graafikul.

2.3. Peenosiste sisalduse seos filtratsioonimooduliga

Ramboll Eesti AS aruanne 2009-4, märts 2009. Pestud paeliiva katsetööd, Lõpparuanne toob lisades 9 ja 10 välja paekiviliiva omadused, sh peenosiste sisalduse seose filtratsioonimooduliga (andmed on esitatud lisas 5). Näiteks võib tuua, kus 9,5% peenosise sisalduse juures oli paekiviliival veel filtratsiooni moodul 3,8m/ööp, mis vastab muldes kasutatavatele materjalidele esitatud miinimumnõudele (>0,5m/ööp); või 6,4% ja 5,6m/ööp jne. Suur peenosiste sisaldus Rambolli aruandes võis tuleneda ka juba materjali algsest, puisteolekust võetud materjali peenosise sisalduses, nagu nähtub lisast 5. Hetke uuringuga mõõdeti paekiviliiva peenosiste sisalduseks stabiilselt oluliselt väiksem number (kusjuures proovid olid võetud suvalisest kohast puistehunnikust), keskmiselt 2%, seega peaks selle filtratsioonimoodul olema veel kõrgem kui Rambolli aruandes deklareeritud.

Suurimad pinged ja jõud, eriti mis puudutab muldes olevaid materjale, tekivad ehitamise, st tihendamise käigus. Tihendamisel raske vibrorulliga surutakse materjaliosakesed kiiresti ja tugevalt üksteisega kokku ja nihkesse, mis võib purustada näiteks paekiviliiva osakesi. Kõige tõenäolisemalt purunevad sellisel viisil materjali kõige nõrgemad osakesed ja tekitavad peent tolmu. Kui võrrelda Rambolli aruandes esitatud paekiviliiva tolmse osise hulka puisteolekus ja pärast tihendamist, siis nende omavaheline erinevus on maksimaalselt neli protsendiühikut (nt 5,2->9,5%), mis ei tekitanud filtratsioonimooduli langemist alla ega ka mitte lähedale nõutava minimaalse taseme.

Võttes aluseks antud aruandes käsitletud laboratoorsed andmed ja võrreldes neid Rambolli aruandega, ei näe me võimalust, et paekiviliiva filtratsioonimoodul võiks langeda alla nõutava taseme (algne peenosiste sisaldus oli keskmiselt 2% suurendades seda nelja ühiku võrra, saame 6%, mille filtratsioonimoodul vastavalt Rambolli aruandele on jämedalt öeldes 5m/ööp). Arvestades seda, et tihendamisel purunevad kõige nõrgemad osised ja liikluskoormuse all muldes olev materjal ei saa kunagi koormatud tihendamisega võrreldavate jõududega, siis tõenäoliselt peenosiste sisaldus aja jooksul drastiliselt ei suurene ja sellest tulenevalt filtratsioonimooduli taseme langemist alla nõutava taseme ei toimu. Paekiviliiv ei purunenud äärmuslikul viisil ka kordades suuremate nihkepingete mõjul, kui need tekiks reaalse arvututud teekonstruktsiooni all.

Praegused nihketeimid suuremate jõududega, mida materjal suudab vastu võtta, näitasid, et peenoosiste sisaldus jäi väikeseks ning kasvas vaid vähesel määral. Parimate tulemite saamiseks oleks vaja ehitada reaalne või seda lähedalt imiteeriv katseseade, kus toimuks ka paekiviliiva tihendamine mehanismiga ja seejärel koormamine, mis tekitaks materjali nihkejõude. Pärast seda määratud peenosiste hulga kasv ja filtratsioonimooduli vähendamine annaks lõplikke vastuseid. Hetkeste andmetega saame järeldada, et filtratsioonimoodul ei lange ekspluatatsiooni kõigus alla nõutava 0,5m/ööp taseme.

3. TEEKONSTRUKTSIOONI ARVUTUSED

Saamaks vertikaalpingeid liikluskoormusest ehk dünaamilisest koormusest teekonstruktsiooni all, kasutame Odemarki valemit, millega teisendatakse mingi kihi peal olevad kihid samale tasemele alumisega kihiga. Lihtsustades öeldes, suurema tugevuse ja jäikusega materjal võrdsustatakse tema all oleva materjaliga lisades kihipaksust määral, mis võimaldab sama pingeolukorda, mis on tugevama materjali all mingist koormusest. Valem on järgmine: [10]

$$h_c = 0{,}9 \left[\frac{E_1(1-\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_1^2)}\right]^{1/3} * h$$

kus:

h_c – ekvivalentne kihipaksus;

E_1 – ülemise kihi elastsusmoodul;

E_2 – alumise kihi elastsusmoodul;

ν_1 – ülemise kihi Poissoni tegur;

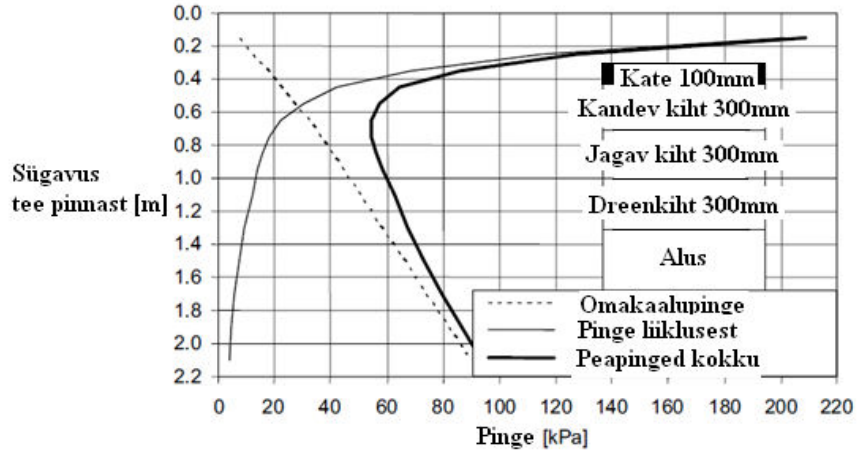
ν_2 – alumise kihi Poissoni tegur.

Arvutustulemused koos kujuteldavas teekonstruktsioonis paiknevate kihtide paksuste, elastsusmoodulite ja Poissoni teguritega on esitatud järgnevas tabelis 3. Lihtsustuse mõttes on valitud kõikide materjalide Poissoni teguri väärtuseks 0,35 (tuginedes viidatud allikale 1), hoolimata sellest, et elastsete teekatendite juhend soovitab kohati teisi väärtusi. Poissoni teguri muutmine mõjutab antud arvutustulemusi väga minimaalselt.

Odemarki teisendus:										
				E1	h	v	Ühildatud			
Esimese asfaldikihi elastsusmoodul				2400	5	0,35	1733	Mpa	15	cm
Teise asfaldikihi elastsusmoodul				1400	10	0,35				
Killustiku elastsusmoodul				280	25	0,35				
Dreenliiva elastsusmoodul				120	25	0,35				
Paekiviliiva elastsusmoodul				80		0,35				
			Homogeense kihi paksus							
hc, dreenliiv=	11,25	>	36,25	cm						
hc, killustik=	26,25	>	87,5	cm						
hc, asfalt=	97,5	>	200	cm						

Tabel 3. Teekonstruktsioon taandatud Odemarki meetodiga alumise kihi (paekiviliiva) omadustele.

Pingearvutus homogeenses pinnases on esitatud paekiviliiva esimeses aruandes. Antud arvutus ei pretendeeri absoluutsele tõele, aga näitab, et katend suudab tee pinnalt aluspinnasele üle kanda liiklusest tulenevaid koormuseid üpriski kiiresti ja katendi alla jõuavad suhteliselt väikesed pinged (kui mitte arvestada omakaalu, mis on staatiline koormus). Seda demonstreerib ka joonis 7, antud joonise puhul pole liikluskoormus tähtis, vaid see näitab, kui kiiresti pinged langevad. 0,6m on ühispinged (liikluskoormus ja omakaalukoormus kokku) kõige väiksemad ja alates sellest piirist muutuvad olulisemaks omakaalust põhjustatud pinged, mis on staatilised ja mis ei põhjusta enam paekiviliiva osakeste purunemist.



Joonis 7. Näitlik teekatend ja seal olevad peapinged nii liiklusest kui omakaalust.

Tabel 4 näitab nihkepingete väärtust katendi all. Joonisel esitatud katendi kihide paksused ja liikluskoormus on valitud suvaliselt, esitatud lihtsalt näitliku materjalina ega vasta ühelegi reaalsele teekonstruktsioonile. Tõenäoliselt antud konstruktsioon valitud koormusele reaalses elus vastu ei pea ja konstruktsioon peaks olema tugevam, kuigi nihkepingete kontroll vastas nõuetele. Märkida tuleb veel valitud kontaktpinna suurust, mis on 39cm (bussi rehvi arvutusdiameeter vastavalt elastsete teekatendite projekteerimise juhendile) ja erisurvet tee pinnale, mis on valitud 0,8Mpa (selgitatud esimeses paekiviliiva aruandes).

Kontrolli mõttes on esitatud nihkepingete kahe ametlikult aksepteeritud valemiga. Joonisel 8 esitatud valem „Vastavalt juhendile“ on: [4]

$$T_1 = p * 0{,}00459 * Z * 10^{-0{,}0132*F}\text{, Mpa}$$

Valemid Z arvutamiseks
Kui $0{,}1 \le \sum h_1 / d \le 1{,}0$ siis $Z = 1 / [a + b * (E_1/E_2)]$
$a = 0{,}01041 + 0{,}05461 * (\sum h_1 / d) - 0{,}2029 * (\sum h_1 / d)^2 - 0{,}25405 * (\sum h_1 / d)^3 - 0{,}092 * (\sum h_1/d^4)$
$b = 10^{-4} [\, 4{,}7102 - 47{,}39 * (\sum h_1 /d) + 230{,}25 * (\sum h_1/d)^2 - 221{,}29 * (\sum h_1/d)^3 + 75{,}73 * (\sum h_1/d)^4 \,]$
Kui $1{,}0 \le \sum h_1 / d \le 4{,}0$ siis $Z = a' * (E_1/E_2)^{b'}$
$a' = 275{,}48 - 334{,}12 * (\sum h_1/d) + 162{,}32 * (\sum h_1/d)^2 - 35{,}4 * (\sum h_1/d)^3 + 2{,}87 * (\sum h_1/d)^4$
$b' = -0{,}461 - 0{,}568 * (\sum h_1/d) + 0{,}507 * (\sum h_1/d)^2 - 0{,}17 * (\sum h_1/d)^3 + 0{,}019 * (\sum h_1/d)^4$

Joonis 8. Nihkepingete arvutusvalemid vastavalt elastsete teekatendite projekterimise juhendile.

Ja valem „Vastavalt M. Koppel“ on:

$$T_1 = \frac{p * 0{,}3372}{\left[\frac{E_1}{E_2} * \left(\frac{\sum h}{d}\right)^{2{,}4} + \frac{E_2}{E_1}\right]^{0{,}6639} * e^{0{,}0332F}}$$

Nihkepingete leidmine vastavalt elastsete teekatendite proj. juhendile:												
	h	E2	F	c								
TAB	5	1200										
PAB	10	800										
Killustik	25	280										
keskliiv	25,00	120	40	0,006								
paekiviliiv		80	32	0,025								
Vastavalt juhendile:								**Vastavalt M. Koppel:**				
d =	39,00	cm										
Q=	1000,00	telge/ööp			∑h1/d=	1,7		E1=	738,46			
p=	0,80	Mpa						E2=	80			
E1=	738,46				a`=	27,8		E1/E2	9,230769			
T1=	0,00930	Mpa	9,3	kPa	b` =	-0,6		E2/E1	0,108333			
T2=	-0,00299	MPa			Z =	6,7		∑h1/d	1,7			
T3=	0,006308							T1=	0,009425	Mpa	9,4	kPa
T0=	0,03515							T3=	0,006435			
k1=	0,6											
k2=	0,781											
k3=	3	arvestades, et materjal puruneb										
ktt=	1											

Tabel 4. Nihkepingete arvutustulemid.

Arvutustest nähtub, et tegelikud teekonstruktsioonis esinevad koormused on märgatavalt väiksemad kui sai avaldatud paekiviliivale laboratoorsetel katsetel. Laboris vähendades nihkepinget poole võrra (50...25kPa) vähenes nihkedeformatsioon märgatavalt ning peenosiste sisaldus ka suurema koormuse juures ei suurenenud drastiliselt, pigem näitas vaibumise märke. See annab arvata, et arvutustes esitatud koormuste juures peab paekiviliiv vastu ka pikaajaliselt kaotamata oma omadustes.

4. SOOVITUSED PAEKIVILIIVA KASUTAMISELE

Tehnikakõrgkooli töögrupp ei nõustu hetkel kehtiva arusaamaga, et paekiviliiva ei tohi kasutada kõrgemal teekonstruktsioonis kui 1,25m mõõdetuna teekatte pinnalt. Katendiarvutus ongi selleks, et tagada mingi aluse peale ehitatava teekonstruktsiooni paksus ja jäikus sellisena, et see jagaks liiklusest tuleneva koormuse nii, et aluses olevad materjalid suudavad seda taluda. Rõhutame veel siinkohal, et Tehnikakõrgkooli töögrupp ei soovita kasutada paekiviliiva teekatendis, vaid muldes, arvutatud teekatendi all. Tehtud laboratoorsed katsetused oluliselt suuremate koormuste juures, kui need tegelikult on, näitasid paekiviliiva suhteliselt head vastupanuvõimet.

Laboratoorsed katsetused näitasid paekiviliiva veekartlikkust. Üheks võimaluseks, kuidas vältida liigse vee sattumist teekonstruktsiooni on dreenkiht, mis ehitatakse igale teele ja mille paksus arvutatakse (vähemalt teoorias tuleks) vastavalt sademete ehk vee hulgale, mis võib sinna sattuda. Dreenkihi pikaajaliseks tõrgeteta tööks tuleks asetada separeeriv geotekstiil dreenkihi alla. Seda ei tuleks teha vaid paekiviliiva sisaldavate konstruktsioonide korral, vaid iga ehituse puhul. Dreenkiht peab töötama kogu teekatendi projekteeritud eluea jooksul ning see ei tohi „saastuda“ muudest pinnastest. Näiteks kasutades muldes savikaid kruusasid, mille filtratsioonimoodul on >0,5m/ööp või tolmliivasid, võivad savikad ja tolmsed osised sattuda dreenkihti ja halvendada selle ja kogu teekatendi toimivust.

Teiseks allikaks, kuidas vesi satub teekonstruktsiooni, on kapillaartõus. Kasutades mullete ehituseks tolmseid või savikaid pinnaseid, võib kapillaartõus ulatuda nendes kuni 10m (vastavalt Ehituskonstruktori käsiraamatule). Vee üheks omaduseks on liikumine soojemast keskkonnast külmema poole. Kui teekonstruktsioonis on niiskust (seda on, kuna õhkkuivalt pinnased teekonstruktsioonis ei püsi), siis talvelt tekivad sinna jääkristallid. Kui kapillaartõus mulde pinnastes on suur, siis põhjavesi võib olla külmunud piirkonnast väga sügaval, aga vesi jõuab ikkagi sealt ülespoole, jäätub, paisub ja lõpuks paisutab kogu konstruktsiooni lõhki tekitades külmakerkekahjustused tee pinnale. Seevastu paekiviliiv on

liiv, mille maksimaalne kapillaartõus on kuni üks meeter, isegi kui ta on näiteks tihendamise käigus juba peenenenud. Lisades esitatud laboratoorsete uuringute tabelid materjali terastikulise koostise kohta näitavad, et paekiviliiva pooride efektiivläbimõõt (nt teimiprotokoll 09X-10, tabel 1A „Lõimis“ näitab, et d_{10} jääb vahemikku 0,14-0,17) mahub samale reale liivaga ja maksimaalne kapillaartõus jääb väiksele tasemele (antud konkreetsel juhtumil, vastavalt Ehituskonstruktori käsiraamatule [3], jääb see 0,5m tasemele).

Savikad või tolmsed pinnased, mille filtratsioonimoodul on juba karjäärist kaevandades märgatavalt väiksem, kui paekiviliival, on kapillaartõusu suhtes oluliselt tundlikumad. Tulenevalt suurest filtratsioonimooduli erinevusest dreenitakse sellisest muldest vett oluliselt aeglasemalt välja kui paekiviliivast. Laboratoorsed katsed näitasid, et paekiviliivas peenosiste suurenemine oli väike ja lisas 5 toodud katseprotokollid näitavad, et isegi 9% peenosiste sisalduse juures oli paekiviliival filtratsioonimoodul enam kui piisav (1,3m/ööp).

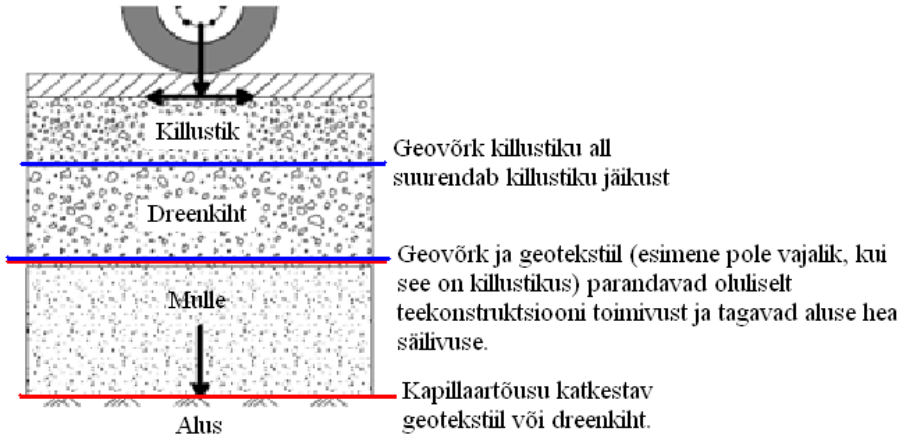
Vaadates antud küsimust ka keskkonnaalalise pilguga ei ole mõtet kevandada mulletesse kruusa, mis võib jääda oma filtreerivatelt omadustelt oluliselt alla jääkmaterjalina seisvast paekiviliivast. Lõppude lõpuks valitakse mulletesse sobivad materjalid põhiliselt vaid filtreerivate omaduse alusel. Karjääride laiendamine ja uute rajamine on juba tekitanud mitmetes kohtades poleemikat, alates veerežiimi probleemidest ja lõpetades esteetilise poolega, kuna tühjast karjäärist jääb järele vaid inetu laik keset metsa või põldu.

Eesti teedel üheks suureks probleemiks on kapillaartõus ja seoses põhjavee kõrge tasemega võib probleem jätkuda ka edaspidi, hoolimata muldes kasutatavatest materjalidest. Arvestades seda, soovitab Tehnikakõrgkooli töögrupp kasutada kapillaartõusu katkestavat kihti mulde all. Antud lahendus tagaks mulde ja seeläbi ka kogu teekonstruktsiooni parema püsivuse. Üheks võimaluseks oleks ehitada mulde alla geotekstiiliga ümbritsetud dreenkiht filtrtatsioonimooduliga üle 2m/ööp, mille paksus arvutatakse vastavalt kohalikele hüdrogeoloogilistele oludele ja pinnastele. Teine võimalus on kasutada paksemat geotekstiili, mille peafunktsioon oleks drenaaž, st ta oleks suuteline juhtima enda tasapinnas vett olles

seejuures piisavalt jäik, et konstruktsiooni paksus ei suruks seda kokku. Õige valiku tegemiseks tuleb siinkohal konsulteerida geotekstiile tootva ettevõttega.

Kapillaartõusu katkestavad kihid muudavad küll tee-ehitust kallimaks, kuid suurendavad mulde püsivust takistades sinna lisavee sattumist; nii on võimalik võita pikemaajalistes hooldekuludes. Sama lugu on katendis oleva dreenkihiga – kindlustades selle toimivust, tuleks aluse ja selle vahele paigutada eraldav geotekstiil, mis takistaks hästi dreeniva materjali segunemist muldes oleva ükskõik millise tolmse osisega, mis võiks kahjustada dreenkihi filtratsioonimoodulit. Kuna vesi (sisuliselt ilmastik, kuna vesi jäätub tekitades külmakerkeid) on Eestis üks suurimaid teede vaenlasi, siis me ei saa lubada katendi omaduste sellist vähenemist, mis takistaks sealt vee äravoolu. Geotekstiil dreenkihi all aitab takistada liigse vee kogunemist muldesse ja takistades seal olevate materjalide omaduste halvenemist, olgu need siis kas paekiviliiv või savikad/tolmsed kruusad/liivad.

Esimeses paekiviliiva aruandes oli teooria ja soovitus kasutada geovõrku kas killustikus (andes killustiku kihile suurema jäikuse parandades pingeolukorda selle all) või koos geotekstiiliga dreenkihi all, mulde peal (geovõrk maandab veelgi alusesse jõudvaid pingeid ja geotekstiil takistab dreenkihil saastumast tolmsete osakestega tagades selle laitmatu toimivuse pikemaks ajaks, samuti aitab see dreenida vett efektiivsemalt). Joonis 9 näitab võimalikke geosünteetide sh geotekstiilide paigutamise kohti.



Joonis 9. Geosünteete sisaldava teekonstruktsiooni näidis.

5. EDASISED UURINGUD

Uuringuid samas vallas tuleks veel jätkata, eriti, mis puudutab paekiviliiva osakeste purunemist ja tema filtreerivate omaduste säilimist. Hetkesed laboratoorsed uuringud ja järeldused ei näita, et peakiviliiva ei tohiks mingil juhul kasutada kõrgemal kui 1,25m mõõdetuna teekonstruktsiooni pinnalt. Edasiste uuringutega oleks võimalik edasi minna samas suunas mis praegu, mõõtes ja otsides tasapinnalises nihkeaparaadis piiri, mil mingisuguseid nihkeid enam ei toimu ja peenosiste sisaldus ei kasva. Teine võimalus, mis annaks märgatavalt täpsemaid ja mitte vaidlustamisele kuuluvaid tulemeid, on esimeses paekiviliiva aruandes kirjeldatud katseseade reaalse liikluskoormuse imiteerimiseks.

Lõplike elementide meetodi põhiselt on välja töötatud erinevaid arvutiprogramme (ABAQUS™, ANSYS™, GT-PAVE jm), millesse tuleb sisestada erinevate teekonstruktsioonides kasutatavate materjalide parameetrid, koormuse liigid jm. andmed. Sisestades õiged parameetris on võimalik modelleerida arvutites pingeolukordi teekonstruktsioonis ja muid muutujaid, nt määrata tee ja seal olevate materjalide vastupidavust ajas (joonis 10). [7]

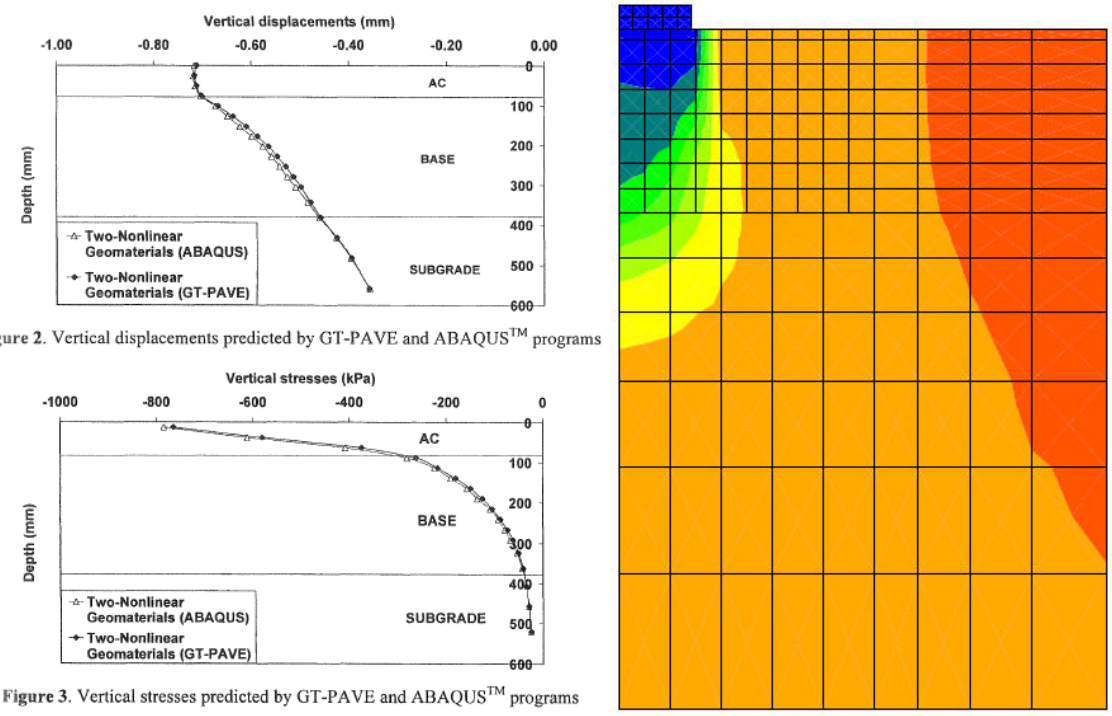
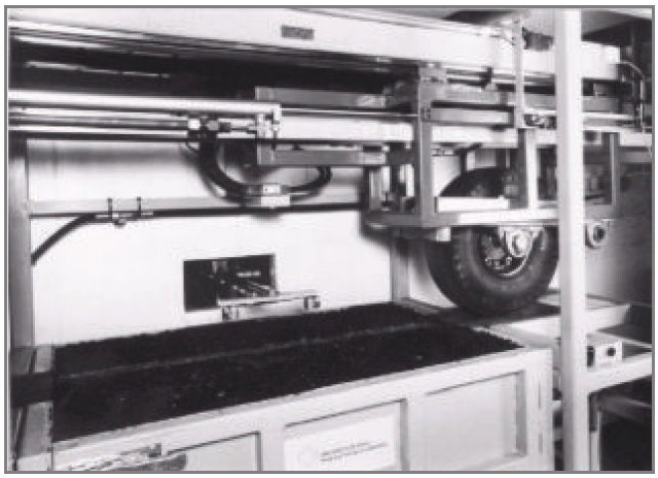


Figure 2. Vertical displacements predicted by GT-PAVE and ABAQUS™ programs

Figure 3. Vertical stresses predicted by GT-PAVE and ABAQUS™ programs

Joonis 10. Näide modelleerimise tulemitest (leitud on nihked ja pinged). [7]

Senised modelleerimise tarkvarad ja metoodikad on koostatud kasutamaks suhteliselt pakse seotud kihte (üle 200mm), seega ei saa neid otse üle võtta teistest riikidest, Eestis midagi sellist pole tehtud, kuigi üritatakse teistel viisidel (nt FWD mõõtmised) määrata tee seisundit ja ennustada selle eluiga ning remondi vajadust. Viimase puudus on see, et teekonstruktsioon peab olema valmis ja mõõta saab alles selle pealt. Lõplike elementide meetodiga tuleks meil määrata laboratoorselt tulevase tee ehitamiseks kasutatavate materjalide ja aluspinnase omadused, määrata liikluskoormus. Kuna otse antud meetodit üle võtta ei saa, siis oleks võimalik kasutada mainitud kasti koormamaks reaalset teekonstruktsiooni, mõõtes sealt pingeid ja võrreldes saadud andmeid modelleerimise tulemitega – nii oleks võimalik arvutiprogtammi kontrollida ja kalibreerida. Kalibreerimiseks oleks vaja teha mitmeid katsetusi ja kontrolli mõttes saaks paigutada kastile koormuseks lisaks hüdrosilindrile ka veerev ratas veelgi täpsemaks koormuse imiteerimiseks (joonis 10). Mainimist väärib veel see, et maailmas on sellised meetodid andnud väga täpseid tulemeid ennustamaks teekonstruktsiooni toimivust.



Joonis 10. Oulu ülikoolis olnud katseseade, kus kasti peale oli paigaldatud ratas.

Koostöös laboratoorselt materjalide katsetamise, modelleerimise, „kasti katsetuse“ ja ka FWD mõõtmistega juba olemasolevatelt teedelt oleks võimalik välja töötada arvutoprogramm (täpsemalt kalibreerida olemasolevaid, kuna uue väljatöötamine on liialt keerukas), millega ennustada pingeolukordi teekonstruktsioonis, materjalide vastupidavust ja parimal juhul ka võrrelda erinevate teekonstruktsioonilahenduste majanduslikku tasuvust pikaajalisel perioodil. Enne modelleerimist ja teoreetilist teekonstruktsiooni süvaanalüüsi oleks siiski vaja alustada teste „kastiga“, kuna sellel tasemel arvutimodelleerimine on väga keerukas.

Tallinna Tehnikakõrgkool on valmis jätkama juba käivaid uuringuid ja astuma sammu edasi eelpool mainitud uuringutega.

KOKKUVÕTE

Pestud paekiviliiv (0/2-0/4), Sertifikaat nr. 1504-CPD-021/05.

- Dünaamilise koormuse, erisurvega pinnale 0,6Mpa ja kontaktpinna suurusega d=39cm, all paekiviliivas peenosiste osakaal mingil määral suureneb, kuid vaibub. Tõenäoliselt enamus peenosiste suurenemisest toimub juba materjali tihendamise käigus, kuid mitte sellisel määral, mis kahandaks paekiviliiva filtratsioonimooduli alla nõutava 0,5m/ööp taseme;
- Maksimaalne kapillaartõus vastavalt paekiviliiva efektiivdiameetrile ja Ehituskonstruktori käsiraamatule on umbes 50cm;
- Konstruktsiooni vajum stabiliseerub samuti dünaamilise koormuse all, kuid sarnane järeltihenemine esineb kõikides muldes kasutatavates tee-ehitusmaterjalides;
- Niiskuse (veesisalduse) suurenedes paekiviliiva nihketugevus väheneb umbes 50%, mistõttu on tähtis takistada liigniiskuse sattumist paekiviliivast muldesse. Nagu selgitatud peatükkides 1 ja 4, tuleks liigse vee sattumist muldesse takistada ka kasutades muid materjale; selleks on kaks viisi – ehitades kapillaartõusu takistava kihi mulde alla ja kvaliteetse dreenkihi mulde peale; mõlemad peavad olema eraldatud separeeriva geotekstiiliga takistamaks erinevate materjalide segunemise, mulde alla ehitatava kihi võib asendada ka vaid vastavalt oludele valitud geotekstiiliga;
- Täites eelmist nõuet, leiab töögrupp, et paekiviliiva võiks kasutada teekonstruktsioonis katendi all olenevalt liikluskoormusest alates 0,7-0,8m sügavuselt mõõdetuna teekatte pinnalt.
- Antud uuring ei leidnud paekiviliiva omaduste parandamist segades seda kvartsliivaga; lõplike järelduste tegemiseks oli katseid liiga vähe, kuid töögrupp ei pidanud vajalikuks lisauuringuid teostada;
- Pestud paekiviliiva füüsikalised omadused:
  - Elastsusmoodul 80Mpa;
  - Sisehõõrdenurk $\varphi = 36°$;
  - Nidusus c = 25kPa;
  - Optimaalne niiskus 8-10%. Paekiviliiva omadused halvenevad niiskuse tõustes;
  - Kapillaartõus 0,5m;

  - Peenosiste sisaldus puisteolekus keskmiselt 2%, mis võib pärast tihendamist kasvada (kuni 9%ni), kuid mis ei mõjuta filtratsioonimooduli langemist alla nõutava 0,5m/ööp taseme.
- Vajalikud edasised sammud:
  - Teoreetiliselt, arvutuslikult ja laboratoorselt võttes paekiviliiv sobib kasutamaks teatud tingimustega teekatendite alla muldesse, täpsemate tulemuste saamiseks oleks vaja samade katsetustega jätkata. Parimate tulemite saamiseks tuleks antud uurimisteemaga jätkata tehes koormuskatseid reaalses teekonstruktsioonis reaalsete koormuste mõju all.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Belt, J. Kolisoja, P. Alatyppö, V. Valtonen, J. Tierakenteen Rappeutuminen ja Kunnon Ennustaminen. Oulu 2006;
2. Belt, J. Lämsä, V-P. Savolainen, M. Erhola, E. Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinto, Helsinki 2002.
3. Ehituskonstruktori käsiraamat;
4. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend 2001-52. Tallinn 2001
5. IPT Projektijuhtimise OÜ. „Pestud paesõelmete (paeliiva) tihendamisest. Uurimistöö aruanne. Tallinn 2009;
6. IPT Projektijuhtimise OÜ. Pestud paesõelmete (paeliiva) sisehõõrdenurk ja hõõrdetegur. Uurimistöö aruanne. Tallinn 2009;
7. Pavement Mechanics and Performance. Geotechnival Special Publication no 154. Reston, Virginia USA 2006;
8. Pestud paekiviliiva kasutamine Tallinna teede ja tänavate ehitamisel. I etapp. Tallinn 2010.
9. Ramboll Eesti AS aruanne 2009-4, märts 2009. Pestud paeliiva katsetööd. Lõpparuanne. Tallinn 2009;
10. RIL 157-I Geomekaniikka I. Helsinki 1985;
11. Soonurm, E. Pinnasemehaanika Diagramme III. Tallinn 1974;

LISAD

Lisa 1 – pestud paekiviliiva (0/4) sertifikaat nr. 1504-CPD-021/05;

Lisa 2 – OÜ C.B.A Männiku karjääri kvartsliiva sertifikaat;

Lisa 3 – esimese laborikatse tulemused – paekiviliiva segud kvartsliivaga 1/3 ja 1/2; pestud paekiviliiva tsükliline nihkekatse õhkkuivalt ja niiskelt (w=8%) jõudude σ=90kPa ja τ=50kPa juures;

Lisa 4 – teise laborikatse tulemused – puhta paekiviliiva tsükliline nihkekatse 500 tsükliga ja kvartsliiva nihkekatse jõudude jõudude σ=90kPa ja τ=50kPa juures; paekiviliiva tsükliline nihkekatse jõudude jõudude σ=50kPa ja τ=25kPa juures;

Lisa 5 – paekiviliiva laborikatsetuste väljavõtted AS Ramboll Eesti paekiviliiva uuringu aruandest.