



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

KUSTUTATUD LUBJA LISAMINE ASFALTBETOONSEGUDELE

ADDING HYDRATED LIME TO HOT MIX ASPHALT

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:

Karli Ots

Üliõpilaskood:

183328 EAXM

Juhendaja:

Kristjan Lill

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"21" detsember 2020

Autor: Karli Ots

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"21" detsember 2020

Juhendaja: Kristjan Lill

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Karli Ots (sünnikuupäev: 05.11.1988)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
KUSTUTATUD LUBJA LISAMINE ASFALTBETOONSEGUDELE,

mille juhendaja on Kristjan Lill.

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

Karli Ots (*allkiri*)

21.12.2020 (*kuupäev*)

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Karli Ots, 183328EAXM
Õppekava, peeriala: EAXM15/15 – Hooned ja rajatised, teedehitus
Juhendaja(d): Kristjan Lill

Lõputöö teema:

KUSTUTATUD LUBJA LISAMINE ASFALTBETONSEGUDELE

Adding hydrated lime to hot mix asphalt

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Materjalide katsetamine laboris
2. Tulemuste võrdlus ja analüüs

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katseplaani koostamine	10.03.2020
2.	Laboratoorsete katsete sooritamine	17.03.2020
3.	Teoreetilise osa kirjutamine	07.09.2020
4.	Katsetulemuste analüüsi kirjutamine	18.12.2020
5.	Lõputöö ülevaatus	18.12.2020
6.	Kokkuvõtte kirjutamine eesti keeles ja inglise keeles	21.12.2020

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "21" 12.2020 a

Üliõpilane: Karli Ots "21" 12.2020 a

/allkiri/

Juhendaja: Kristjan Lill "21" 12.2020 a

/allkiri/

SISUKORD

SISUKORD.....	5
EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1 TEOREETILISED ALUSED	10
1.1 Filleri mõiste	10
1.2 Filleri kasutamine asfaltsegudes	10
1.3 Filleri nõuded Eestis	10
1.3.1 Geomeetrilised nõuded	11
1.3.2 Füüsikalised nõuded	11
1.3.3 Keemilised nõuded	11
1.3.4 Nõuded filleri ühtlusele	11
1.3.5 Filleri minimaalsed katsesagedused	12
1.4 Kuidas Euroopas fillereid määratletakse.....	12
1.4.1 Füüsikalised nõuded	13
1.4.2 Keemilised nõuded	13
1.4.3 Nõuded filleri ühtsusele.....	14
1.4.4 Filleri omaduste katsetamine	15
1.5 Milliseid fillereid üle maailma kasutatakse	15
1.5.1 Tardkivi tolmu	16
1.5.2 Kustutatud lubi (Hydrated lime)	17
1.5.3 Kustutatud lubja lisamine kuumale asfaldisegule	19
1.5.4 Lubja kasutamine asfaltkatendi ringlussevõtuks	21
1.5.5 Kustutatud lubja kvantifitseerimismeetod asfaldisegudes	21
1.5.6 Kustutatud lubja kasutamine asfaldisegude valmistamisel, Euroopa juhtumiuuringud	26
2 KATSEMETOODIKA.....	33
2.1 Delta ring- ja kuulikatsed.....	33
2.2 Pehmenemistäpi määramine	35
3 KATSE TULEMUSED JA ANALÜÜS	38
3.1 Terakoostise määramine õhujoas.....	38
3.2 Karbonaatide sisalduse määramine	39
3.3 Peenosiste hindamine, metüleensinise katsetamine.....	41
3.4 Osakeste tiheduse määramine.....	42
3.5 Poorsuse määramine.....	43
3.6 Eripinna määramine	43

3.7 Delta ring- ja kuulkatse tulemused.....	45
3.8 Pehmenemistäpi tulemused.....	59
KOKKUVÕTE	62
SUMMARY.....	64
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	66

EESSÕNA

Käesolev magistritöö on koostatud Teede Tehnokeskus AS katselaboratooriumis läbi viidud erinevate fillerite ja bituumenite uuringute põhjal.

Autor soovib tänada isikuid:

Teede Tehnokeskuse AS labori juhatajat Henri Pranki ning laboratooriumi töötajaid, kes aitasid antud magistritöö katsetusi teha.

Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumi kvaliteedijuhti Kristjan Lille, kes oli ka käesoleva töö juhendajaks ning oli nõus andma mulle selle võimaluse.

Suur tänu uuringu läbiviimisel kasutatud materjalide tootjatele, kelle nimesid ärisaladuste kaitseks välja ei saa tuua.

Võtmesõnad: Teedehitus, filler, kustutatud lubi, delta kuul- ja rõngakatse, bituumen, asfalt, magistritöö.

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on teed inimeste elu üks oluline osa, mida võetakse vägagi endast mõistetavalt. Vajame teid selleks, et minna tööle, kooli, kinno, poodi oste tegema või muidu vaba aega veetma. Inimeste jaoks vajalike kaupade ja teenuste transport kulgeb suures osas või täielikult mööda teid. Samuti kasutavad teid hädajuhtudel tuletõrje, kiirabi ja politsei.

Maanteeameti 2019. aasta seisuga on Eestis kattega teid kokku ca 16 609 km. Kattega tee all mõeldakse teid nagu asfalt- ja tsementbetoon, mustkate, tuhkbetoon ja stabiliseeritud kate, pinnatud kruus, kivikate ja kruusa- ja pinnasteed. Kattega teedest on asfaltbetoonkatte kogupikkuseks ca 5025 km. Kui arvestada kõik asfaltbetoonsegu liigid kokku, toodeti asfaltsegu 1 627 448 tonni, mis on igal aastal püsinud tõusutrendis.

Asfalt on domineeriv materjal, mida kasutatakse teedeehitusel katendite loomisel sidusate kihtide ehitamiseks. Asfalt on teedeehitusmaterjal, mida valitakse tänu asjaolule, et see on sõitmiseks ohutu, mugav, kiiresti paigaldatav ning paindlik konstrueerimisel, millega kaasneb arvestatav vastupidavus. Tehnika pideva arengu, ettevõtete kogemuste suurenemisega on asfaltbetoonkatete ehitamise kvaliteet aastast aastaga paranenud. Aga endiselt esineb asfaltbetoonkatte teedel defekte, nendeks võivad olla võrkpraod, pikipraod, roopad, murenemine, ilmastikust tingitud probleemid või vananemine.

EVS 901-1:2020 kohaselt tuleb asfaltsegudes kasutada üldjuhul lubjakivifillerit. Erandjuhtudel on lubatud lubjakivifilleri asemel või sellele lisaks kasutada ka tsementi ja/või kustutatud lupja. Aga kõik nõuded, mis tehtud ja hetkel kehtivad on lubjakivifilleri kohta. Kui asendada lubjakivifiller erandjuhul mingi muu filleriga, peavad materjali nõuded vastama lubjakivifillerile mõeldud nõuetele. Kuigi Eestis enim kasutatav filler on lubjakivi, on katsetatud erinevaid teisi mineraalseid pulbreid ning katsetusteks on need ka jäänud. Arvestades, et tänapäeval on kasutusel kaasaegsed tehnikad asfaltsegu tootmiseks ja paigaldamiseks ning ka oluliselt on muutunud asfaltsegudes kasutatavad komponendid, võiksime võtta õppust riikidest, kellel puudub lubjakivifilleri kasutamise kohustus. Võttes sealjuures arvesse, et tänapäeval on välja töötatud kaasaegsed katselaboratooriumid, mis imiteerivad raskeliikluse mõju asfaltbetoonkattele ja kus oleks võimalik läbi viia uuringud, mis oleksid usaldusväärsed ning ühtiks reaalsusega.

Käesoleva lõputöö teema arenes välja küsimusest, et kas on ka alternatiive lubjakivifillerile.

Töös uurime, milliseid tulemusi annab kustutatud lubi, mida kasutatakse muudes Euroopa riikides ning ka USA-s. Võrdleme kustutatud lupja teiste mineraalsete materjalidega. Kustutatud lupja pole Eestis varem väga uuritud ning tema omadusi teame teiste riikide näitel. Kas see palju lubav filler, mida teistes riikides kasutatakse võiks meie asfaltbetoonkatete probleemid lahendada?!

Autor on lõputöö jaotanud kolmeks peatükiks: esimeses peatükis antakse ülevaade, millised olulisemad nõuded on filleril. Milliseid fillereid on veel üle maailma katsetatud ning täpsemalt, mis materjal on kustutatud lubi. Miks ta eristub teistest mineraalsetest materjalidest ning erinevatest meetoditest. Teises peatükis kirjeldatakse kahe erineva katse teostamist. Kolmandas peatükis kirjeldatakse ja analüüsitakse katselaboratooriumi tulemusi, kus on välja toodud erinevate fillerite tulemused ühe või teise katsemeetodi kaudu.

1 TEOREETILISED ALUSED

1.1 Filleri mõiste

Filler on eraldi toodetud, määratud terakoostise ja kindlate füüsikaliste- keemiliste omadustega mineraalne pulber, mille peamine omadus on asfaltsegude parandamine. Mille teradest vähemalt 70% läbib peenima laboratoorse sõela avaga 0,063 mm.

1.2 Filleri kasutamine asfaltsegudes

Asfaltsegude projekteerimise eesmärgiks on toota asfaltsegusid, mis vastaksid konkreetsetes geograafilises piirkonnas paigalduskriteeriumitele ja katendile seatud nõuetele. Projekteeritud segu peab vastu pidama liikluskoormustele ja keskkonnatingimustele. Seda peab olema lihtne paigaldada ja tee kasutamise käigus peab see tagama tasase ning turvalise katte. Segu projekteerimine on optimeerimisülesanne, mis on katsumuseks külmades piirkondades, kus teekatend peab oma tööea vältel taluma suuri temperatuurirežiime.

Mineraalne täiteaine on asfaltsegu oluline koostisosa, kuna sellel on oluline roll asfaldi sideaine jäigastumisel. Mineraalne täiteaine aktiivse täiteainena parandab bituumeni nakkuvust, suurendab segu jäikust ja kiirendab tihendatud segu kõvenemist. Mineraalse täiteaine ülesandeks on ka täitematerjali tühimike täitmine, et luua omavahel rohkem kontaktpunkte ning tagada tihedam segu.

1.3 Filleri nõuded Eestis

Asfaltsegudes kasutatakse üldjuhul lubjakivifillerit. Erandjuhtudel on lubatud lubjakivifilleri asemel või lisaks sellele kasutada ka tsement ja/või kustutatud lupja. [1]

1.3.1 Geomeetrilised nõuded

Terastikuline koostis peab vastama tabelis 1.1 toodud nõuetele.

Tabel 1.1 Filleri terastikulise koostise nõuded [1]

Sõela ava, mm	Läbind, massiprotsentides	
	Üksiktulemuste üldvahemik	Tootja deklareeritav terastikulise koostise maksimaalne vahemik ^a
2	100	-
0,125	85 kuni 100	10
0,063	70 kuni 100	10

^a Tootja poolt vähemalt 20 tulemuse alusel deklareeritud terastikulise koostise vahemik 90% tulemustest peab jääma sellesse vahemikku, kusjuures kõik tulemused peavad jääma terastikulise koostise üldvahemikku.

1.3.2 Füüsikalised nõuded

Veesisaldus. Standardi EVS-EN 1097-5 kohaselt määratud lubjakivifilleri veesisaldus ei tohi olla üle 1 massiprotsendi. [1]

Osakeste tihedus. Lubjakivifilleri osakeste näivtihedus tuleb määrata standardi EVS-EN 1097-7 kohaselt ja deklareerida. Tootja deklareeritud vahemik ei tohi ületada 0,2 Mg/m³. [1]

Poorsus. Kuivalt tihendatud lubjakivifilleri poorsus tuleb määrata standardi EVS-EN 1097-4 kohaselt. Tootja peab poorsuse deklareerima täpsusega $\pm 2\%$ ja see peab olema vahemikus 28% kuni 38%. [1]

1.3.3 Keemilised nõuded

Lubjakivifilleri kaltsiumkarbonaadi CaCO₃ sisaldus peab olema $\geq 70\%$ (kategooria CC₇₀) ja selle arvutamiseks korrutatakse standardi EVS-EN 196-2 kohaselt määratud süsinikdioksiidi CO₂ sisaldus teguriga 2,2742. Tulemus deklareeritakse kategooriana. [1]

1.3.4 Nõuded filleri ühtlusele

Puistetihedus petrooleumis. Lubjakivifilleri puistetihedus petrooleumis tuleb määrata standardi EVS-EN 1097-3 lisa A kohaselt. Tootja deklareeritud vahemik peab jääma piiridesse 0,5 Mg/m³ kuni 0,9 Mg/m³. [1]

Eripind Blaine'i katsel. Lubjakivifilleri Blaine'i eripind tuleb määrata standardi EVS-EN 196-6 kohaselt. Tootja deklareeritud vahemik ei tohi ületada 140 m²/kg. [1]

Tsement ja kustutatud lubi. Asfaltsegudes kasutatav tsement peab vastama standardile EVS-EN 197-1 ja kustutatud lubi standardile EVS-EN 459-1. [1]

Radioaktiivne kiirgus. Tootja peab kontrollima lähtematerjali radioaktiivsust ja tulemuse deklareerima eriaktiivsuse indeksina. Eriaktiivsuse indeks ei tohi olla suurem kui 1. [2]

1.3.5 Filleri minimaalsed katsesagedused

Tabel 1.2 Filleri minimaalsed katsesagedused [2]

Katsetatav omadus	Katsemeetod	Minimaalne katsesagedus ^a
Terastikuline koostis	EVS-EN 933-10	1 kord nädalas
Kahjulikud peenosised	EVS-EN 933-9	2 korda aastas
Veesisaldus	EVS-EN 1097-5	2 korda nädalas
Osakeste tihedus	EVS-EN 1097-7	2 korda aastas
Kuiva tihendatud filleri poorsus	EVS-EN 1097-4	2 korda aastas
Kaltsiumkarbonaadi sisaldus	EVS-EN 196-2	1 kord aastas
Puustetihedus petrooleumis	EVS-EN 1097-7	1 kord nädalas
Eripind Blaine'i katsel	EVS-EN 196-6	1 kord aastas
Radioaktiivsus, eriaktiivsuse indeks		1 kord 5 aasta jooksul

1.4 Kuidas Euroopas fillereid määratletakse

Filleri kõikide omaduste katsetamise ja deklareerimise vajalikkus tuleb määrata lähtuvalt täitematerjali konkreetsest kasutusviisist, lõppkasutusest või päritolust. [3]

Terastikuline koostis tuleb määrata standardi EN 933-10 kohaselt. [3]

Tabel 1.3 Nõuded lisand-filleri terastikulisele koostisele [3]

Sõela ava mm	Läbind massiprotsentides	
	Üksiktulemuste üldvahemik	Tootja deklareeritud maksimaalne vahemik ^a
2	100	-
0,125	85...100	10
0,063	70...100	10

^a Tootja poolt vähemalt 20 tulemuse alusel deklareeritud terastikulise koostise vahemik. 90% tulemustest peab jääma sellesse vahemikku, kusjuures kõik tulemused peavad jääma terastikulise koostise üldvahemikku.

1.4.1 Füüsilised nõuded

Veesisaldus tuleb standardi EN 1097-5 kohaselt määrata, lisand-filleri veesisaldus ei tohi olla suurem kui 1 massiprotsent.

Osakeste tihedust tuleb määrata standardi EN 1097-7 kohaselt. [3]

Tabel 1.4 Kuivalt tihendatud filleri poorsuse kategooriad. [3]

Massiprotsentides		Kategooria V
Üksiktulemuste üldvahemik	Tootja deklareeritud maksimaalne vahemik ^a	
28...38	4	V28/38
38...45	4	V38/45
28...45	4	V28/45
44...55	4	V44/55
Nõue puudub	Nõue puudub	VNR

^a Tootja poolt vähemalt 20 tulemuse alusel deklareeritud kuiva tihendatud filleri poorsuse vahemik. 90% arvutatud tulemustest peab jääma sellesse vahemikku, kusjuures kõik tulemused peavad jääma terastikulise koostise üldvahemikku.

Asfaltsegude fillerite „delta kuul-rõnga“ katse. Nõudmise korral tuleb EN 13179-1 kohaselt määratud „delta kuul-rõnga“ väärtus deklareerida kui konkreetsele kasutusotstarbele vastav tabelis 1.5 määratletud asjakohane kategooria. [3]

Tabel 1.5 Fillerite „delta kuul-rõnga“ väärtuste kategooriad [3]

Kuul-rõnga väärtus °C	Kategooria ΔR&B
8...16	ΔR&B 8/16
17...25	ΔR&B 17/25
8...25	ΔR&B 8/16
>25	ΔR&B 8/16
Nõue puudub	ΔR&B NR

1.4.2 Keemilised nõuded

Vees lahustuvus. Nõudmise korral tuleb EN 1744-1:1998 jaotise 16 kohaselt määratud vees lahustuvus deklareerida kui konkreetsele kasutusviisile vastav tabelis 1.6 määratletud asjakohane kategooria. [3]

Tabel 1.6 Vees lahustuvuse maksimaalväärtuse kategooriad. [3]

Vees lahustuvus massiprotsentides	Kategooria WS
≤10	WS10
>10	WS deklareeritud
Nõue puudub	WSNR

Veetundlikkus. Nõudmise korral tuleb veetundlikkus määrata standardi EN1744-4:2001 kohaselt ja tulemus deklareerida. [3]

Lubjakivifilleri kaltsiumkarbonaadisisaldus. Nõudmise korral tuleb standardi EN 196-21 kohaselt määratud kaltsiumkarbonaadisisaldus deklareerida kui konkreetsele kasutusviisile vastav tabelis 1.7 määratletud asjakohane kategooria. [3]

Tabel 1.7 Kaltsiumkarbonaadisisalduse miinimumväärtuse kategooriad. [3]

Kaltsiumkarbonaadisisaldus massiportsentides	Kategooria
≥90	CC
≥80	CC90
≥70	CC80
	CC70
Nõue puudub	CCNR
Märkus. Standardi EN 196-21 kohaselt on katsetulemuseks süsinikdioksiidisisaldus. Kaltsiumkarbonaadisisalduse arvutamiseks tuleb süsinikdioksiidisisaldust korrutada teguriga 2,2742.	

1.4.3 Nõuded filleri ühtsusele

Filleri ühtlust tuleb hinnata, kasutades selleks vähemalt ühte järgnevatest omadustes. [3]

Lisand-filleri „bituumeniarv“. Nõudmise korral tuleb lisand-filleri „bituumeniarv“ kui jäikust mõjutava omaduse ühtlust iseloomustav näitaja määrata standardi EN 13179-2 kohaselt ja deklareerida kui konkreetsele kasutusviisile vastav tabelis 1.8 määratletud asjakohane kategooria. [3]

Tabel 1.8 Lisand-filleri „bituumeniarv“ esitatud nõuded. [3]

Üksiktulemuste üldvahemik %	Tootja deklareeritud „bituumeniarvu“ maksimaalne vahemik^a %	Kategooria <i>BN</i>
28...39	6	<i>BN28/39</i>
40...52	6	<i>BN40/52</i>
53...62	6	<i>BN53/62</i>
Deklareeritud	Deklareeritud	<i>BN deklareeritud</i>
Nõue puudub	Nõue puudub	<i>BNNR</i>
^a Vähemalt 20 tulemuse aluselt deklareeritud „bituumeniarvu“ vahemik. 90% arvutatud tulemustest peab jääma sellesse vahemikku, kusjuures kõik tulemused peavad jääma terastikulise koostise üldvahemikku.		

Blaine'i katse. Blaine'i eripind tuleb määrata standardi EN 196-6 kohaselt. Tootja poolt deklareeritud vahemik ei tohi ületada 140 m²/kg. [3]

Lisand-filleri osakeste tihedus tuleb määrata standardi EN 1097-7 kohaselt. Tootja poolt deklareeritud vahemik ei tohi ületada 0,2 Mg/m³. [3]

1.4.4 Filleri omaduste katsetamine

Tabel 1.9 Filleri omaduste katsetamise minimaalne sagedus. [3]

	Omadus	Märkused	Katsemeetod	Minimaalne katsesagedus
1	Terastikuline koostis		EN 933-10	1 kord nädalas
2	Kahjulikud peenosised		EN 933-9	2 korda aastas
3	Veesisaldus		EN 1097-5	2 korda nädalas
4	Osakeste tihedus		EN 1097-7	2 korda aastas
5	Jäikust mõjutavad omadused	Kuiva tihendatud filleri poorsus „Delta kuulrõngas“	EN 1097-4 EN 13179-1	2 korda aastas
6	Vees lahustuvus		EN 1744-1:1998	1 kord 2 aasta jooksul
7	Veetundlikkus		prEN 1744-4:2001	1 kord 2 aasta jooksul
8	Kaltsiumkarbonaadi-sisaldus		EN 196-21	1 kord aastas
9	Kaltsiumhüdrioksiidi-sisaldus		EN 459-2	1 kord aastas
10	Filleri ühtsus „bituumeniarv“ Kuumutuskadu Osakeste tihedus Puistetihedus Blaine'i katse		EN 13179-2 EN 1744-1:1998,17 EN 1097-7 EN 1097-3:1998, lisa B EN 196-6	1 kord nädalas

1.5 Milliseid fillereid üle maailma kasutatakse

Üle maailma on kasutatud palju erinevaid filleri materjale, millest osa kasutatakse ka tänapäeval:

- 100% lubjakivifiller
- 50% lubjakivifiller, 50% tardkivitolm
- 100% tardkivitolm
- Kustutatud lubi (*hydrated lime*)
- Lendtuhk (ümarad terad)
- Hüdrauliline tsement
- Kivimitolm (marmoritolm, tellisetolm)
- Šlakitolm
- Liivatolm [4]

1.5.1 Tardkivi tolmu

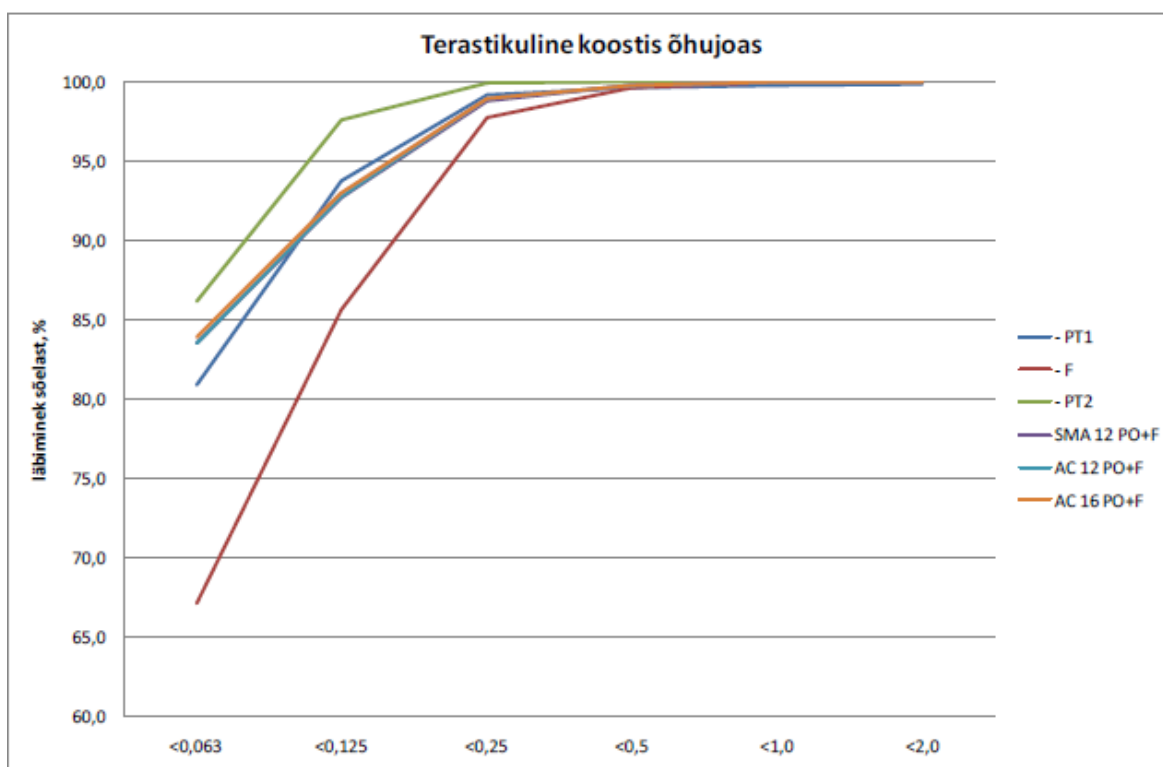
Tuginedes erinevates riikides teostatud uuringutele, on jõutud enamasti järelduseni, et kaasaegsete tolmutüüpide olemasolul võib asfaltis kasutatavast tardkivimist pärinevat tolmu kasutada edukalt ka asfaltsegu toomisel ning üldjuhul puudub vajadus kasutada täiendavaid lisandeid. [4]

Soome ASTO programmi raames viidi läbi nakkeuuringu, kus leiti, et tardkivitolmu asendamine asfaltsegudes lubjakivifilleriga vähendab asfaltsegu kulumiskindlust ja nii Tröger'i katsel kui ka Marshall'i tõmbetugevuse katsel ei erinenud peenosistega proovikehade tulemused üksteisest märkimisväärselt. [4]

Eestis viidi 2010 aastal läbi uuring, kus võrreldi omavahel fillerit ja erinevaid punkritolmusid. Uuringute käigus selgus, et lubjakivifiller ja erinevad punkritolmu ning tardkivitolmu erinevad üksteisest terastikulise koostise poolest (Joonis 1.1). [4]

Punkritolmu osas ei andnud aga pae ja graniitkillustiku tolmu areomeetrikatsel tulemust. See tähendab, et osakeste suurus jääb vahemikku 0,02-0,063 mm ega oma seetõttu eraldivõetuna eeldatavalt filleriga võrreldavat peensust. Tardkivitolmu seevastu näitas paralleelkatsetes arvestatavat ebaühtlust, kus fr 0,002 mm osakaal jäi vahemikku 3-16% ning fr 0,02 osakaal 72-90%. [4]

Joonis 1.1 Lubjakivifilleri, tardkivitolmu ja punkritolmu terastikulised koostised õhujaos. [4]



1.5.2 Kustutatud lubi (Hydrated lime)

Viimase 40 aasta jooksul on kustutatud lubi laialdaselt kasutust leidnud USA-s ning järjest rohkem kasutatakse seda enamikes Euroopa riikides, eriti Austrias, Hollandis, Suurbritannias ja Šveitsis. Kustutatud lubi vähendab teadaolevalt bituumeni keemilist vananemist. Lisaks jäigastab see mastiksist rohkem kui tavalinemineraalne täiteaine, mida täheldatakse ainult toatemperatuurist kõrgemal. See mõjutab asfaltsegu mehaanilisi omadusi ja kui kustutatud lubja lisamisega on muudetud veidi rohkem kui poole segureseptidest tugevust ja moodulit, parandab see umbes 75% segureseptide deformatsioonikindlust. Kõigil juhtudel on enamus uuringutest keskendunud 1-1,5% kustutatud lubja sisaldusele ja need mõjud avalduvad tavaliselt suurema kustutatud lubja sisalduse korral. Vähesed avaldatud uuringud näitavad väsimuskindluse kohta, et kustutatud lubi parandab asfaltsegude väsimuskindlust 77% juhtudel. Kustutatud lubjal ei ole madalamal temperatuuril suuremat jäigastavat mõju kui mineraalsel täiteainel, pole uuringutes avaldatud negatiivset mõju termilise pragunemise kindlusele. Arvestades, et lubja modifitseerimisega paranevad segu omadused mõjutavad asfaltsegude vastupidavust, on kustutatud lubja kasutamisel tugev mõju asfaltisegude vastupidavusele. Põhja-Ameerika ametkondade hinnangul suurendab kustutatud lubi asfaltisegude vastupidavust 2-10 aasta võrra, see tähendab 20-50%. Euroopa kogemused pole veel nii kaugemale arenenud kui USA, kuid kustutatud lubja kasulikest mõjudest asfaltisegu vastupidavusele on suurel määral teada antud. [5]

Kustutatud lubja kasutamise põhjused olevat enamusele Euroopa asfaldi valmistajatele suures osas teadmata ja kõigist selle eelistest teavad ainult eksperdid, kelle on sellega otsene kogemus. Kustutatud lubja kasutamist võib vaadelda kui uut vahendit asfaldi omaduste kohandamiseks lisaks tavapärasemate täitematerjalide ja sideainete kasutamisele. Järelikult on mõnevõrra üllatav, et küsimus, kuidas kustutatud lubja asfaltisegudes kvantifitseerida, on alles viimastel aastatel huvi äratanud. [5]

Asfaldi multifunktsionaalne modifikaator. Nagu arvukad osariikide maanteeasutused on leidnud, annavad muudatused, mis on tehtud asfaltbetoonsegus kustutatud lubjaga katenditele lisa-aastaid. Modifikatsioonid võivad vähendada irdumist, roobaste tekke, mõranemist ja vananemist. Kustutatud lubi parandab oluliselt neid omadusi, kui kasutada eraldi ja see toimib hästi ka koos polümeersete lisaainetega, aidates luua katendisüsteeme, mis vastavad kõrgeimatele ootustele paljudeks aastateks. [6]

Irdumisvastane aine. Irdumine toimub siis, kui niiskuse olemasolu tõttu side bituumeni ja täitematerjali vahel laguneb ning sideaine eraldub täitematerjalist.

Teatavat tüüpi täitematerjalid on eriti irdumisaltid. Kliimaatilised omadused nagu kuumus, tugev vihmasedu, külmumis ja sulamistsüklid, samuti liiklus mängivad irdumisel peamist rolli. Kustutatud lubi on kõige tõhusam irdumisvastane aine, mille on suurte irdumisprobleemidega riigid laialdaselt tuvastanud. [6]

Kui lubi lisatakse kuumale segule, reageerib see täitematerjalidega, tugevdades bituumeni ja kivi vahelist sidet. Samal ajal, kui see töötleb täitematerjali, reageerib lubi ka bituumeni endaga. Lubi reageerib kõrgpolaarsete molekulidega, mis võivad segus muidu reageerida, moodustades vees lahustuvaid seepe, mis soodustavad irdumist. Kui need molekulid reageerivad lubjaga, moodustavad nad lahustumatuid sooli, mis enam vett ei kaasa. Lisaks muudab väikeste kustutatud lubja osakeste disperseerimine kogu segu tihedamaks ja tugevamaks, vähendades tõenäosust, et bituumeni ja täitematerjali vaheline side puruneb mehaaniliselt, isegi kui vesi puudub. [6]

Parandab jäikust ja vähendab roobaste teket. Roobaste teke on asfaldi püsiv deformatsioon, mis tekib elastsuse ületamisel. Kustutatud lubja võime muuta asfaldisegu jäigemaks, tugevamaks ja roobaste teket pärssivaks kajastab selle suurepärase toimivuse aktiivse mineraalse täiteainena. Erinevalt enamikust mineraalsetest täiteainetest on lubi pigem keemiliselt aktiivne kui interne. See reageerib bituumeniga, eemaldades soovimatud komponendid ajal, mil selle pisikesed osakesed disperseerivad üle segu, muutes katendi vastupidavamaks roobaste tekkele ja väsimismõrdele. [6]

Kustutatud lubja lisamisel tekkiv jäigastumine võib tõsta bituumeni toimivusastet. Olenevalt kasutatud lubjakogusest (tavaliselt 10-20% bituumeni kaalust) võib toimivusaste väärtus tõusta ühe täisastme võrra. Lubja lisamine ei põhjusta siiski madalamal temperatuuril segu rabedamaks muutumist. Madalamal temperatuuridel muutub kustutatud lubi keemiliselt vähem aktiivsemaks ja käitub nagu iga teine inertne täiteaine. [6]

Vähendab oksüdatsiooni ja vananemist. Oksüdatsioon ja vananemine ilmnevad aja jooksul ja tekitavad rabeda katendi. Polaarsed molekulid reageerivad keskkonnaga, lagunevad koost ja aitavad kaasa katendi purunemisele. Kustutatud lubja lisamine bituumenitele vähendab asfaldi oksüdeerumise ja vananemise kiirust. Selle põhjuseks on keemilised reaktsioonid, mis toimuvad kaltsiumhüdroksiidi ja bituumeni kõrgpolaarsete molekulide vahel. Kustutatud lubi ühineb polaarsete molekulidega ajal, mis see lisatakse asfaldile ja seega ei reageeri polaarsed molekulid keskkonnaga. Sellest tulenevalt jääb bituumen painduvaks ja kaitstuks mõrde eest aastateks kauem kui ilma lubja osaluseta. [6]

Vähendab pragunemist. Pragunemine võib tuleneda muudest põhjustest kui vananemine, näiteks väsimusest ja madalatest temperatuuridest. Kustutatud lubi vähendab asfaldi pragunemist ka nendel põhjustel. Ehkki üldiselt pragunevad jäigemad asfaldisegud rohkem, parandab lubja lisamine väsimusomadusi ja vähendab pragunemist. Pragunemine toimub sageli mikromõrade tekke tõttu. Neid mikromõrasid haaravad kinni ja suunavad kõrvale kustutatud lubja väikesed osakesed. Lubi vähendab mõranemist rohkem kui inaktiivsed täiteained, sest reaktsioon lubja ja polaarsete molekulide vahel bituumenis suurendab lubjaosakeste efektiivmahtu, ümbritsedes neid suurte orgaaniliste ahelatega. Sellest tulenevalt suudavad lubjaosakesed mikromõrasid paremini kinni haarata ja kõrvale suunata, takistades nende koos kasvamist suurteks pragudeks, mis võivad põhjustada katendi purunemise. [6]

Sünergilised eelised. Kustutatud lubja lisamise arvukad eelised toimivad koos ja loovad oivalise ja suure toimivusega toote. Ehkki eespool kajastatud eelised on kirjeldatud eraldi, toimivad kõik need sünergiliselt, aidates lõpptoote täiustamises mitmeti kaasa. Sünergilisi eeliseid lisandub ka siis, kui lubja kasutatakse koos polümeer-modifikaatoritega. Uuringud näitavad, et mõnes olukorras võivad koos kasutada lubi ja polümeerid anda paremaid tulemusi kui siis, kui neid kasutatakse eraldi. [6]

1.5.3 Kustutatud lubja lisamine kuumale asfaldisegule

Kustutatud lubja võib kuumadele asfaldisegudele lisada mitmel viisil. Üldreeglina on kasutamise määr üks protsent segu kaalust. Juhul, kui eeldatakse tugevat irdumist, võib kasutamise kogust suurendada. [6]

Põhja-Ameerika riigiasutuste hinnangul suurendab 1-1,5% kustutatud lubja sisaldus asfaldisegude vastupidavust 2-10 aasta võrra, seega 20-50%. [10]

Põhja-Prantsusmaa tee-ehitusettevõtja Sanef kasutab oma võrgu kiirelt kuluvates osades kustutatud lubja, kuna nad täheldasid, et kustutatud lubi annab asfaldisegule 20-25% pikema vastupidavuse. [10]

Sarnased tähelepanekud andsid hollandlastele idee kasutada kustutatud lubja poorses asfaldis ja selle seguga on nüüd kaetud 70% riigi kiirteedest. [10]

Kuivalt sisestamine trummelseguritesse. Kasutatakse segu kaalu põhiselt ühte protsenti kustutatud lubja ja see lisatakse trummlisse samaaegselt mineraalse täiteainega. Kustutatud lubi puutub otseselt kokku täitematerjaliga, parandades seeläbi bituumeni ja kivi vahelist sidet, samal ajal muutub bituumen tasakaalustatuks. See lubjaosa võib reageerida polaarsete molekulidega, mis aitavad kaasa nii irdumisele kui

ka oksüdatsioonile, samal ajal jäigastades ja tugevdades segu. Kuivmeetod on kõige lihtsam laialt kasutatav meetod. [6]

Kuiv lubi niiskel täitematerjalil meetod. See hõlmab lubja doseerimist külma etteandelindiga, mis kannab täitematerjali, mida on niisutatud selle küllastunud pinnakuivuse tingimustes umbes 2-3%. Niiskele täitematerjalile kantakse lubi, et kindlustada kivi täielikum katvus kui saavutatakse kuivmeetodil. Kivi külge kinnituv lubi dispergeeritakse kogu segus, kus see aitab kaasa teistele kirjeldatud täiustusele. Kustutatud lubja lisamine kuumale segule – meetod „kuiv niiskel“ on suhteliselt lihtne, kuid protsessis vajaliku lisavee väljatõrjumine kasutab lisakütust ja võib tehasetoodangut mingi määral aeglustada. Selle meetodi variatsioonis segatakse täitematerjal ja lubi enne kasutamist jääkpinnase kuhjas, et anda lubjale lisaaega kivi pinnaga reageerimiseks ja veelgi parandada irdumisvastast toimet (joonis 1.2). [6]

Joonis 1.2 Kustutatud lubja segunemine täitematerjali kuhjas. [7]



Mössimeetod. Selle meetodi puhul kasutatakse lubja ja vee mössisegu, mis kantakse täitematerjali mõõdetud koguses, tagades kivipindade suurepärase katvuse. Täitematerjal võib seejärel ette anda, kas otse tehasesse või mõnda aega seista jääkpinnase kuhjas, võimaldades lubjal täitematerjaliga reageerida. Kuna lubi on kiviga seotud on see ka selline meetod, mis toob kaasa lubja väikseima dispergeerimise kogu ülejäänud segus. [6]

1.5.4 Lubja kasutamine asfaltkatendi ringlussevõtuks

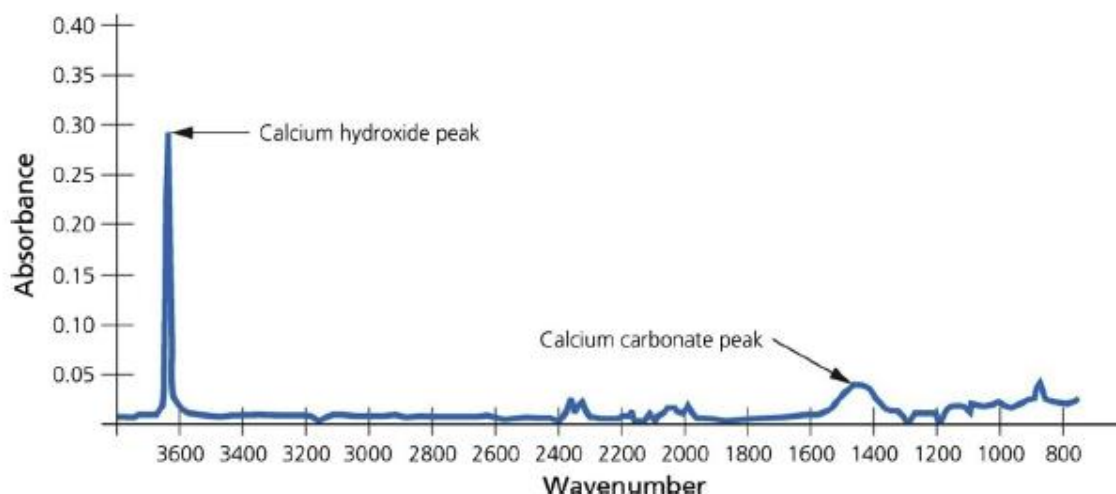
Uus ja kasvav lubjakasutus on külm, kohapealne ringlussevõtt kehvade asfaltkatendite taastamiseks. Olemasolev asfaltkatend purustatakse freesmasina abil ja lisatakse kuum lubjamõss koos asfaltemulsiooniga. Külm ringlusse võetud segu pannakse ja tihendatakse tavapärase asfaltkatendiseadmete abil ja see tagab uuele asfaltkatendile ühtlase asfaltpinna. Lubja lisamine toob kaasa suurepärased külmad ringlusse võetud segud, millel on palju suurem algtugevus ja vastupidavus niiskuskahjustusele. [6]

1.5.5 Kustutatud lubja kvantifitseerimismeetod asfaldisegudes

Kustutatud lubi vähendab teadaolevalt bituumeni keemilist vananemist. Veelgi enam, see jäigendab mastiksit rohkem kui tavaline mineraalne täiteaine, olgugi, et seda toimet täheldatakse ainult toatemperatuurist kõrgemal. Siiski mõjutab see asfaldisegu mehaanilisi omadusi. [10]

USA meetod. See seisneb täiteaine FTIR-spektri mõõtmises ja kustutatud lubja sisalduse määramises kaltsiumhüdroksiidile vastava maksimaalse intensiivsusega $3,640\text{ cm}^{-1}$ (Joonis 1.3). Kaltsiumkarbonaadi maksimaalne intensiivsus on $1,390\text{ cm}^{-1}$ ja seda saab kustutatud lubjast eksimatult eristada (Joonis 1.4). [10]

Joonis 1.3 Kustutatud lubja FTIR-spekter [10]



Analüüs osutus kergesti teostavaks, kasutades 15-20 grammi tolmu, mis saadi 9,5 mm volframkarbiidi otsaga löökpuuriga läbi asfaldisegu puurides. Huvitavalt kombel näitasid Nevadast pärit 10 aasta vanused materjalid, et kustutatud lubja on võimalik pärast mitmeid aastaid liiklust ja ilmastikutingimusi endiselt tuvastada. [10]

Saksa meetod. Saksa meetod eristab kolme erinevat määramise alameetodit. Kustutatud lubja puhtus, kustutatud lubja sisaldus segatud täiteaines ja kustutatud lubja sisaldus täiteaines, mis koguti asfaldisegust.

Täiteaine saadakse asfaldisegust, kasutades standardis EN 12697-1 kirjeldatud bituumeni ekstraheerimist lahustiga (lahustina kasutatakse tavaliselt trikloroetüleeni või tetrakloroetüleeni). Seejärel saadakse titreeritav suspensioon, segades 1 g taastatud täiteainet 150 ml vee, 10 ml isobutanol ja 5 ml pindaktiivse aine lahusega (1g naatriumdodeksüülsulfaati ja 1 g polüetüleenglükool-dodetsüületrit 100 ml vees). Pindaktiivse aine lahust on vaja ainult siis, kui on testitud kogu täiteainet, et pesta täiteaine välja bituumeni ekstraheerimisel tekkinud bituumenist või lahustist. Värviliseks indikaatoriks on fenoolftaleiin (0,5 g 50 ml etanoolis, mis lahustatud 100 ml vees). Titreerimise kiirus on esialgu 12 ml/min, kuid väheneb ekvivalentpunkti lähedal 4 ml/min-ni. Näidati, et meetod toimib igat tüüpi täiteainega, sealhulgas lubjakivist täiteaine.

Esimene riiklik ringkatse viidi läbi Saksamaal ning selles osales 12 laborit. Korratavus (kustutatud lubja absoluutkaal täiteaines) oli 0,52% ja reprodutseeritavus 0,91%, keskmine väärtus 27,3 massiprotsendi puhul. [10]

Meetod valideeriti proovide abil, mis võeti põhivõrgust 1,5 aastat pärast ehitust. SMA 0/8 segud valmistati kas tavalise täiteainega või segatud täiteainega, mis sisaldas 25% kustutatud lubja, ja tulemused on toodud tabelis 1.10. [10]

Tabel 1.10 Saksa kvantifitseerimismeetodi valideerimise tulemused [10]

Jagu	Kustutatud lubja nominaalsisaldus (massiprotsentides)	Kustutatud lubja mõõdetud sisaldus kogutud täiteaines (massiprotsentides)
1	0	0,9
2	0	0,7
3	25	29,2
4	25	26,0

Materjalid. Laboris valmistatud segatud täiteained, need valmistati, kasutades labori eraldajaga segatud täiteainet ja teatud kustutatud lubja kontsentratsiooni 25%, 50% ja 75% lubja. Need kustutatud lubja sisaldused on valitud esindamiseks Euroopa turul pakutavaid segatud täiteaineid. Näiteks Saksamaal või Hollandis kasutatakse enamasti segatud täiteaineid, mis sisaldavad 20% või 25% kustutatud lubja, samas on Prantsusmaal neis enam kui 75% kustutatud lubja. Üldiselt kasutatakse kustutatud lubja mineraalse täiteainena kaltsiumkarbonaati, kuid võidakse kasutada ka mõnda muud mineraalset täiteainet. Selle uuringu jaoks on enne asfaldisegusse sisestamist valitud ainult üks lubjakivist täiteaine, mis jälgendaks segatud täiteaine kasutamist. Kaltsiumkarbonaat, kui üks kõige paremini happes lahustuvaid kivimeid, mida tavaliselt

leidub maantee täitematerjalides, on hea võrdlusmaterjal, kontrollimaks osa täiteaine kustutatud lubjaga doseerimise riski. [10]

Saksa katsemeetodit kasutatakse, et määrata kaltsiumhüdroksiidi sisaldust kustutatud lubjas ja segatud täiteainete sisaldust kuumas asfaldisegus. Seda saab kasutada ka asfaldisegust kogutud täiteainete puhul. Katsemeetod seisnes kõigepealt täiteaine eraldamises segust, kasutades tavalist lahustiga ekstraheerimise meetodit. Kogutud täiteaine tiitrimise kaks sammu:

Esimene samm - täiteaine proov dispergeeritakse vee, isobutanooli ja tensiidi lahuses, et täiteaine puhastada (bituumeni ja/või ekstraheerimislahusti eemaldamiseks).

Teine samm - kaltsiumhüdroksiidi sisaldus tiitritakse leeliselises keskkonnas vesinikkloriidhappega, kasutades standardile EN 459-2 kohandatud meetodit. Kuid tuleb märkida, et segatud täiteainete ja kogutud täiteainete puhul on vaja kindlaks teha kasutatud täitematerjali taustaväärtus.

Kui 1 mol Ca(OH)_2 reageerib 2 mol HCl-ga, on kaltsiumhüdroksiidi sisaldus (Ca(OH)_2) väljendatuna massiprotsendis järgmise valemi abil arvutatav (1.1):

$$\% \text{Ca(OH)}_2 = 100 \times F \times 37,5 \times \frac{(C_1 \times V_{eq})}{(1000 \times m_1)} \quad (1.1)$$

Kus:

C_1 - on vesinikkloriidhappe kontsentratsioon, mol/l

V_{eq} - on samaväärne vesinikkloriidhappe mahuga, ml

m_1 – on võetud täiteaine proovi mass, g

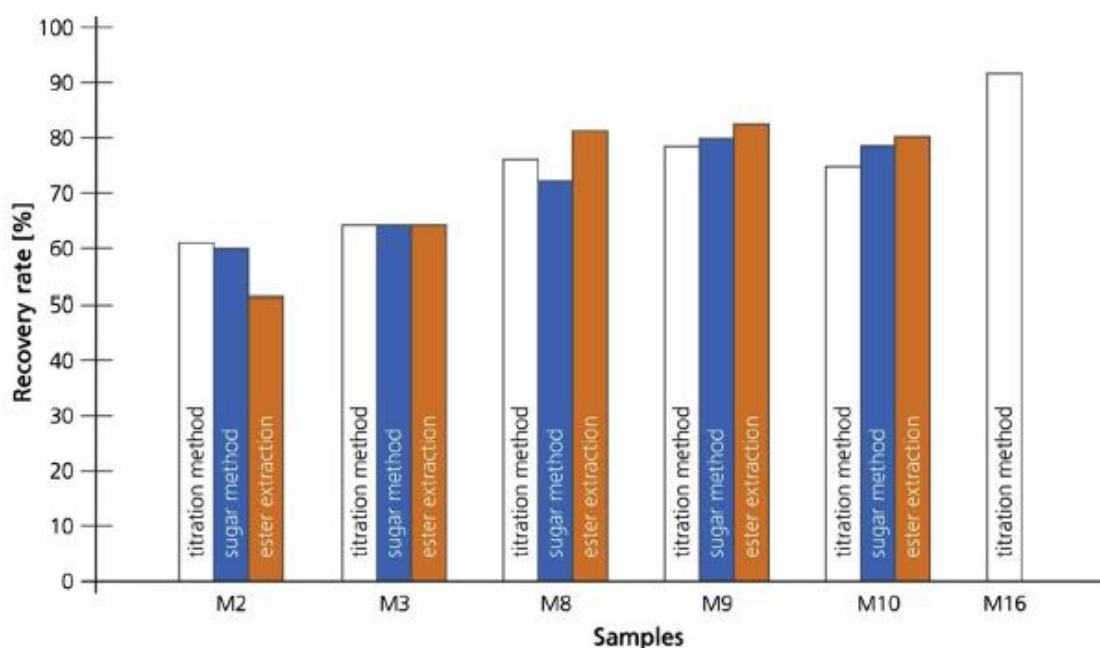
F – on happe tegur ning see on 1 happe puhul, mis on ümbritseva õhu temperatuuril õige puhastusastmega. [10]

Rahvusvaheline ringkatse. Ringkatse käigus valmistati laboris kõigepealt uus asfaldisegu, mis oli teadaoleva kustutatud lubja sisaldusega, 29,9%. See arv saadi, lisades 6% täiteainet, mis sisaldas 70% kustutatud lubja (94% puhtusega) segusse, milles oli kokku 12,4% täiteainet (see hõlmab lisatud täiteainet ja agregadi fraktsioonidest kogutud täiteainet, tabel 1.11). [10]

Tabel 1.11 Täiteaine kogusisaldus segus, AC 10 surf 35/50 [10]

Fraktsioon	Sisaldus segus (%)	Möödetud täiteaine sisaldus fraktsioonis (%)	Tegelik täiteaine sisaldus segus (%)
0/2	44,0	15,0	6,6
2/6,3	20,0	0,7	0,1
6,3/10	24,4	0,3	0,1
Täiteaine	6	94,0	5,6
35/50 bituumen	5,6	-	-
Täiteaine kokku			12,4

Joonis 1.4 Kolme erineva keemilise meetodi abil tuvastatud kustutatud lubja protsent [10]



Joonisel 1.4 toodud „tiitrimismeetod“ viitab otsesele tiitrimisele, järgides kirjeldatud Saksa meetodit. „Suhkrumeetod“ viitab testiva täiteaine sahharoosiekstrakti tiitrimisele ja estri ekstraheerimisele etüülatsetoatsetaadi ekstraktiks. Materjalides olid erinevate täiteainetega asfaldisegud, mis olid segatud kustutatud lubjaga: M2 ja M3 basaldist täiteaine (vastavalt 5% ja 20% kustutatud lubja). M8 ja M9 moreenist täiteaine (vastavalt 5% ja 20% kustutatud lubja), M10 67% moreenist ja 33% lubjakivist täiteaine (25% kustutatud lubja) ja M16 lubjakivist täiteaine (20% kustutatud lubja). Kogumismäär on mõõdetud kustutatud lubja ja kustutatud lubja nominaalse sisalduse suhe. [10]

Kustutatud lubja puhtus. Kustutatud lubja spetsifikatsioonid kohustavad märkima tiitrimist mõjutada võiva puhtuse. Tõepoolest, kustutatud lubi võib pärineda madala puhtusastmega lubjakivist, mis annaks madala $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sisalduse. Lisaks võib osa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -st olla niiskes keskkonnas pikema ladustamise tõttu rekarboniseerunud, mis vähendaks ka olemasolevat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sisaldust. Sel põhjusel kasutati komponentide puhtuse kindlaks tegemiseks Saksa meetodit (tabel 1.12). Analüüside standardhälbe hindamiseks on iga puhta komponendi jaoks tehtud 5 korratavuse katset. Ootuspäraselt ei leitud lubjakivist täiteainest kaltsiumhüdroksiidi sisaldust ja kahe kustutatud lubja puhul oli olemasolev $\text{Ca}(\text{OH})_2$ puhtus umbes 95%. Analüüsi standardhälve oli väga hea, umbes 0,3%. [10]

Tabel 1.12 Puhaste komponentide kaltsiumhüdroksiidi sisaldus, sh:standardhälve [10]

Puhtad komponendid	Kaltsiumhüdroksiidi sisaldus
Lubjakivi täidis	0%
Dugny kustutatud lubi	94,7% (sh: 0,2%)
Flandersbachi kustutatud lubi	94,5% (sh:0,3%)

Tabel 1.13 Dugny ja Flandersbachi kustutatud lubjaga segatud täiteainete kaltsiumhüdroksiidi sisaldus. [10]

Proovid	Lubja nominaalsisaldus (%)	Kaltsiumhüdroksiidi sisaldus		
		Möödetud sisaldus (%)	Teoreetiline sisaldus (%)	Suhteline hälve teoreetilisest sisaldusest (%)
Dugny kustutatud lubi	25	23,3 (sh:0,6)	23,7	1,7
	50	46,5 (sh:0,5)	47,4	1,9
	75	69,7 (sh:0,6)	71,0	1,8
Flandersbachi kustutatud lubi	25	23,3 (sh:0,6)	23,7	1,7
	50	46,5 (sh:0,5)	47,4	1,9
	75	69,7 (sh:0,6)	71,0	1,8

„Teoreetiline sisaldus“ viitab eeldatavale väärtusele, mis saadakse nominaalsisalduse korrigeerimisel kustutatud lubja puhtuse suhtes (tabel 1.12), sh: standardhälve.

Tabel 1.14 AC 10 surf 35/50 segudest kogutud kaltsiumhüdroksiidi sisaldus erinevate Dugny kustutatud lubja sisaldustega. [10]

Proov	Kustutatud lubja nominaalsisaldus lisatud täiteaines (%)	Kustutatud lubja nominaalsisaldus kogutud täiteaines (%)	Kaltsiumhüdroksiidi sisaldus		
			Möödetud sisaldus (%)	Teoreetiline sisaldus (%)	Suhteline hälve teoreetilisest sisaldusest (%)
Asfaltsement, sealhulgas segatud täiteained x % Dugny lubjaga	0	0	0	0	0
	50	23,5	19,7	22,3	11,7
	100	47,0	42,1	44,5	5,4

„Teoreetiline sisaldus“ viitab eeldatavale väärtusele, mis saadakse nominaalsisalduse korrigeerimisele kustutatud lubja puhtuse suhtes (tabel 1.12).

Praktikas seisneb protseduur selles, et kõigepealt toodetakse laboris kalibreerimisegu, mis on teadaoleva kustutatud lubja nominaalsisaldusega ning sarnane töökohas kavandatud. Nimetatud segust saab eraldada täiteaine ning Ca(OH)_2 sisaldus saab hinnata Saksa meetodiga. Peale seda võib kogumismääraks nimetatud väärtuse pöördväärtust nimetada agregadi parandusteguriks ACF, mis on määratletud järgmiselt:

$$\text{ACF} = \text{Ca(OH)}_2 \text{ nominaalsisaldus} / \text{möödetud Ca(OH)}_2 \text{ sisaldus}$$

Ülaltoodud juhul oleks ACF seega 1,06 (=29,9/28,2). See tähendab, et kontrolle saab läbi viia Saksa meetodit kasutades ja lisaks mõõdetud Ca(OH)₂ sisalduse saamisele, nagu eespool kirjeldatud, võib leida arvutatud kustutatud lubja sisalduse segus järgmise valemi abil:

Arvutatud kustutatud lubja sisaldus = mõõdetud Ca(OH)₂ sisaldus x ACF/täiteaine sisaldus segus

Seetõttu võib meetod pakkuda lisaks ACF-i mõõtmiseks laboris kalibreerimisele viisi, kuidas tulemustes otse ja täpselt väljendada kustutatud lubja sisaldust segus. ACF võib olla vahemikus 1,06 kuni 1,67. [10]

Kokkuvõtlikult USA meetod põhineb infrapunaspetskoopiaal ja Saksa meetod happeluse tiitrimisel. Saksa meetodit on kõige hõlpsam teostada kontroll-laborites, kuna testimisseade, st tiitrija on odav ja lihtne ning on enamikus teedelaborites juba olemas. Kustutatud lubja nominaalsisaldus oli 2% kuiva agregaadil põhjal. Mõõdetud sisaldus leiti olevat 1,7%, mis on eeldatavate tulemustega mõistlikult kooskõlas. [10]

1.5.6 Kustutatud lubja kasutamine asfaldisegude valmistamisel, Euroopa juhtumiuuringud

Niiskuskindlus. Kustutatud lubja mõju asfaltsegu niiskuskindlusele illustreerib Prantsusmaal, Epsilon laboris läbi viidud uuring. Uuring viidi läbi kohalikust karjäärast pärit graniidist täitematerjaliga. Segu retsept sisaldas suhteliselt suurt hulka lisatud täiteainet (3,78% segu põhjal), mis võimaldas osa sellest asendada suurema kustutatud lubja kogusega. Lubjaks oli kaltsiumhüdreeritud lubi, milles oli üle 90% CaO + MgO (vastavalt standardile EN 459-1). Seda lisati 1 või 2% täitematerjalist (tabel 1.15). [5]

Tabel 1.15 Prantsuse segu AC graniidist täitematerjali põhjal (% kogu segu kaalust) [5]

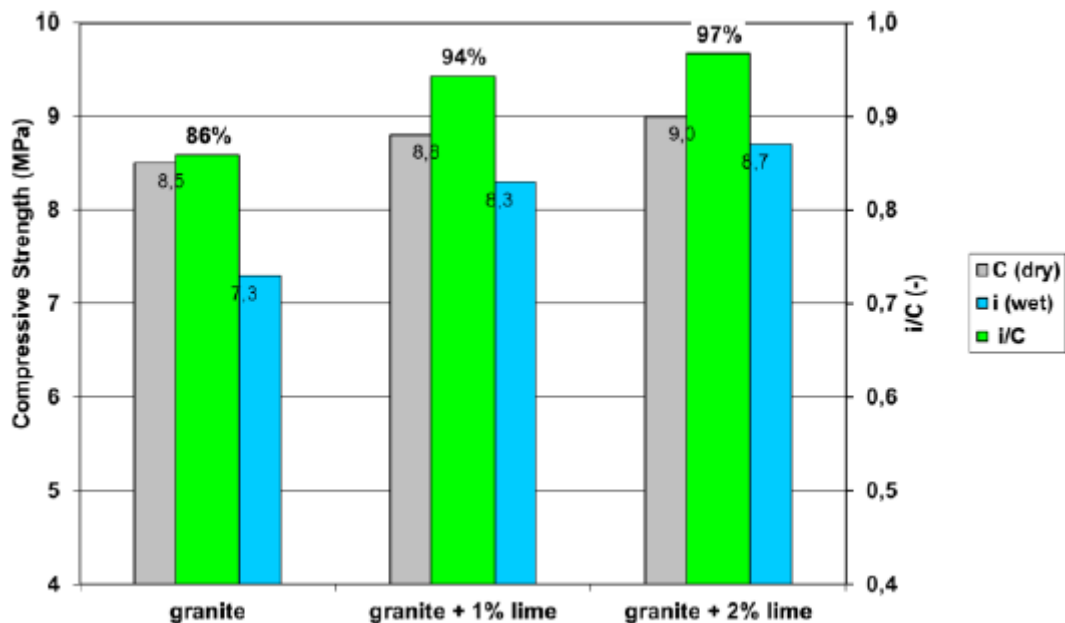
Komponent	Etalon AC	AC 1 % lubjaga	AC 2 % lubjaga
0/4 liiv	35,88	35,88	35,88
4/6 täitematerjal	7,55	7,55	7,55
6/10 täitematerjal	47,21	47,21	47,21
Filler	3,78	2,83	1,89
Kustutatud lubi	-	0,94	1,89
50/70 bituumen	5,57	5,57	5,57

Proovid tihendati staatilise tihendamise teel 10% - poorsuseni. Survetugevust mõõdeti kuivadel ja märgadel proovidel pärast kaht tüüpi hoiustamist. [5]

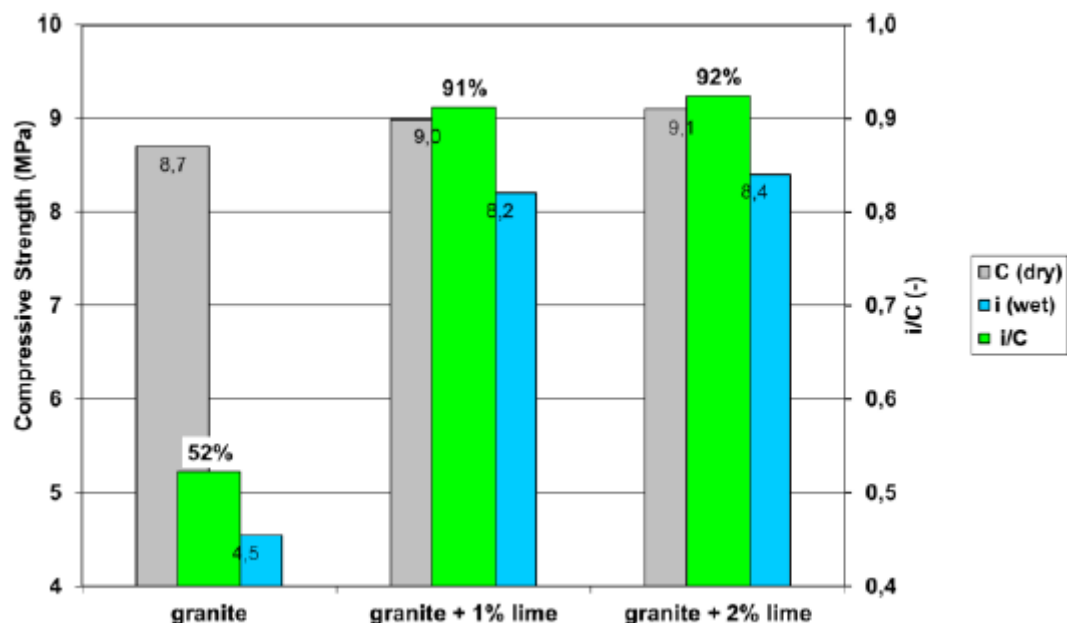
Esimene tüüp, standardi EN 12697-12 meetodil B hoiustamine (Prantsusmaal tuntud kui "Duriez" protseduur), mis tähendab 7 päeva hoidmist veevannis 18° C juures. Teine tüüp, rasketes tingimustes, mis tähendab 14 päeva 40° C veevannis, mis sisaldab 2% NaCl. [5]

See uuring kinnitas, et soolad ei mõjutanud niisket survetugevust 7 päeva pärast temperatuuril 40° C, mis jäi sarnaseks sellele, mida mõõdeti 14 päeva pärast sooladeta. Sellegipoolest ilmneb, et soolad avaldasid tugevat mõju võrdlusproovi survetugevusele märgades tingimustes pärast 14 päevast hoiustamist (joonis 1.5, joonis 1.6). On selge, et soolade kahjulik mõju vajab aega ja seitsmest päevast temperatuuril 40° C ei piisa selle ilmnemiseks. [5]

Joonis 1.5 Tavaline Durienz hoiustamine (7 päeva, 18° C) [5]



Joonis 1.6 Rasketes tingimustes hoiustamine (14 päeva, 40° C, 2% NaCl) [5]



AC tulemusi saab võrrelda Belgia teede uuringukeskuse avaldatud andmetega killustikmastiks asfaltsegu (SMA) kohta. Uuring viidi läbi laboris 6% 50/70 Venezuela bituumeniga SMA 10-1 baasil, mille koostis oli niiskuskindluse osas asetatud kõige halvematesse tingimustesse (tabel 1.16). [5]

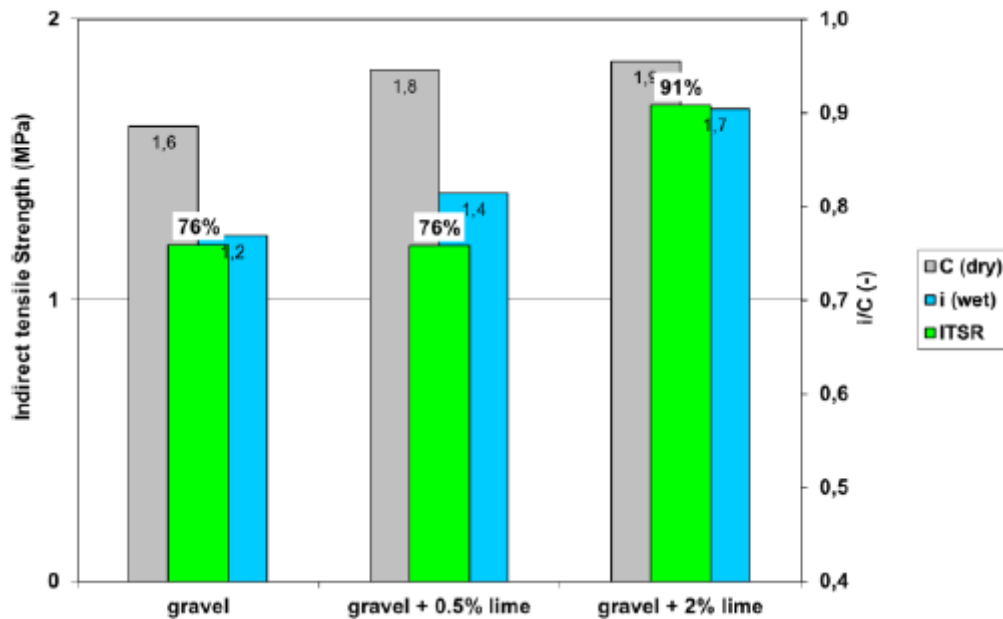
Tabel 1.16 Belgia SMA 10 segu retsept (% kogu segu kaalust). Kustutatud lubi lisati segafilleri Ka5 või Ka20 (vastavalt standardile EN 13043) abil, st see sisaldas vastavalt 5 või 20 mahuprotsenti kustutatud lupja. [5]

Komponent	Etalon SMA	SMA 0,5 % lubjaga	SMA 2 % lubjaga
0/4 liiv	15,9	15,9	15,9
4/6 täitematerjal	11,5	11,5	11,5
6/10 täitematerjal	56,4	56,4	56,4
Filleri tüüp	V38/45	Ka5	Ka20
Filler	10,2	10,2	10,2
50/70 bituumen	6,0	6,0	6,0

Kustutatud lubi lisati, kasutades erinevat tüüpi segafillereid, mida võrreldi tavalise mineraalse filleriga. Segafiller on standardis EN 13043 määratletud kustutatud lubja ja lubjakivi seguna. [5]

Proovid tihendati 8,4% poorsuseni, seejärel testiti nende niiskuskindlust, kasutades kaudse tõmbetugevuse näitajat. Võrreldes kuiva kaudset tõmbetugevust ja märga tõmbetugevust pärast 3 päevast konditsioneerimist veevannis temperatuuril 40° C (joonis 1.7).

Joonis 1.7 Kuivade (C)/märgade (i) proovide survetugevus ja säilinud veepüsivus (ITSR) SMA puhul. [5]



Need kaks Prantsuse AC-I või Belgia SMA-I põhinevat näidet näitavad, kuidas kustutatud lupja saab kasutada erinevat tüüpi asfaltsegude niiskuskindluse parandamiseks. Prantsuse uuring soovib tungivalt, et kustutatud lubi võiks olla kasulik rasketes talvistes oludes, kus jäätõrjesoolade kasutamine võib kiirendada segude lagunemist. Belgia uuring näitab, et isegi kõrgefektiivsete segude korral, nagu näiteks modifitseeritud bituumeniga SMA, võib lubi niiskuskindlust parandada. [5]

Vananemiskindlus. Andmed on kogutud Kagu-Saksamaalt, selles piirkonnas valitseb kuum suvi koos sagedaste äikesetormidega, suhteliselt külm talv ja suured temperatuuri kõikumised. Tabelis 1.17 on välja toodud AC 11 surf 70/100 tulemused 2000. aasta juulis ehitatud maanteelt. Andmed on kolme erineva aasta kohta, pärast 2 aasta, 5 aasta ja 11 aasta möödumist. Mõõdeti ka taaskasutatud sideaine R&B-d koos segu jäävpoorsuse ja lubjasisaldusega. [5]

Tabel 1.17 AC 11 surf 70/100 tulemused. [5]

		Löik A	Löik B	Löik C	Löik D
		AC 1	AC 2 (vähendatud sideaine)	AC 2, 2 % lubjaga	AC 1, 2 % lubjaga
	Sideaine tüüp	70/100	70/100	70/100	70/100
	Sideaine sisaldus (%)	6,2	5,9	5,8	6,0
Ehitamise ajal	Poorsus (%)	5,6	4,0	3,6	3,5
	R&B (°C)	55,5	55,5	49,5	49,5
2 aastat hiljem	Poorsus (%)	4,1	3,5	3,2	3,9
	Kustutatud lubi (% täitematerjalist)	-	-	2,0	2,0
	R&B (°C)	56,0	56,0	49,0	49,0
5 aastat hiljem	Poorsus (%)	2,7	2,9	3,3	2,5
	Kustutatud lubi (% täitematerjalist)	-	-	2,2	2,2
	R&B (°C)	57,9	56,5	51,9	52,0
11 aastat hiljem	Poorsus (%)	2,6	2,1	2,0	2,6
	Kustutatud lubi (% täitematerjalist)	-	-	2,3	2,2
	R&B (°C)	54,1	53,8	51,5	50,0
	Roopa sügavus (mm)	2	2-3	2	0

Ehitamine toimus 2000. aasta juulis. Kasutati kahte retsepti: üks, mille sideaine sisaldus on „õige“ (6,2% - AC1), ja teine, mille sideaine sisaldust alandati teadlikult 0,3% võrra, eesmärgiga kiirendada vananemist. Igas kontrollimise etapis võeti suurkehaproovid ja kontrolliti koostist, kaasa arvatud poorsust, ekstraheeriti sideaine pehmenemistemperatuuri mõõtmist. Lubjaga löikude R&B pehmenemistemperatuur jäi selgelt madalaks ka 11 aasta pärast. Võrreldes lubja sisaldust, oli sarnane esialgne sisaldus isegi pärast 11 aastat, mis näitab, et karboniseerumist ei olnud toimunud. Antud Saksamaa näide toob esile kustutatud lubja mõju asfaldisegude vananemisele. [5]

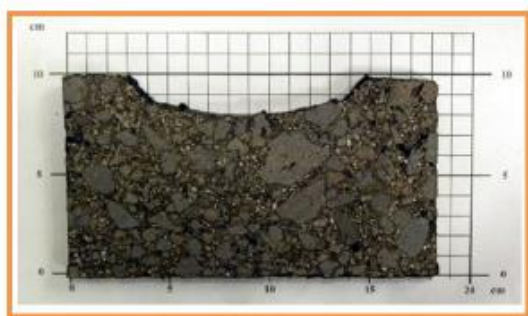
Sideaine jäigastumine. Deformatsioonikindluse osas on rusikareeglina asfaldisegus 2% (segu alusel) täiteaine asendamine kustutatud lubjaga üsna sarnane ühe klassi võrra kõvema bituumeni kasutamisele. Täpsemalt öeldes peaks 50/70 bituumeni ja 2% kustutatud lubjaga AC-I olema sarnane deformatsioonikindlus kui 35/50 bituumeni ja ainult tavaliselt mineraalse täiteainega samal AC-I (kõik muud parameetrid on samad). Arvestades kustutatud lubja jäigastumise sõltuvust temperatuurist, käituvad segud madalal temperatuuril siiski teisiti ja segu 50/70 võrreldes 35/50 seguga peaks jääma painduvamaks ja vähem hapraks, isegi kui selles on lupja. 2004. aastal tehti Austrias uuring. Aluskihtide AC valmistati 70/100 bituumeniga ja kas tavalise mineraalse filleri või segafilleriga Ka30 (tabel 1.18). [5]

Tabel 1.18 Segu retsept Austria uuringu AC 32 aluskihis 70/100 jaoks (% kogu segu mahukaalust). [5]

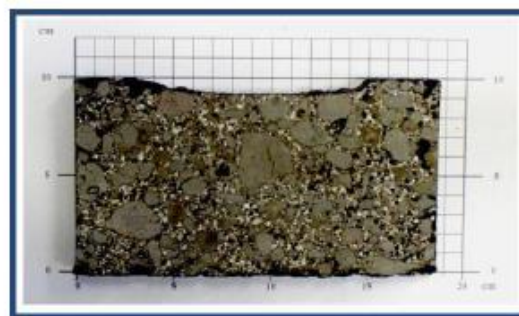
Komponent	Etalon AC 32 alus	AC 32 alus 3,5 % lubjaga
0/2 liiv	24,0	23,2
2/32 täitematerjal	64,6	65,5
Filleri tüüp	V38/45	Ka30
Filler	7,2	6,8
70/100 bituumen	4,2	4,5

Kustutatud lubja sisaldav retsept näitas madalamat roopa sügavust pärast 30 000 koormustsüklit 60° C juures (joonis 1.8). [5]

Joonis 1.8 Roobaste sügavus pärast 30 000 koormustsüklit temperatuuril 60° C ratta jäljes. [5]



Ilma kustutatud lubjata



Kustutatud lubjaga

AC 32 aluskihis 70/100 lõplik roopa sügavus 10,7% 3,5% kustutatud lubjaga või ilma lubjata Ka30 lõplik roopa sügavus 6,6%. [5]

Tabelis 1.19 on välja toodud kustutatud lubja kasutamine Euroopa riikides. Kustutatud lubja modifitseeritud väärtused asfaltbetoonsegudes on ligikaudne hinnang, mida kasutatakse lubja taseme kvantifitseerimiseks igas riigis.

Tabel 1.19 Kustutatud lubja kasutamine Euroopas. [8]

Riik	Katsetamise tase	Algus aasta	Lubjaga töödeldud %	Kustutatud lubja %	Vorm	Eesmärk	Kasutamine
Austria	vabatahtlik	2003	1	1,5 - 3,5	puhas	irdumine, roopad	AC, SMA, PA
Belgia	vabatahtlik	1980	<1	1,5	segatud	irdumine	SMA, PA
Tsehi	vabatahtlik	1996	<1	1,5	puhas	irdumine, roopad	AC, PA
Taani	vabatahtlik	1990	<1	1 - 1,5	puhas	irdumine	AC
Soome	vabatahtlik	?	<1	2	puhas/segatud	irdumine, vananemine	AC, SMA, CMA
Prantsusmaa	vabatahtlik	>1945	1	1 - 1,5	puhas/segatud	irdumine, vananemine	AC, CMA, PA, BBTM
Saksamaa	vabatahtlik	2000	<1	1 - 3	puhas/segatud	irdumine, vananemine	AC, SMA
Ungari	testimisel	2009	<1	2	määramata	irdumine, roopad	AC
Iirimaa	vabatahtlik	2001	<1	2	puhas	irdumine, roopad	PA
Itaalia	vabatahtlik	1990	<1	1 - 2	segatud	irdumine	SMA, PA
Holland	kohustuslik	1990	7	2	segatud	irdumine, vananemine, vastupidavus	PA
Poola	vabatahtlik	1998	<1	1 - 3	segatud	irdumine	AC
Portugal	vabatahtlik	2000	<1	1 - 2	puhas	irdumine	PA
Rumeenia	testimisel	2007	<1	2	segatud	irdumine, roopad	AC, SMA
Slovakkia	testimisel	2009	<1	2	puhas/segatud	irdumine	?
Hispaania	vabatahtlik	2004	<1	1 - 2	puhas	irdumine	SMA
Rootsi	kohustuslik	1998	<1	1	puhas	irdumine, vananemine	AC
Šveits	eelistatud	2006	1	1,5	puhas	irdumine, vananemine, vastupidavus	PA, AC, SMA
Inglismaa	vabatahtlik	2000	1	1 - 2	puhas	irdumine	AC

2 KATSEMETOODIKA

2.1 Delta ring- ja kuulikatsed

Põhimõte. Katse läbiviimisel kasutatakse täitematerjali osakesi, mis on väiksemad kui 0,125 mm, ja bituumenit. Bituumeni duplikaadid ja bituumeni/täiteaine segu valatakse messingrõngastesse, rõngad asetatakse rakisesse, rõngaste peale kuulid, siis alustatakse kuumutamist. Määratakse temperatuur, mille juures bituumen koos koormuseks oleva kuuliga vajuvad 25 mm kaugusel oleva aluseni. Bituumeni sisaldavate rõngaste ja bituumeni/täiteaine segu sisaldavate rõngaste keskmised temperatuuri väärtused arvutatakse. Kahe keskmise temperatuuri erinevus on esitatud kui $\Delta R\&B$. [9]

Proovikoguse ettevalmistamine. Kuivata sõel ülejäänud laboriproovist 0,125 mm sõelale ja sõelale jäänud osakesed visatakse ära. Sõelatud laboriproov redutseeritakse vastavalt standardile EN 932-2, et saada vähemalt 60 g massiga proovikogus. Kuivatusproov kuivatatakse temperatuuril $110 \pm 5^\circ \text{C}$ konstantse massini ja jahutatakse eksikaatoris toatemperatuurini. Proovi tükide olemasolu tuleks kontrollida ja kui see on olemas, peenestada need spaatliga ettevaatlikult. Segada pulbristatud tükis ülejäänud prooviga. [9]

Protseduur. Esimese proovikoguse abil määratakse täitematerjali osakeste tihedus vastavalt standardile EN 1097-7.

Keeduklaas, milles on vähemalt 60 g bituumenit 70/100, koos täitematerjali katsekogusega, aurutusnõu ja nelja messingrõngaga, kuivatatakse kuivatusahjus ning lastakse temperatuurini $150 \pm 5^\circ \text{C}$ $4,0 \pm 0,5$ tunniga.

Pärast kuumutamist asetage kaks messingist rõngast vabastava ainega kaetud klaasplaadile ja täitke need natuke bituumeniga. Bituumeni tegelik mass registreeritakse täpsusega 0,1 g.

Asetage aurutusnõud kaalule, kuumuse isoleerimiseks tuleks kasutada korgi rõnga abi. Täitke anum $20,0 \pm 2,0$ g bituumeniga.

Pange anum bituumeniga kolvi küttekehasse ja reguleerige kolvi küttekeha nii, et bituumeni temperatuur püsiks $150 \pm 10^\circ \text{C}$.

Mõnd tüüpi täiteainete (nt kaltsiumhüdroksiidi sisaldusega segatud täiteaine) puhul võib jäigastumine muuta täiteaine ja bituumeni segu jäigaks, nii et aja jooksul ei saa homogeenet segu kindlaks määrata. Kui homogeenet segu ei saa, katkestatakse katse. Tulemus registreeritakse suurem kui 25°C .

Pange anum bituumeniga tagasi kaalule, kontrollides kausi kuumust uuesti korgi rõnga abil, ja lisage bituumenile täiteaine m_f g, arvutatuna järgmise valemi järgi (2.1):

$$m_f = 0,6 m_b \times \frac{p_f}{p_b} \quad (2.1)$$

Kus:

m_b – bituumeni mass grammides

m_f – lisatud täitematerjali mass grammides

p_f – on täitematerjali osakeste tihedus, megagrammides kuupmeetri kohta

p_b – on bituumeni tihedus 25° C juures, megagrammides kuupmeetri kohta

See annab segu mahust 37,5% täiteainet ja 62,5% bituumenit.

Kui p_b pole teada, võib arvutamisel kasutada 1,025 Mg/m³. [9]

Pange anum tagasi kolvi küttekehasse ja segage täiteaine bituumenisse 150 ± 5 sekundi jooksul. Segage segu veel 150 sekundit temperatuuril 150 ± 5° C, nii et saadakse homogeenne segu. Asetage ülejäänud kaks messingist rõngast eraldusvahendiga kaetud plaadile ja täitke need vähese bituumeni ja täitematerjali seguga. [9]

Määratakse bituumeni ja täitematerjali segu pehmenemispunktid vastavalt standardile EN 1427. Katse iga osa jaoks kasutage bituumeniga täidetud messingist rõngast ja ühte bituumeni/täiteaine seguga täidetud messingist rõngast. [9]

Tehase tootmise kontrollimiseks võib mõlemat sama tüüpi rõngast koos katsetada. Korrake kogu katset, kui bituumeni pehmenemistemperatuuri kahe temperatuuri vahe ja/või bituumeni/täiteaine segu pehmenemistemperatuuri kahe temperatuuri vahe ületab 3° C. [9]

2.2 Pehmenemistäpi määramine

Põhimõte. Kahte õlgmikuga messingrõngasse valatud horisontaalselt bituumenisideainest ketast kuumutatakse reguleeritava määral vedelikuvannis, samal ajal kannab kumbki ketas teraskuuli. Pehmenemistäpp esitatakse temperatuuride keskmisena, mille juures kaks ketast pehminevad piisavalt, mis võimaldab kummalgi bituumenisideainest ümbritsetud kuulil vajuda alla $25,0 \pm 0,4$ mm ulatuses. [9]

Ettevalmistamine ja säilitamine. Modifitseeritud bituumeni puhul kohandatakse proovi kogust, et täita neli rõngast juhuks, kui katset tuleb korrata.

Kuumutada kahte messingrõngast, kuid mitte valamisplaati, ligikaudu 100° C võrra mitte üle eeldatava pehmenemistäpi ning asetada need määratud valamisplaadile.

Vältimaks vannivedelikku sattuvaid osakesi, mis võivad häirida valguskiirt selle kasutamise korral, ei tohi kasutada liiga palju määret.

Valada kuum bituumenisideaine igasse rõngasse kerge liiaga ja seejärel lasta proovidel jahtuda ümbritsevas õhus vähemalt 30 minutit. Materjalide puhul, mis on toatemperatuuril pehmed, jahutada katseproove vähemalt 30 minuti jooksul eeldatavast pehmenemistäpist vähemalt 10° C madalamal õhutemperatuuril. Ajavahemik katseproovide valamisest kuni katse lõpuni ei tohi olla pikem kui 4 tundi.

Kui katseproovid on jahtunud, lõigata liigne bituumenisideaine sojendatud noa või teraga ära nii, et iga katseproov on oma rõnga servaga ühetasane ja rõhtne. Üleliigse bituumenisideaine lõikamine toimugu vahetult enne rõngaste paigaldamist hoidjatesse. Sellisel viisil välditakse pindade saastamist. [9]

Protseduur. Valida sobiv vannivedelik ja termomeeter vastavalt eeldatavale pehmenemistäpile järgmiselt:

Pehmenemistäpi korral 28° C kuni 80° C kasutada värskelt keedetud, jahutatud destilleeritud või desioniseeritud vett.

Pehmenemistäpi korral 80° C kuni 150° C kasutada glütserooli ja temperatuuri mõõtvat seadet.

Asetage seade katseproovirõngaste, kuulide tsentreerimisjuhikute ja temperatuuri anduritega vanni ning täitke vann nii, et vannivedeliku pind oleks rõngaste ülemisest servast 50 ± 3 mm kõrgemal. [9]

Pintsettide abil asetada kaks teraskuuli vanni või eraldi anumasse vastavalt temperatuuriga 5° C või 30° C. Veenduda, et kuulidel on sama temperatuur kui ülejäänud seadmel. [9]

Asetada vann jäävette või termostaati jahtuma temperatuurini $5 \pm 1^\circ \text{C}$ (kui vannivedelik on vesi) või kuumutada ettevaatlikult temperatuurini $30 \pm 1^\circ \text{C}$ (kui vannivedelik on glütserool), et saavutada vanni õige algtemperatuur. Hoida seadet sellel temperatuuril vähemalt 15 minutit, kuid mitte kauem kui 20 minutit. [9]

Võtta vann, mis sisaldab kokkupandud seadet, välja jääveest või termostaadist, kuivatada selle pind õrnalt, et eemaldada vedelik, mis võib moodustada kondensaati, ning asetada see katseesadmesse nii kiiresti kui võimalik. Algtemperatuuri mõju tuleb minimeerida. [9]

Kasutades pintsette, asetada kuul kumbagi tsentreerimisjuhikusse.

Alustades kuumutamist ja segamist, kontrollida algtemperatuuri. Kui see ei ole vahemikus, nagu ette antud, siis tuleb katse katkestada.

Segada vannivedelik ja kuumutada altpoolt nii, et temperatuur tõuseks ühtlase kiirusega $5^\circ \text{C}/\text{min}$. [9]

Kaitsta vanni tõmbetuule eest, kasutades vajadusel kaitseekraane. Ettenähtud kuumutamiskiiruse range järgmine on oluline tulemuste korratavuse jaoks. Kasutada võib kas gaasipõletit või elektrilist küttekeha. [9]

Kui kasutatakse gaasipõletit, tuleb seda kaitsta tõmbetuule eest, kasutades kaitseekraane. Ettenähtud kuumutamiskiiruse hoidmiseks peaks elektriline küttekeha olema madala inertsiga ja muudetava väljundiga. [9]

Kui vannivedelikuna kasutatakse vett, siis esimesed kolm minutit on ette nähtud ainult kuumutamise kiiruse $5^\circ \text{C}/\text{min}$ saavutamiseks. Kui vannivedelikuna kasutatakse glütserooli, siis temperatuuri vahemik 30°C kuni 60°C on ette nähtud kuumutamiskiiruse $5^\circ \text{C}/\text{min}$ saavutamiseks ning pärast 6 minutit peab olema saavutatud temperatuur $60 \pm 1^\circ \text{C}$. Kontrollida õiget temperatuuri vähemalt kord pärast esimest kolme minutit, kui vannivedelikuna kasutatakse vett, või pärast 60°C , kui kasutatakse glütserooli. [9]

Pärast esimest 3 minutit (vesi) või kui 60°C on saavutatud (glütserool), peab temperatuuritõus olema vahemikus $4,4^\circ \text{C}$ kuni $5,6^\circ \text{C}$ igas mõõdetavas minutis. Kui see nii ei ole, siis tuleb katse katkestada. [9]

Pärast esimest 3 minutit (vesi) või kui 60°C on saavutatud, peab üldine temperatuuritõus katse lõpus olema 1°C piires minutite arvust (kümnnendik) $\times 5^\circ \text{C}$. [9]

Tühistada kõik katsed, kus temperatuuri tõusu kiirus ei jää antud piiridesse.

Iga kuul-rõnga kohta protokollida temperatuur, mida termomeeter näitab hetkel, kui kuuli ümbritsev bituumensideaine puudutab alumist plaati, kui kasutatakse käsimeetodit, või katkestab valguskiire, kui kasutatakse poolautomaatset või automaatset seadet. [9]

Kui kasutatakse täiesti uputatavat termomeetrit, siis termomeetri toru üleskerkiva samba osas parandustegurit ei rakendata.

Kui kahe temperatuuri vaheline erinevus ületab 1° C pehmenemistäppide puhul alla 80° C või ületab 2° C pehmenemistäppide puhul üle 80° C, tuleb katsed korrata.

Modifitseeritud bituumeni puhul korrata katsed, kui: kahe temperatuuri vaheline erinevus ületab 2° C, kuul rebestab ümbritseva kile enne alumise plaadi puudutamist (või valguskiire katkemist) või täheldatakse bituumeni osalist eraldumist kuulist. [9]

3 KATSE TULEMUSED JA ANALÜÜS

Käesolevas peatükis on esitatud materjalidega teostatud katsete tulemused ja katsetulemuste analüüs.

Materjalidele tehti katseid:

- Terakoostise määramine õhujoas EVS-EN 933-10
- Karbonaatide sisalduse määramine EVS-EN 196-2
- Peenosiste hindamine, metüleensinise katsetamine EVS-EN 933-9 Lisa A
- Osakeste tiheduse määramine EVS-EN 1097-7
- Poorsuse määramine EVS-EN 1097-4
- Eripinna määramine Blaine'i katsel EVS-EN 196-6

Andmed erinevate fillerite ja bituumeni katsetulemuste kohta on kogutud Teede Tehnokeskuse laboratooriumist.

Katsetati:

- lubjakivi fillerit
- kustutatud lupja
- tardkivitolmu (tardkivist segu tootmisel tekkiv tolmu)
- paetolmu (paeseegu tootmisel saadav tolmu)
- tsementi
- bituumeni osas katsetati 70/100 ja 160/220 bituumenit.

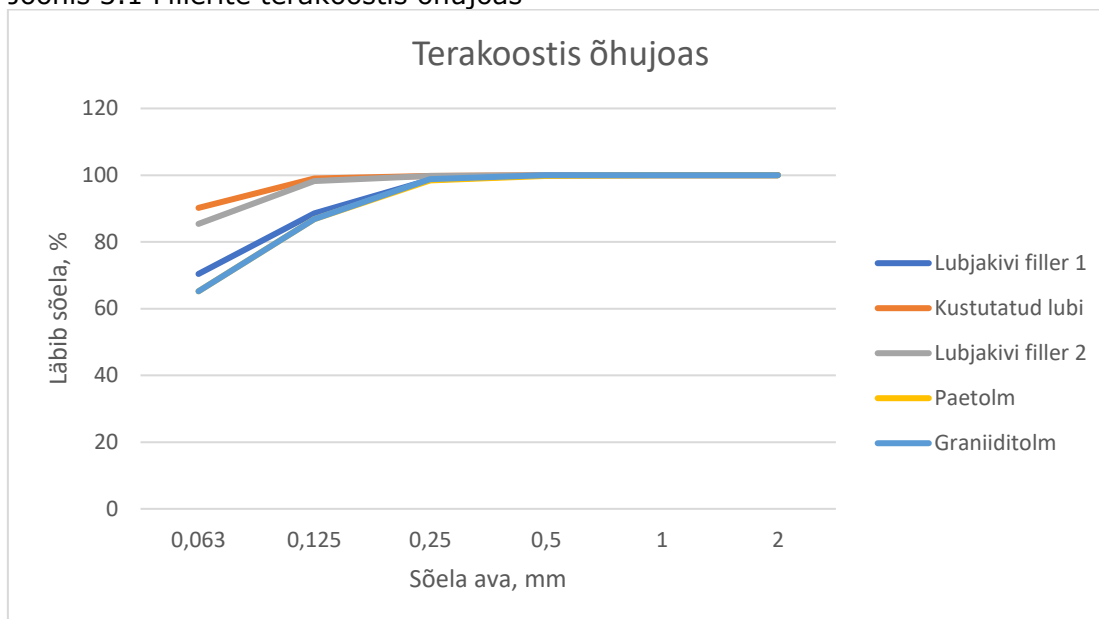
3.1 Terakoostise määramine õhujoas

Tabelis 3.1 on esitatud kõigi katsetatud materjalide terastikulised koostised, mis määrati vastavalt EVS-EN 933-10 katsestandardile. Katse seisneb materjali jaotamises sõeltekomplekti abil mitmeks vähenevate mõõtmetega fraktsiooniks.

Tabel 3.1 Materjalide terastikulised koostised

Sõel, mm	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2
Materjal	Läbind, %					
Lubjakivi filler 1	70,4	88,6	98,6	100	100	100
Kustutatud lubi	90,2	99,0	99,8	100	100	100
Lubjakivi filler 2	85,4	98,2	99,8	100	100	100
Paetolmu	65,2	86,8	98,4	99,8	100	100
Graniiditolmu	65,2	86,8	98,8	100	100	100

Joonis 3.1 Fillerite terakoostis õhujoas



Sõela avade 0,5 kuni 2 puhul on kõigi fillerite läbivus protsent ühtlaselt sama. Kuni 1,4% erinevus kustutatud lubjaga tekib sõelal 0,25. Sõelal 0,125 on erinevus kustutatud lubjaga ca 12,2% ning sõelal 0,063 on erinevus juba 25% (joonis 3.1). Terastikulise koostise nõuetele vastasid ainult lubjakivi fillerid ja kustutatud lubi. Paetolmu ja graniiditolmu tulemused sõelal 0,063 mm olid alla 70%.

3.2 Karbonaatide sisalduse määramine

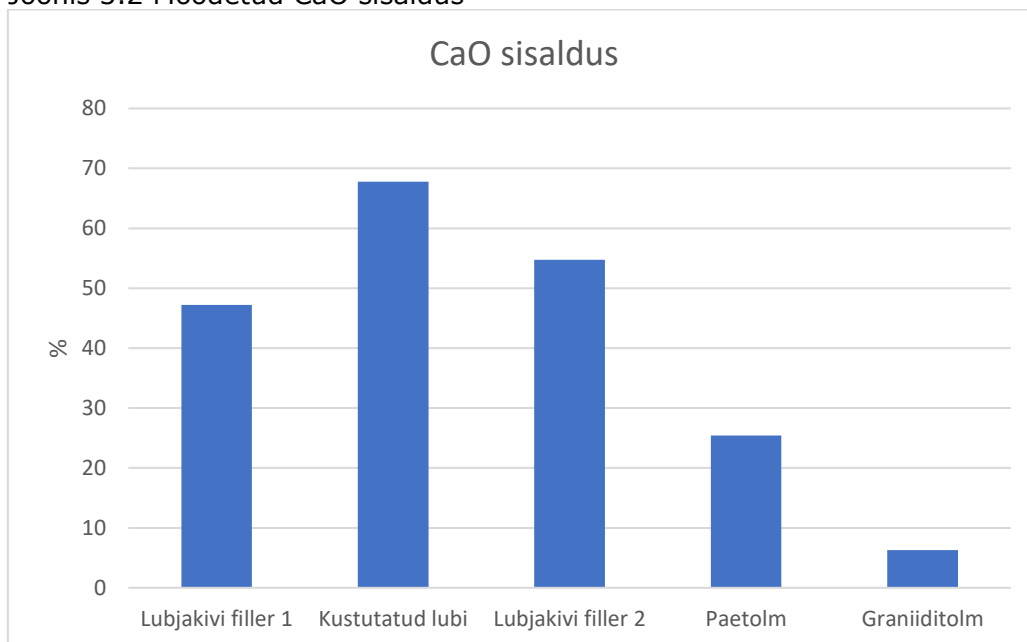
Tabelis 3.2 on esitatud kõigi katsetatud materjalide karbonaatide sisalduse tulemused, mis määrati vastavalt EVS-EN 196-2 katsestandardi järgi.

Tabel 3.2 Karbonaatide sisalduse määramine

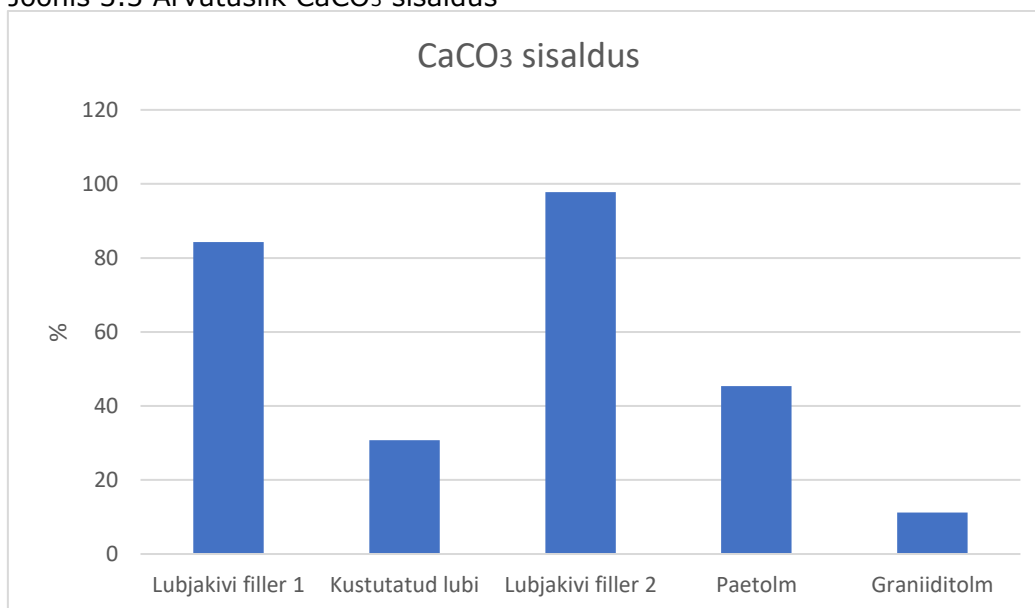
Materjal	Mõõdetud CaO tulemus (%)	Arvutuslik CaCO ₃ tulemus (%)
Lubjakivi filler 1	47,21	84,26*)
Kustutatud lubi	67,79	30,75**)
Lubjakivi filler 2	54,76	97,74*)
Paetolm	25,42	45,37*)
Graniiditolm	6,28	11,21*)

Tulemus arvutati: *) keemilise koostise järgi valemiga: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} \times 1,7848$.
 **) määratud CO₂ sisalduse 13,53% järgi, kuna kogu CaO ei ole seotud CaCO₃ koostisesse.

Joonis 3.2 Mõõdetud CaO sisaldus



Joonis 3.3 Arvutuslik CaCO₃ sisaldus



Mõõdetud CaO tulemused jäävad vahemikku 6,28 – 67,79%. Kõige madalam CaO protsent oli graniidi-tolmul (6,28%) ning kõrgeim näitaja oli kustutatud lubjal (67,79%). Võrreldes kõiki tulemusi, ilmneb et tulemused on kõigil erinevad.

Arvutusliku CaCO₃ tulemused jäävad vahemikku 11,21 – 97,74%. Kõikide materjalide tulemused erinesid üksteisest, kõrgeima CaCO₃ näitajaga on lubjakivi filler 2 (97,74%) ja madalaim näitaja on graniidi-tolmul (11,21%). Kaltsiumkarbonaadisisalduse miinimumväärtuse kategooria on CC₇₀ ehk 70% või suurem. Tabelis 3.2 tulemustest täitsid tingimuse ainult lubjakivi fillerid.

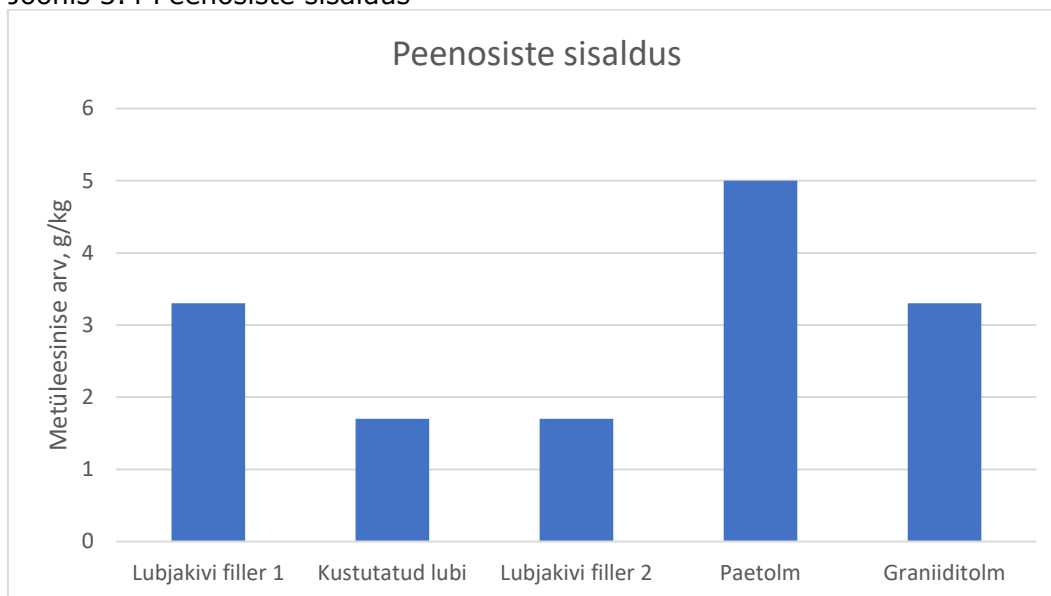
3.3 Peenosiste hindamine, metüleensinise katsetamine

Tabelis 3.3 on esitatud materjalide peenosiste tulemused, mis määrati vastavalt EVS-EN 933-9 lisa A katsestandardi järgi.

Tabel 3.3 Peenosiste hindamine. Metüleensinise katsetamine

Materjal	Katsefraktsioon (mm)	Metüleensinise arv, MB _F (g/kg)
Lubjakivi filler 1	0/0,125	3,3
Kustutatud lubi		1,7
Lubjakivi filler 2		1,7
Paetolm		5,0
Graniiditolm		3,3

Joonis 3.4 Peenosiste sisaldus



Materjalide peenosiste metüleensinise arv jääb vahemikku 1,7 – 5,0. Kahel filleri proovil tuli tulemuseks 1,7 g/kg ja kahel proovil 3,3 g/kg. Paetolmu metüleensinise arv erines teistest suurel määral. Fraktsioonile 0/0,125 mm määratud metüleensinise arvu maksimaalväärtuse kategooria on MB_F10, tabelis 3.3 välja toodud tulemused jäävad kõik lubatud piiridesse.

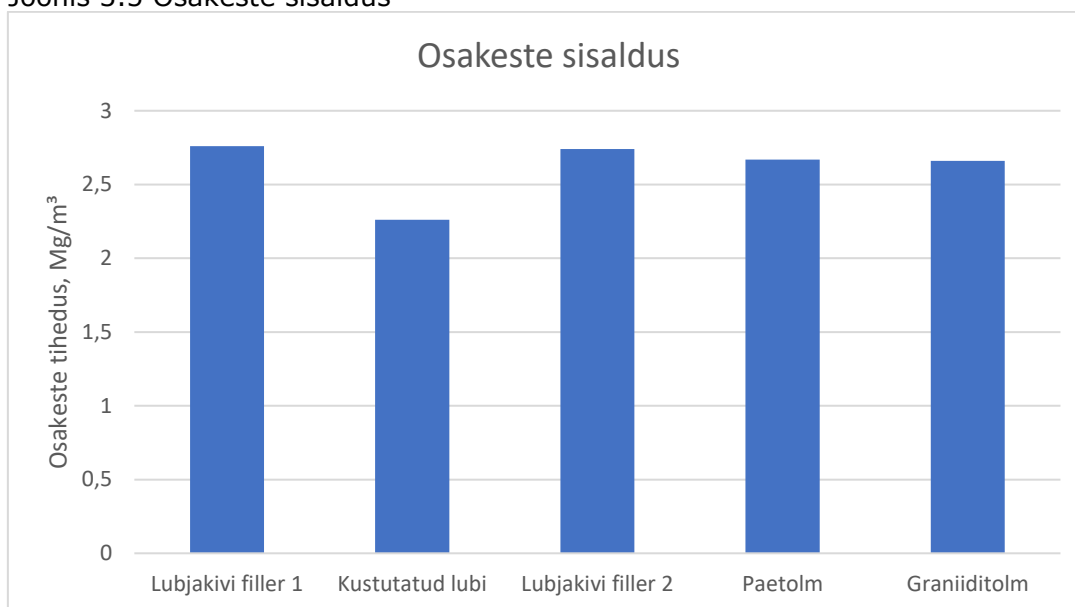
3.4 Osakeste tiheduse määramine

Tabelis 3.4 on esitatud materjalide osakeste tiheduste tulemused, mis määrati vastavalt EVS-EN 1097-7 katsestandardi järgi.

Tabel 3.4 Osakeste tiheduse määramine

Materjal	Tiheduse leidmiseks kasutatud vedelik	Tiheduse leidmiseks kasutatud vedeliku tihedus, ρ_l (Mg/m ³)	Katsefraktsioon (mm)	Filleri osakeste tihedus ρ_f (Mg/m ³)
Lubjakivi filler 1	destilleeritud vesi	0,99707	0/0,125	2,76
Kustutatud lubi				2,26
Lubjakivi filler 2				2,74
Paetolm				2,67
Graniiditolm				2,66

Joonis 3.5 Osakeste sisaldus



Fillerite osakeste tiheduse näitajad on, ühtlaselt samad v.a kustutatud lubjal. Tulemused jäävad vahemikku 2,26 – 2,76 Mg/m³. Tiheduse leidmiseks kasutati destilleeritud vett ning vedelikku mille tihedus on 0,99707 Mg/m³. Kuna osakeste näivtiheduse tulemus peab olema deklareeritud ja antud vahemik ei tohi ületada 0,2 Mg/m³, siis antud materjalide puhul pidas see paika (tabel 3.9 ja tabel 3.4).

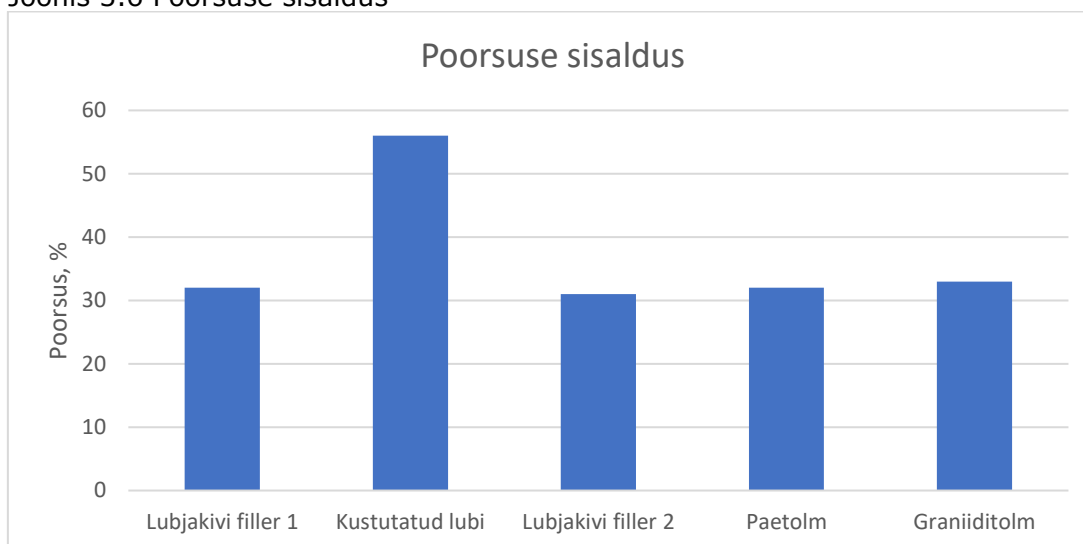
3.5 Poorsuse määramine

Tabelis 3.5 on esitatud materjalide poorsuste tulemused, mis määrati vastavalt EVS-EN 1097-4 katsestandardi järgi.

Tabel 3.5 Poorsuse määramine

Materjal	Katsefraktsioon (mm)	Poorsus, v (%)
Lubjakivi filler 1	0/0,125	32
Kustutatud lubi		56
Lubjakivi filler 2		31
Paetolm		32
Graniiditolm		33

Joonis 3.6 Poorsuse sisaldus



Poorsuse protsendi näitajad on neljal materjalil ühtlaselt samad, aga olulisel määral suurema tulemusega on kustutatud lubi, mille näitajaks on 56%. Kuivalt tihendatud filleri poorsuse tulemus peab jääma vahemikku 28 – 38% ja tulemus peab olema deklareeritud täpsusega $\pm 2\%$. Vaadates tulemusi tabelis 3.5, jäid kõik fillerid antud lubatud piiridesse peale kustutatud lubja.

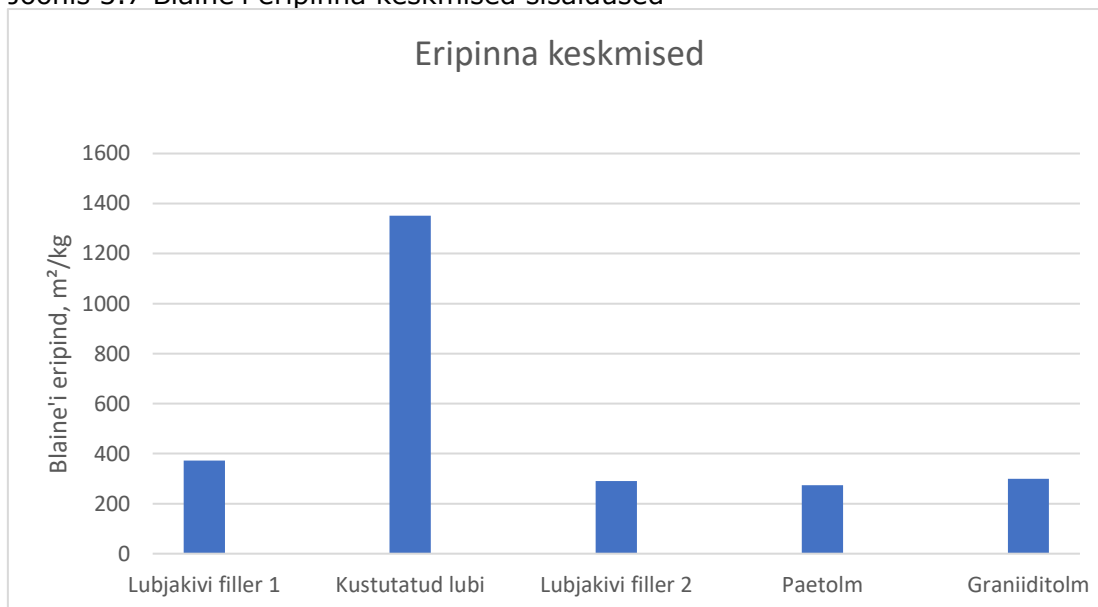
3.6 Eripinna määramine

Tabelis 3.6 on esitatud materjalide eripinna tulemused, mis määrati vastavalt EVS-EN 196-6 katsestandardi järgi.

Tabel 3.6 Eripinna määramine Blaine'i katsel

Materjal	Blaine'i eripind, m ² /kg	
	üksik	keskmine
Lubjakivi filler 1	373	373
	373	
Kustutatud lubi	1349	1351
	1352	
Lubjakivi filler 2	290	291
	291	
Paetolm	273	274
	275	
Graniiditolm	299	300
	301	

Joonis 3.7 Blaine'i eripinna keskmised sisaldused



Blaine'i eripinna üksikproovide puhul on üksikproovide väärtused vahemikus 273 – 1352 m²/kg ja kahe proovi keskmised tulemused jäävad vahemikku 274 – 1351 m²/kg. Peale kustutatud lubja võib teiste fillerite tulemusi pidada ühtlaseks. Kustutatud lubja tulemused erinevad teistest ligi neli korda. Blaine'i eripinna deklareeritud vahemik ei tohi olla suurem kui 140 m²/kg.

Tabelis 3.7 on esitatud ehitustsemendi tiheduse ja eripinna tulemused, mis määrati vastavalt EVS-EN 196-6 katsestandardi järgi.

Tabel 3.7 Ehitustsemendi tiheduse ja eripinna määramine

Tihedus, Mg/m ³		Eripind, m ² /kg	
üksik	keskmine	üksik	keskmine
3,01	3,01	368	368
3,00		368	

Määramiste korduvus standardhälve: eripind – 5 m²/kg

Tabelis 3.8 on esitatud peenmaterjali karbonaatide sisalduse ja eripinna tulemused, mis määrati vastavalt EVS-EN 196-2 ja EVS-EN-6 katsestandardite järgi.

Tabel 3.8 Peenmaterjali karbonaatide sisalduse ja eripinna määramine

Tihedus, Mg/m ³		Eripind, m ² /kg		Sisaldus, %		
üksik	keskmine	üksik	keskmine	CaO		CaCO ₃
				üksik	keskmine	
2,70	2,70	345	345	43,50	43,56	77,75*
2,69		344		43,62		

*Tulemus arvutati keemise koostise järgi järgmise valemiga: CaCO₃ = CaO x 1,7848
Määramiste korduvus standardhälve: CaO – 0,15% ja eripind – 5 m²/kg

3.7 Delta ring- ja kuulkatse tulemused

Käesolevas peatükis tuuakse välja statistilised seosed fillerite erinevate omaduste ja delta kuul- ja rõngakatse vahel, mille järgi võiks ühe omaduse põhjal kaudselt hinnata teisi filleri omadusi.

Kuna katsetati kahte erinevat bituumenit (70/100 ja 160/220), siis delta kuul- ja rõnga katse kui ka pehmenemistäpi tulemusi on kaks.

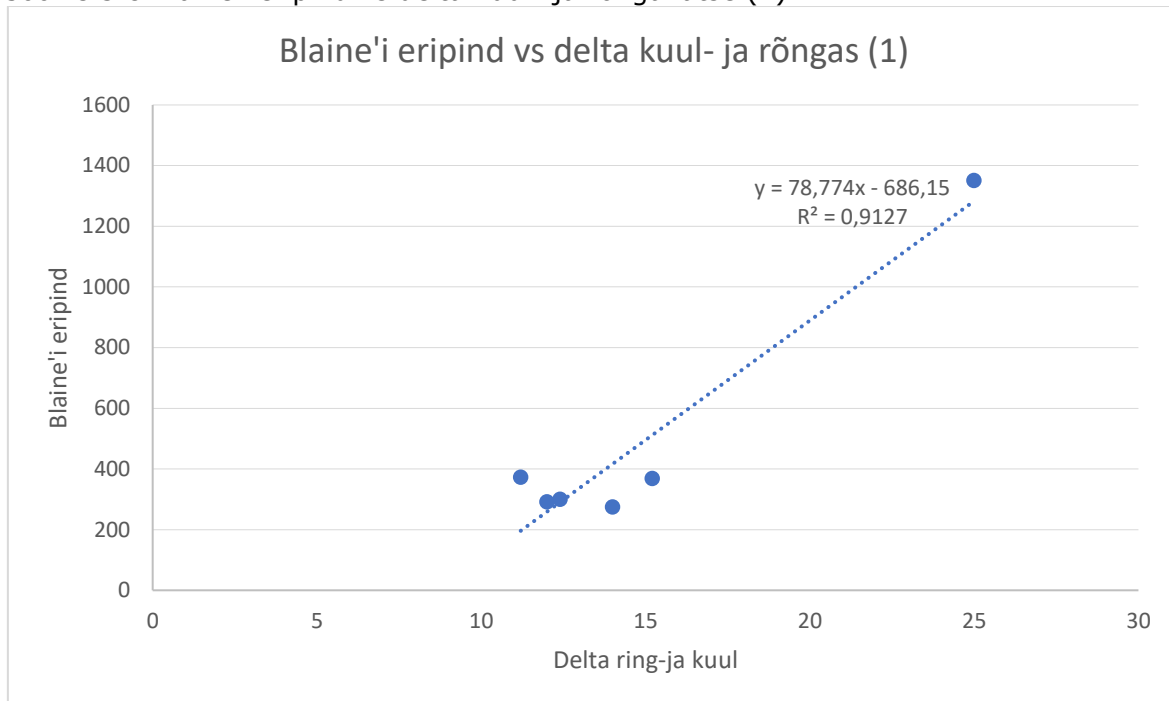
Bituumeniga 70/100 tehtud tulemused kajastuvad tabelis delta R&B (1) (tabel 3.9) ja bituumeniga 160/220 tehtud tulemused kajastuvad tabelis delta R&B (2).

Tabel 3.9 Delta kuul- ja rõngakatse

Materjal	Tihedus, Mg/m ³	Täitematerjali (mf) mass, g	Delta R&B (1)	Delta R&B (2)
Lubjakivi filler 1	2,76	32,3	11,2	11,8
Kustutatud lubi	2,26	26,5	>25	>25
Lubjakivi filler 2	2,74	32,1	12,0	11,2
Paetolm	2,67	31,3	14,0	9,0
Graniiditolm	2,66	31,1	12,4	14,0
Lubjakivi filler 3	2,70	31,6	12,2	11,4
Tsement	3,01	35,2	15,2	11,8
Graniiditolm (0,5), Lubjakivi filler 1 (0,5)	2,71	31,7 (15,9)	14,2	12,4
Graniiditolm (0,5), Lubjakivi filler 3 (0,5)	2,68	31,4 (15,7)	15,2	11,6
Graniiditolm (0,5), Lubjakivi filler 2 (0,5)	2,70	31,6 (15,8)	9,6	11,0
Graniiditolm (0,8), Kustutatud lubi (0,2)	2,58	30,2 (24,2+6)	20,2	13,0
Graniiditolm (0,8), Tsement (0,2)	2,73	32 (25,6+6,4)	15,4	11,6

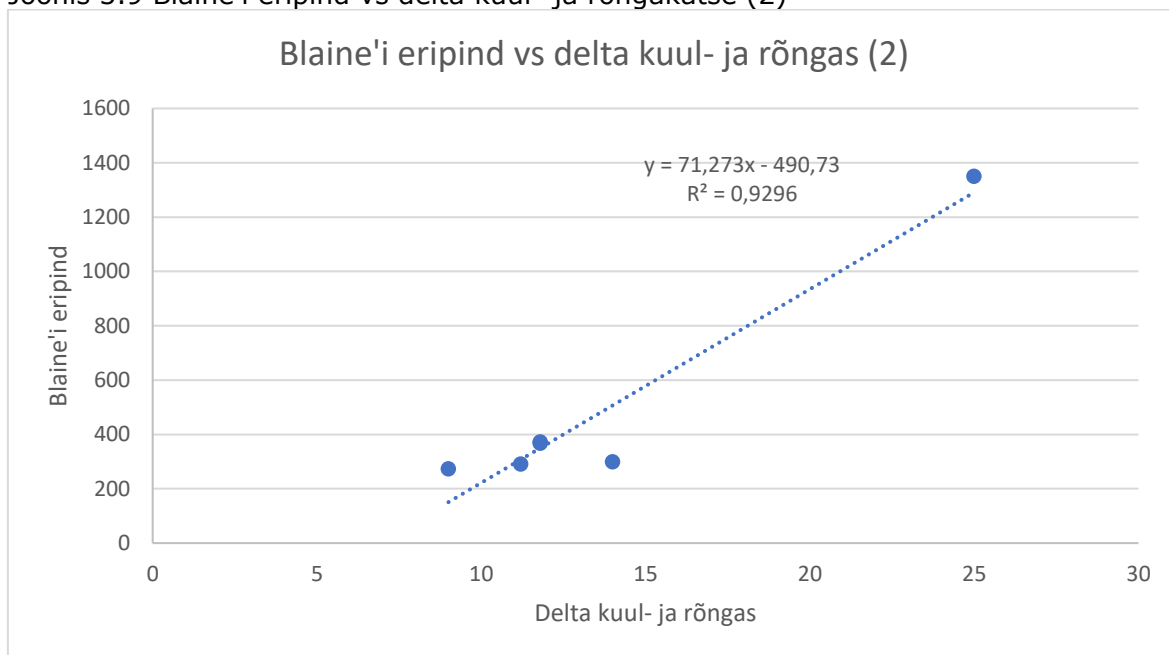
Joonisel 3.8 on näidatud Blaine'i eripinna ja delta kuul- ja rõngakatse seos, kus kasutati bituument 70/100. Graafikus järeldeb, et Blaine'i eripinna ja delta kuul- ja rõngakatsel on omavahel tugev seos.

Joonis 3.8 Blaine'i eripind vs delta kuul- ja rõngakatse (1)



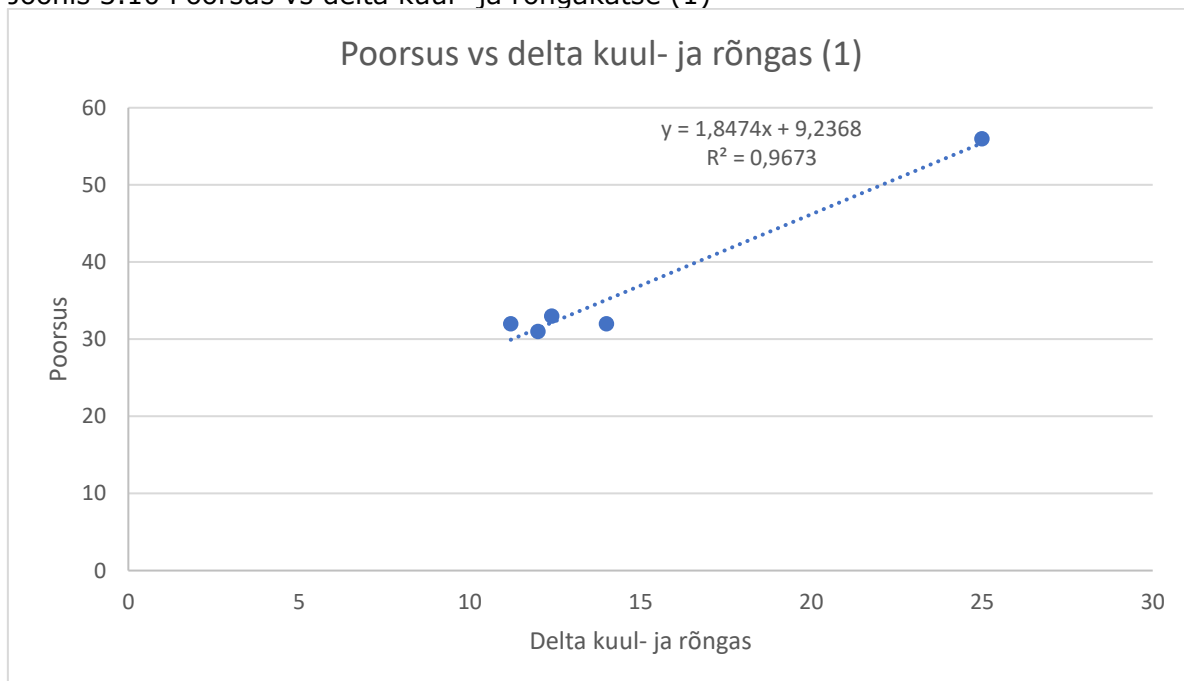
Joonisel 3.9 on näidatud Blaine'i eripinna ja delta kuul- ja rõngakatse seos, kus kasutati bituument 160/220. Nagu jooniselt 3.8 oli näha, et seos oli tugev, siis samuti joonisel 3.9 välja toodud tulemusest võib välja lugeda, et nii sitke kui ka pehmema bituumentiga on tulemused head.

Joonis 3.9 Blaine'i eripind vs delta kuul- ja rõngakatse (2)



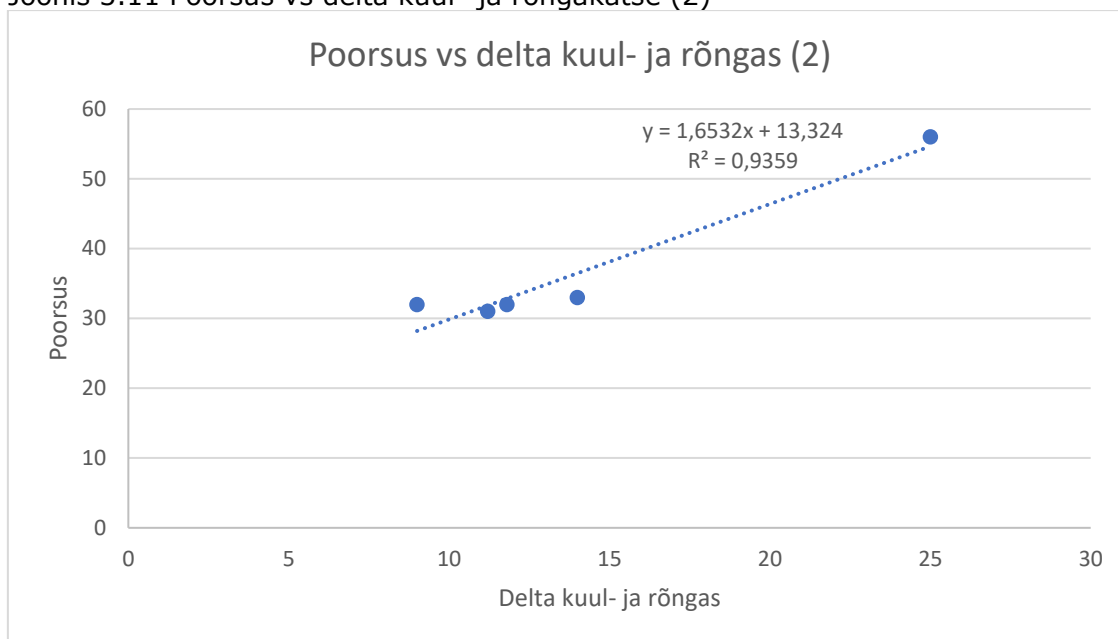
Joonisel 3.10 on välja toodud filleri poorsuste ja delta kuul- ja rõngakatse tulemuste seos, kus kasutati bituumenit 70/100. Poorsuse ja delta kuul- ja rõngakatse tulemuste vahel on tugev seos.

Joonis 3.10 Poorsus vs delta kuul- ja rõngakatse (1)



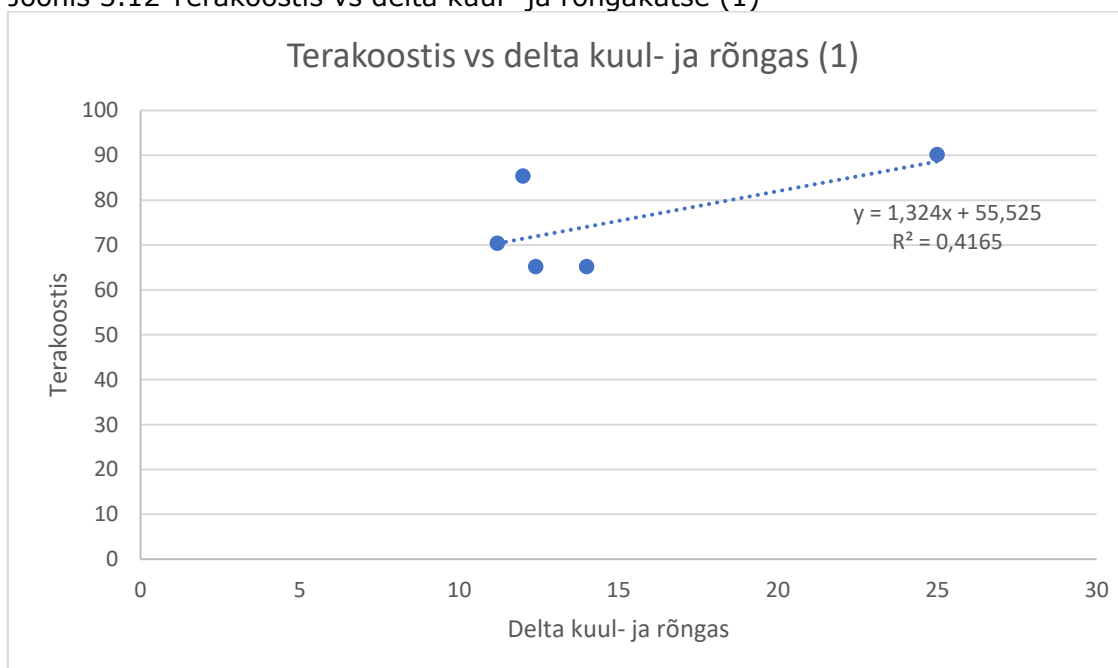
Joonisel 3.11 on välja toodud filleri poorsuse ja delta kuul- ja rõngakatse seos, kus kasutati bituument 160/220. Jooniselt on näha, et nende omavaheline seos on tugev.

Joonis 3.11 Poorsus vs delta kuul- ja rõngakatse (2)

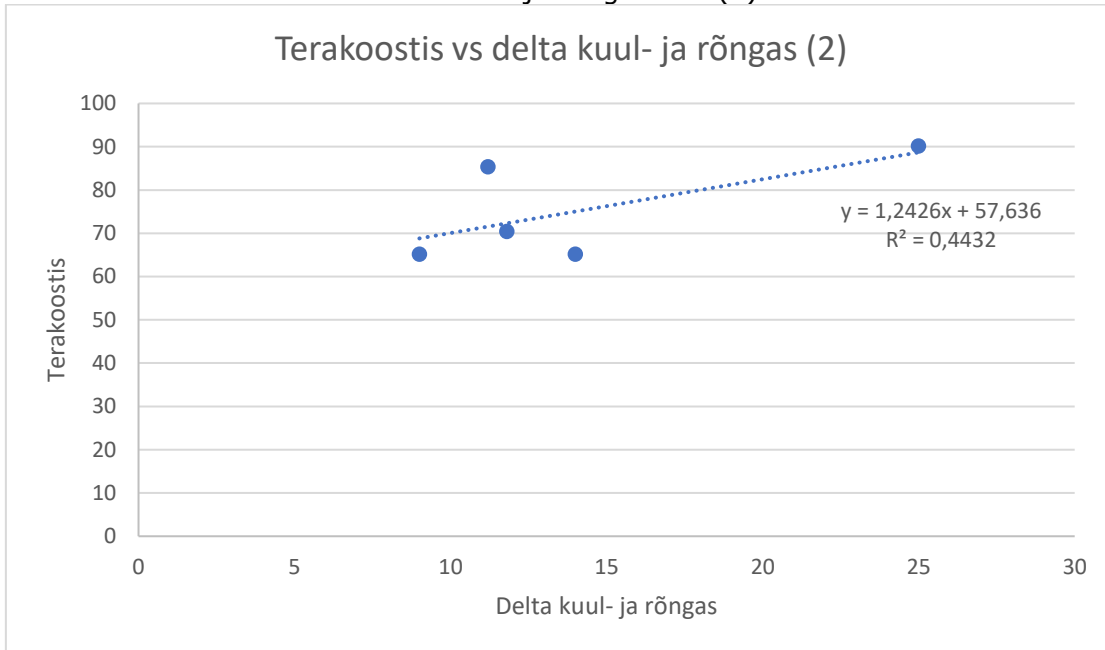


Joonisel 3.12 ja 3.13 on välja toodud terakoostise ja delta kuul- ja rõngakatse seoses. Mõlemad seosed on pigem nõrgad.

Joonis 3.12 Terakoostis vs delta kuul- ja rõngakatse (1)

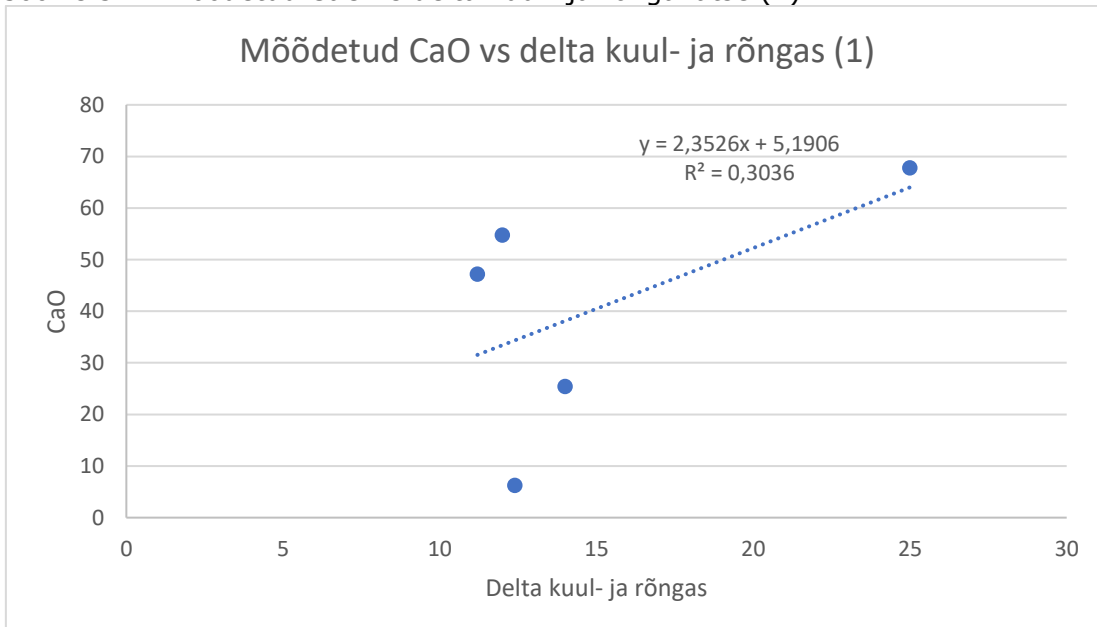


Joonis 3.13 Terakoostis vs delta kuul- ja rõngakatse (2)

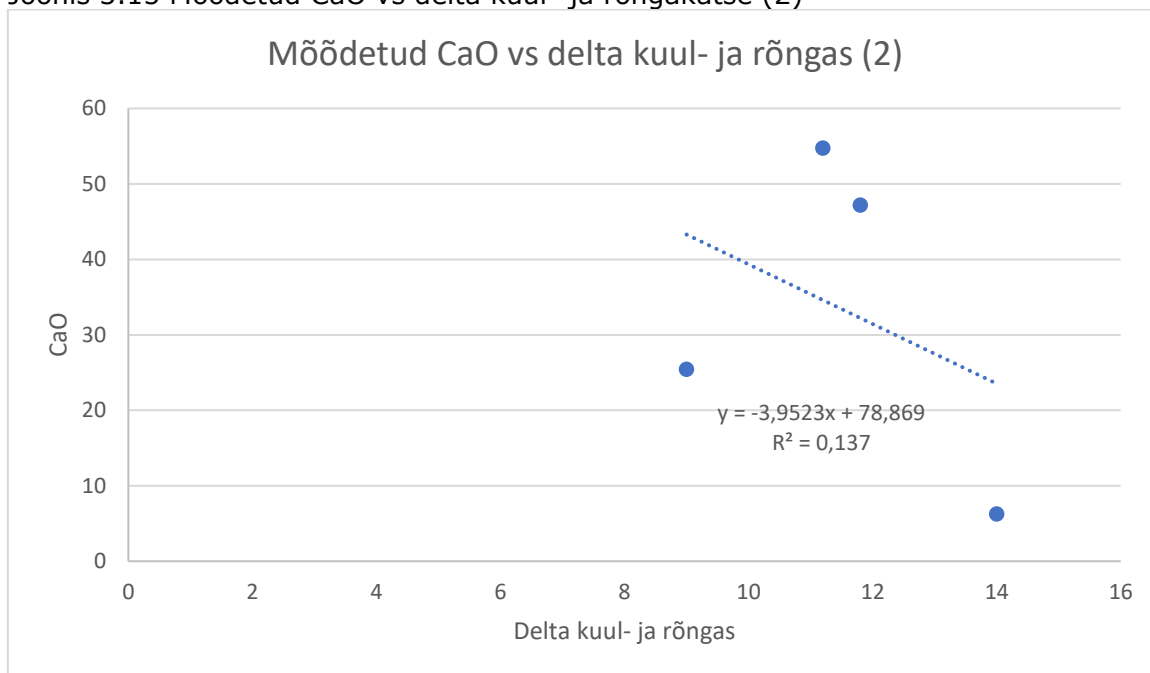


Joonisel 3.14 ja 3.15 on välja toodud mõõdetud CaO ja delta kuul- ja rõngakatse seosed. Mõlemalt jooniselt saab välja lugeda, et omavahelised seosed on väga nõrgad.

Joonis 3.14 Mõõdetud CaO vs delta kuul- ja rõngakatse (1)

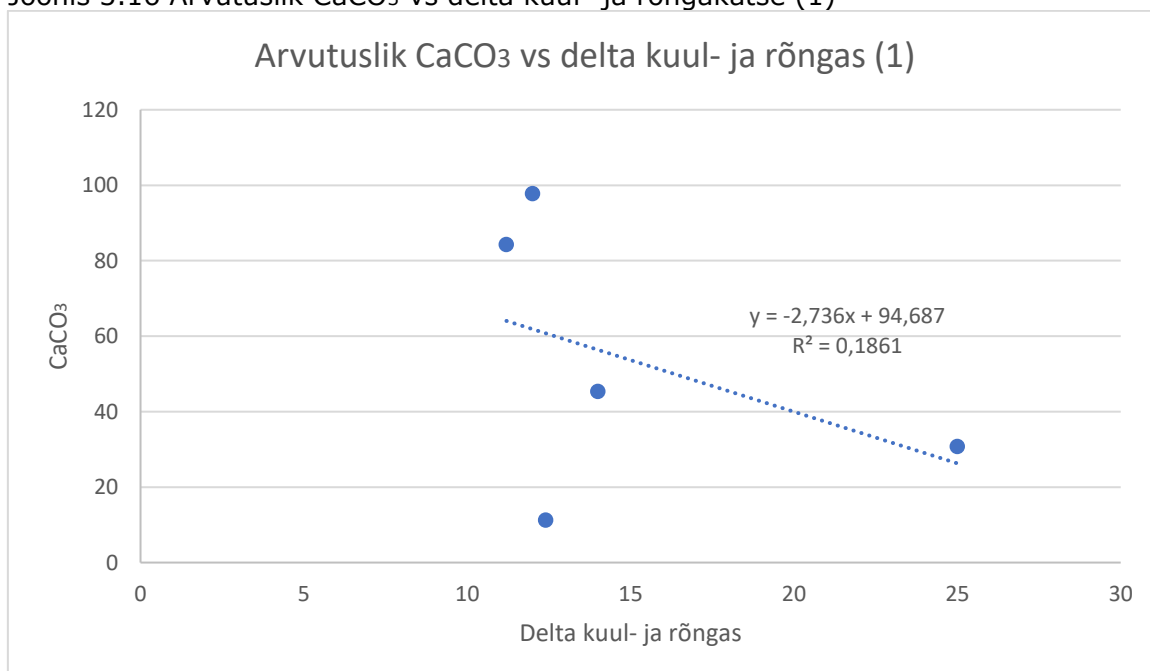


Joonis 3.15 Mõõdetud CaO vs delta kuul- ja rõngakatse (2)



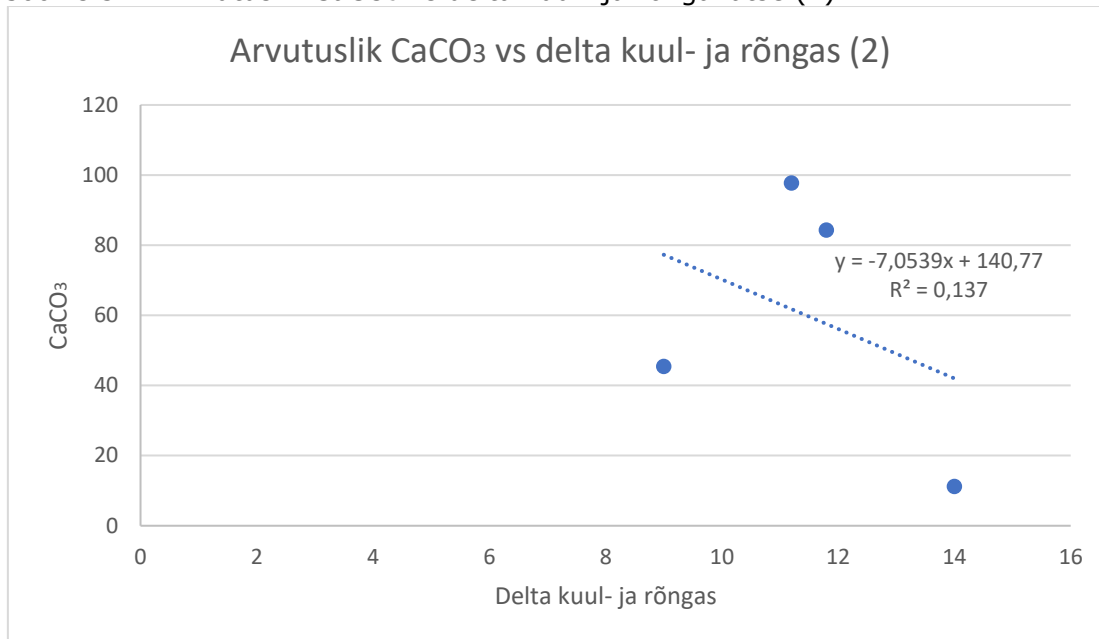
Joonisel 3.16 on välja toodud arvutusliku CaCO_3 ja delta kuul- ja rõngakatse seos, kus kasutati bituumenit 70/100. Nagu tabelis 3.2 oli näha, et CC70 nõude täitsid lubjakivi fillerid, siis antud delta kuul- ja rõngakatse tulemustega mingisugust seost ei esine.

Joonis 3.16 Arvutuslik CaCO_3 vs delta kuul- ja rõngakatse (1)



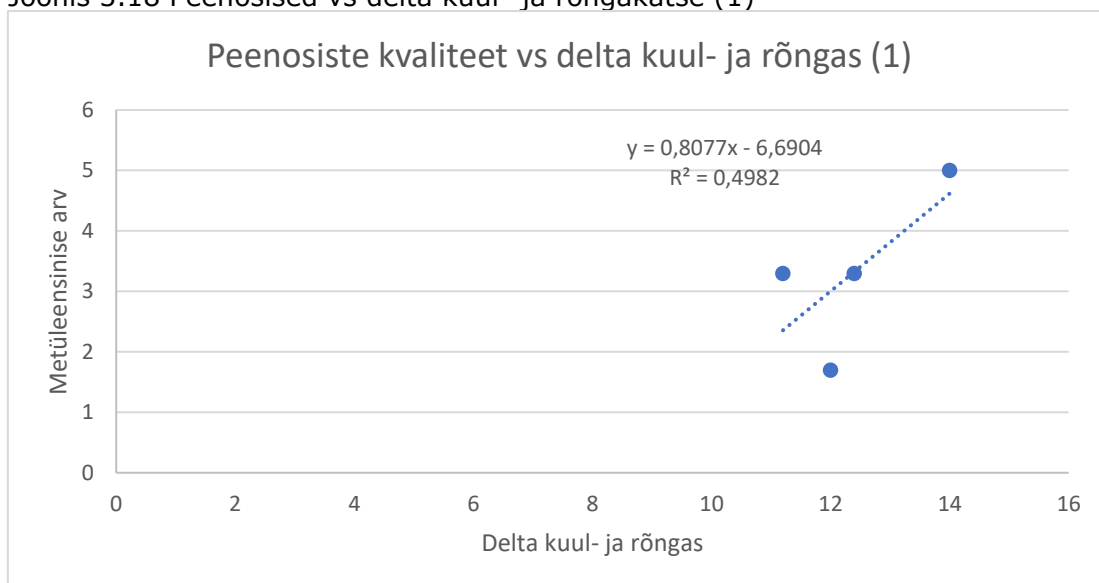
Joonisel 3.17 on välja toodud arvutuslik CaCO₃ ja delta kuul- ja rõngakatse seos, kus kasutati bituumenit 160/220. Nagu joonisel 3.15, kus kasutati bituumenit 70/100, ei ole ka arvutuslikul CaCO₃-l mingisugust suurt seost delta kuul- ja rõngakatse tulemustega.

Joonis 3.17 Arvutuslik CaCO₃ vs delta kuul- ja rõngakatse (2)



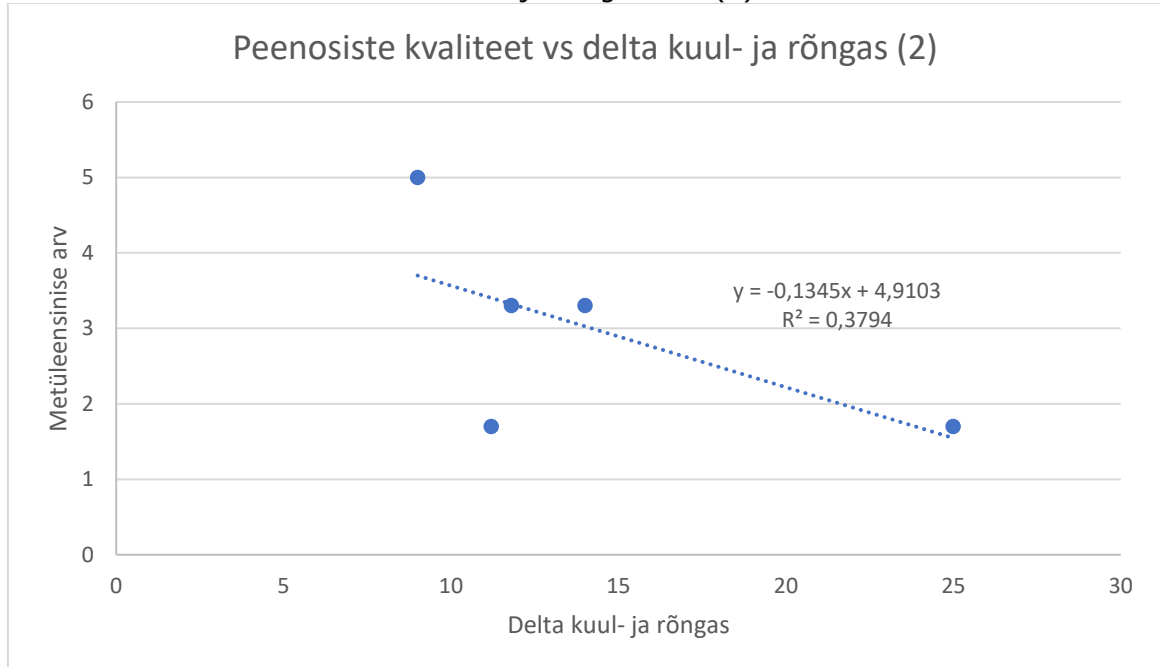
Joonisel 3.18 on näidatud metüleensinise ja delta kuul- ja rõngakatse seos, kus katsetati bituumenit 70/100. Graafikult on näha, et omavahel peenosiste sisaldusel ja delta kuul- ja rõngakatsel puudub seos.

Joonis 3.18 Peenosised vs delta kuul- ja rõngakatse (1)



Joonisel 3.19 näitub metüleensinise ja delta kuul- ja rõngakatse seos, kus kasutati bituumenit 160/220. Võrreldes seost joonisega 3.17, on seos pehme bituumeniga parem, aga mitte tugev, vaid jääb siiski nõrgaks.

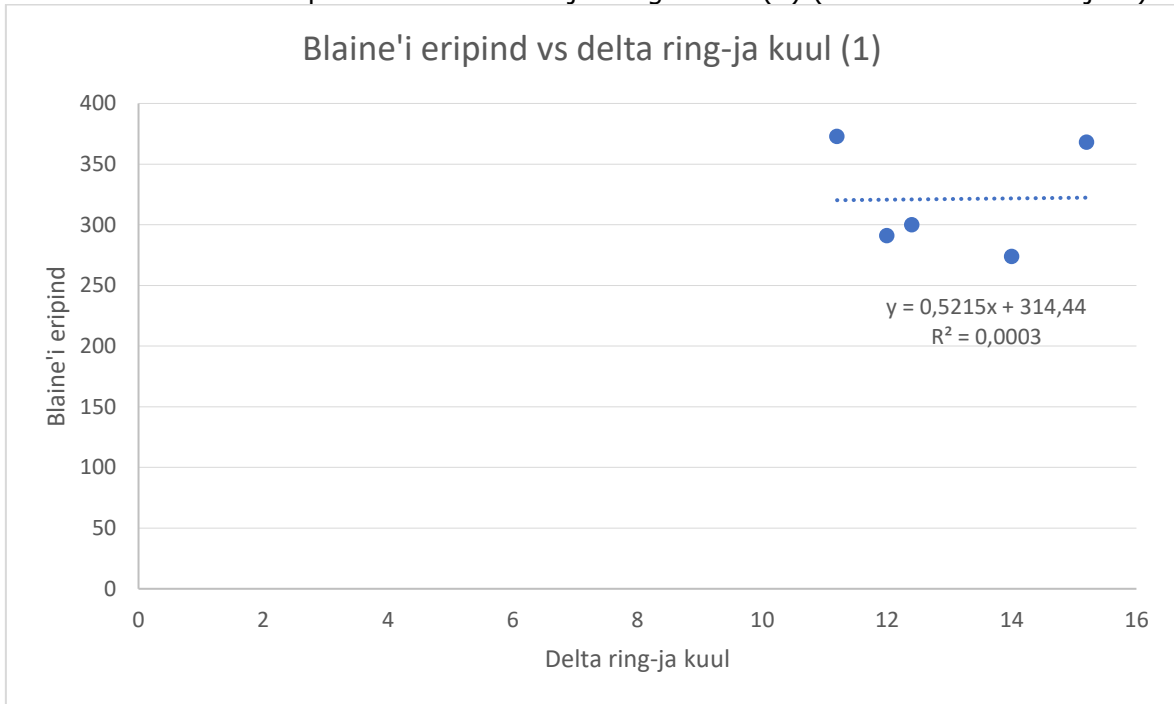
Joonis 3.19 Peenosised vs delta kuul- ja rõngakatse (2)



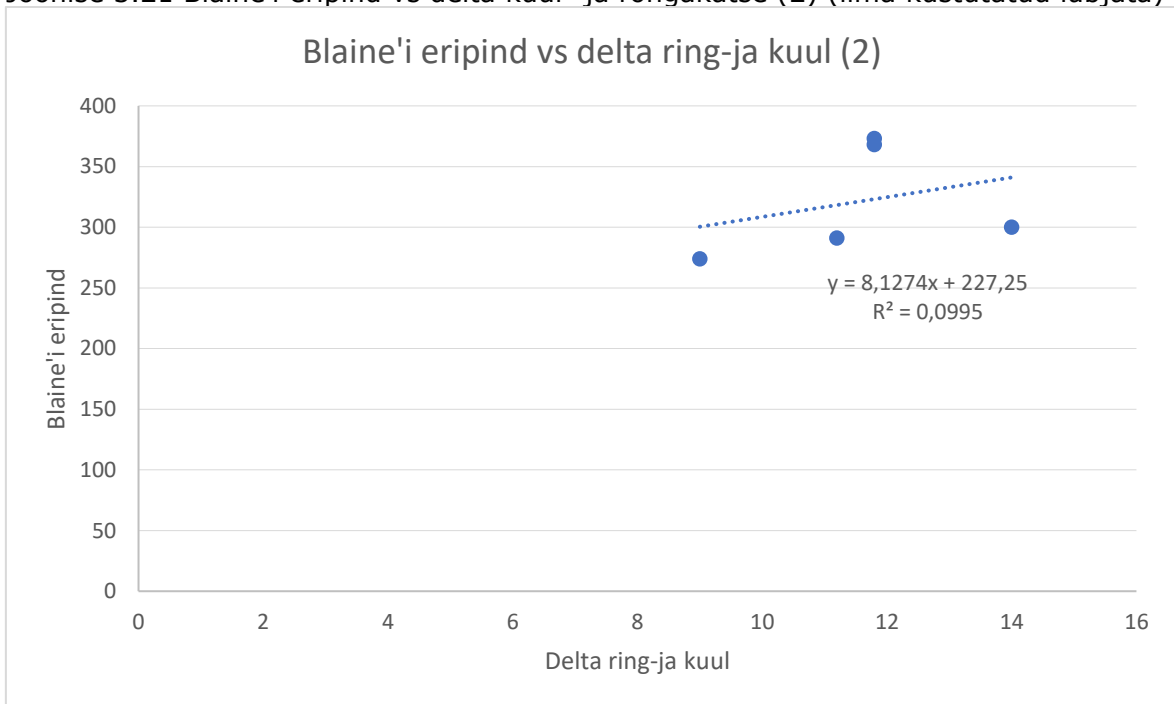
Tabelis 3.9 on kustutatud lubja mõlemad delta R&B (1) ja delta R&B (2) tulemused >25. Et saada täpsemat ülevaadet omavahelistes seostest, siis järgmistes joonistes ja analüüsidest kustutatud lubja tulemusi ei kajastu.

Kui vaadata alljärgnevaid jooniseid tuleb välja, et kustutatud lubja välja võtmine muutis seisuga kardinaalselt. Ei geomeetrisel, füüsikalistel ega keemilistel omadustel, samuti Blaine'i eripinnaga ei tekkinud delta kuul- ja rõngakatsel mitte mingisuguseid seoseid.

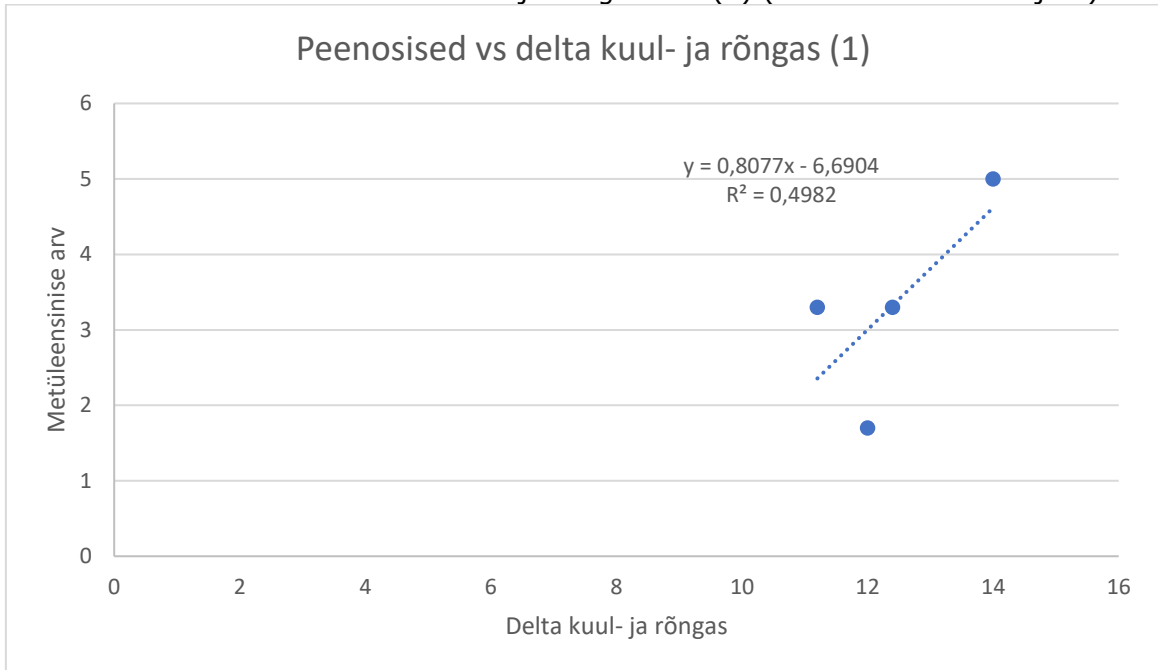
Joonis 3.20 Blaine'i eripind vs delta kuul- ja rõngakatse (1) (ilma kustutatud lubjata)



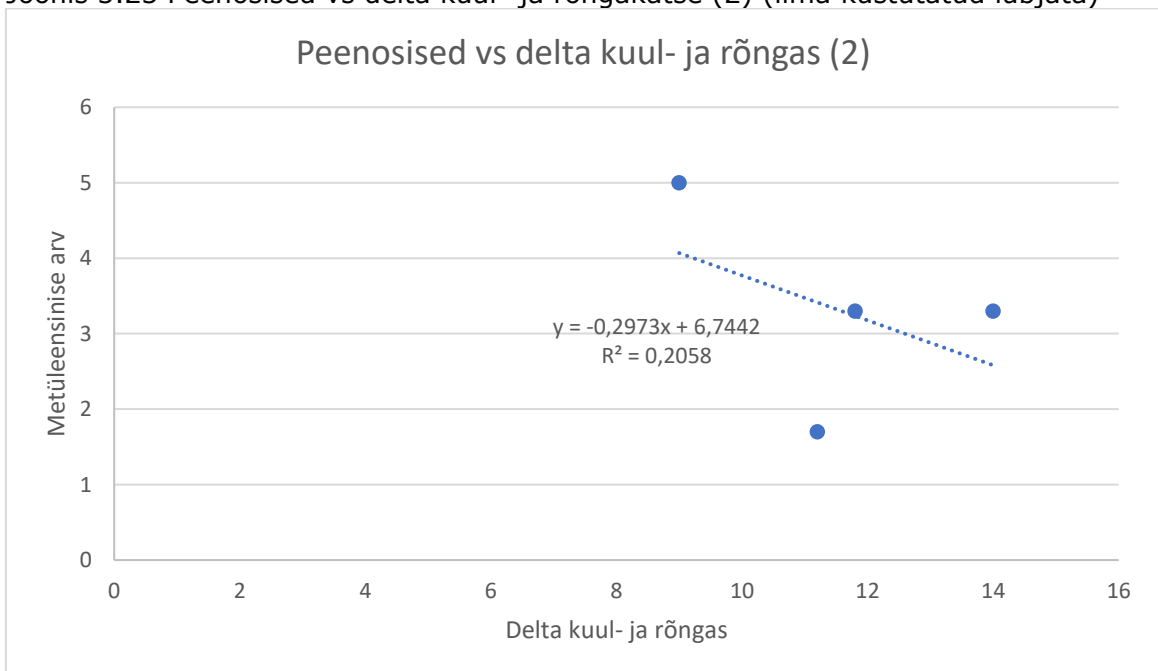
Joonise 3.21 Blaine'i eripind vs delta kuul- ja rõngakatse (2) (ilma kustutatud lubjata)



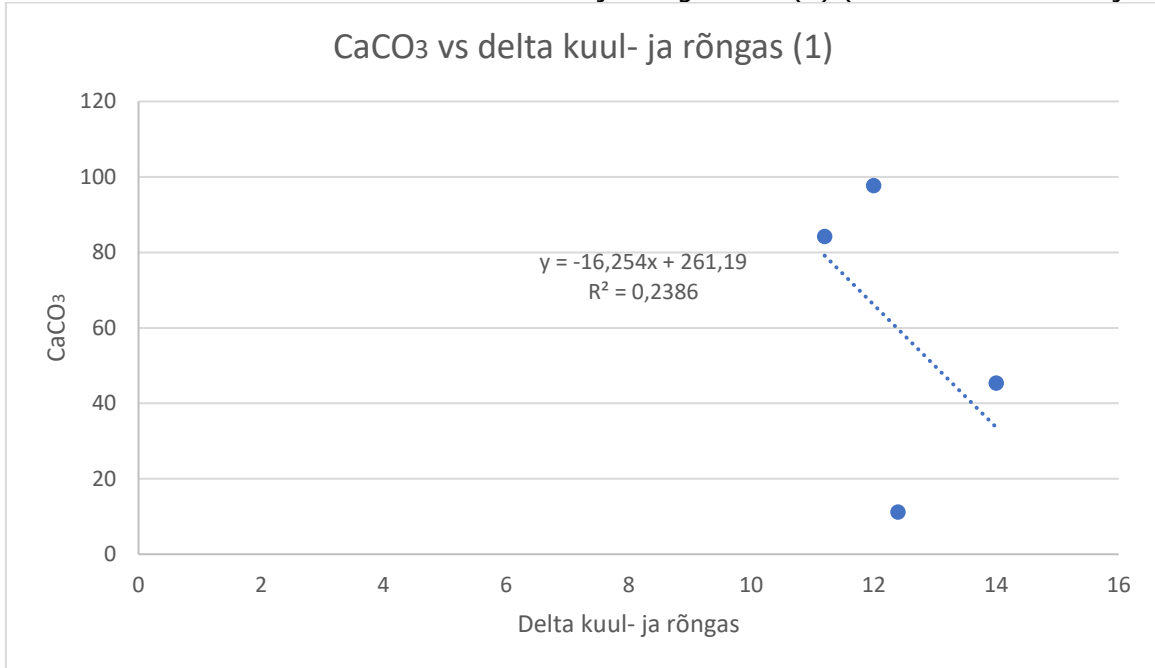
Joonis 3.22 Peenosised vs delta kuul- ja rõngakatse (1) (ilma kustutatud lubjata)



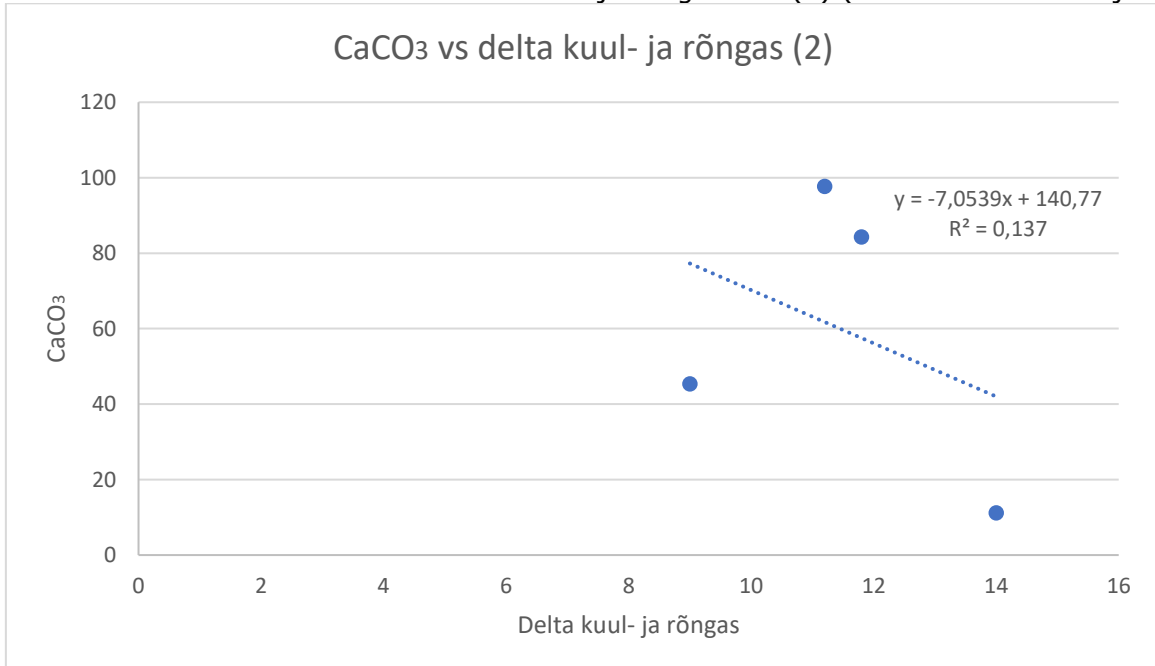
Joonis 3.23 Peenosised vs delta kuul- ja rõngakatse (2) (ilma kustutatud lubjata)



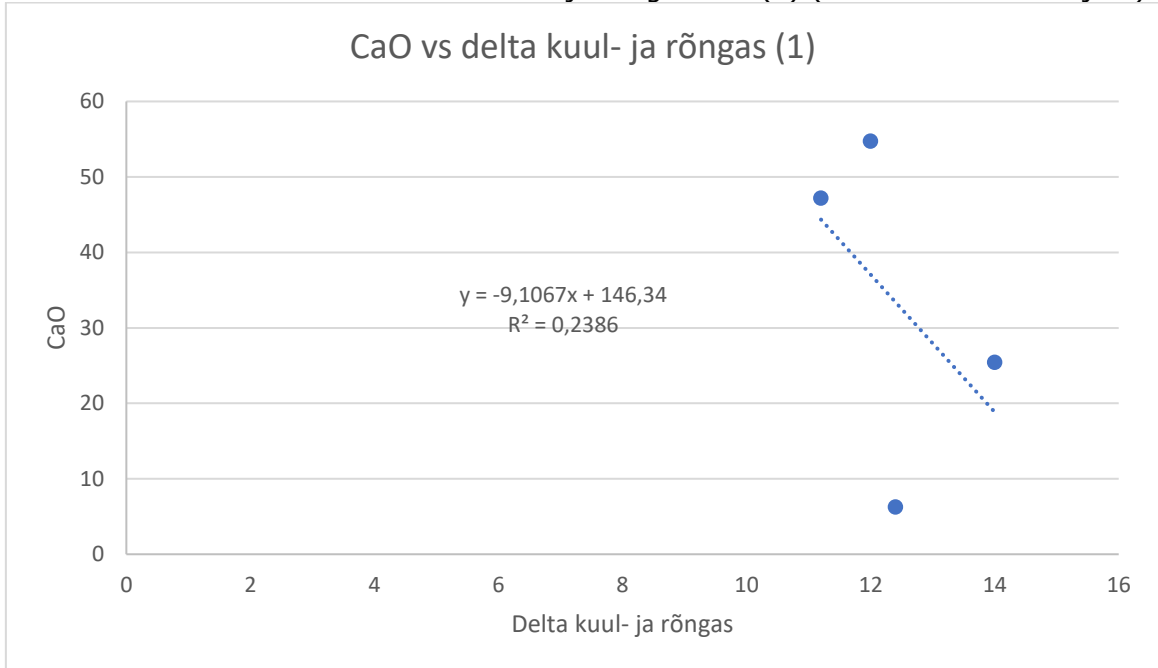
Joonis 3.24 Arvutuslik CaCO₃ vs delta kuul- ja rõngakatse (1) (ilma kustutatud lubjata)



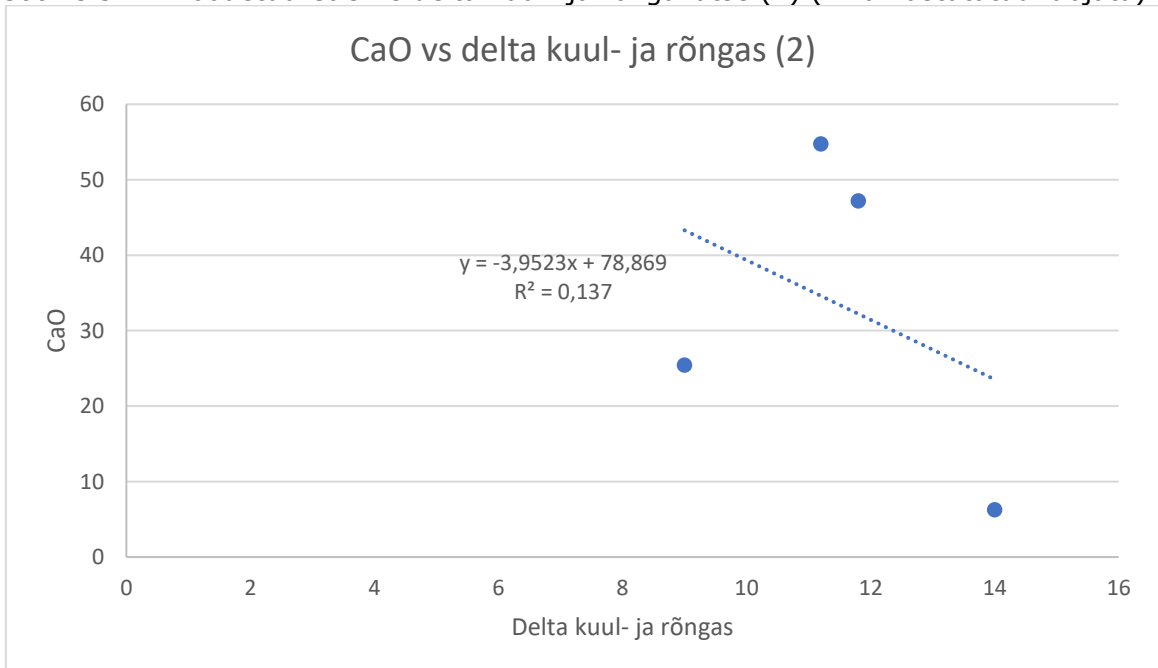
Joonis 3.25 Arvutuslik CaCO₃ vs delta kuul- ja rõngakatse (2) (ilma kustutatud lubjata)



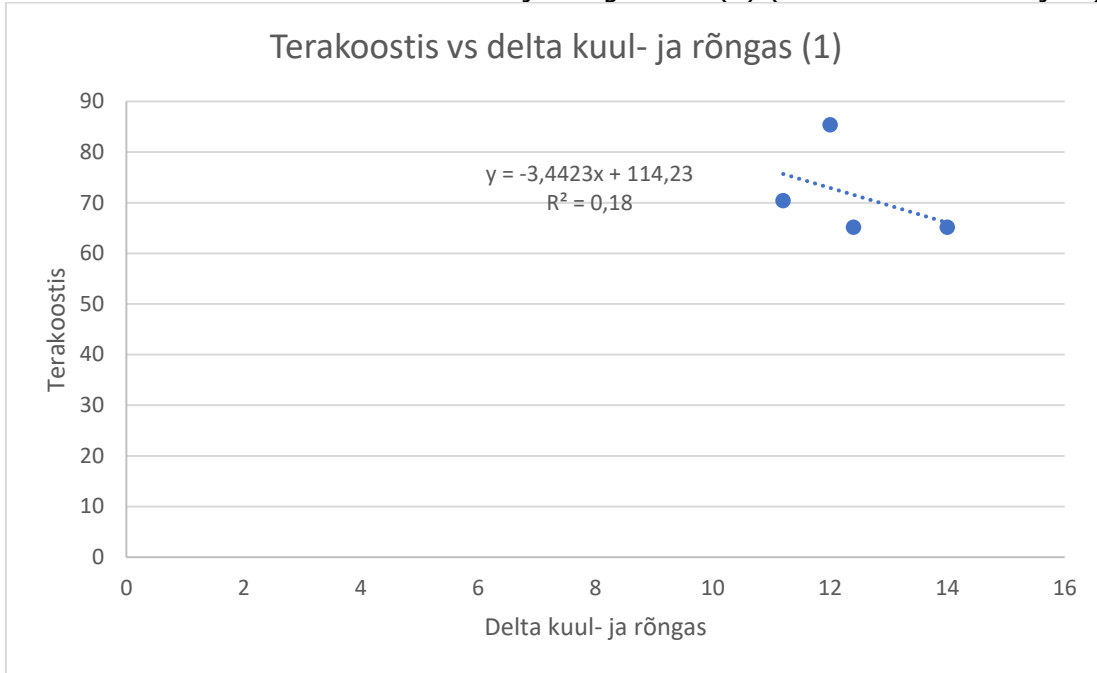
Joonis 3.26 Mõõdetud CaO vs delta kuul- ja rõngakatse (1) (ilma kustutatud lubjata)



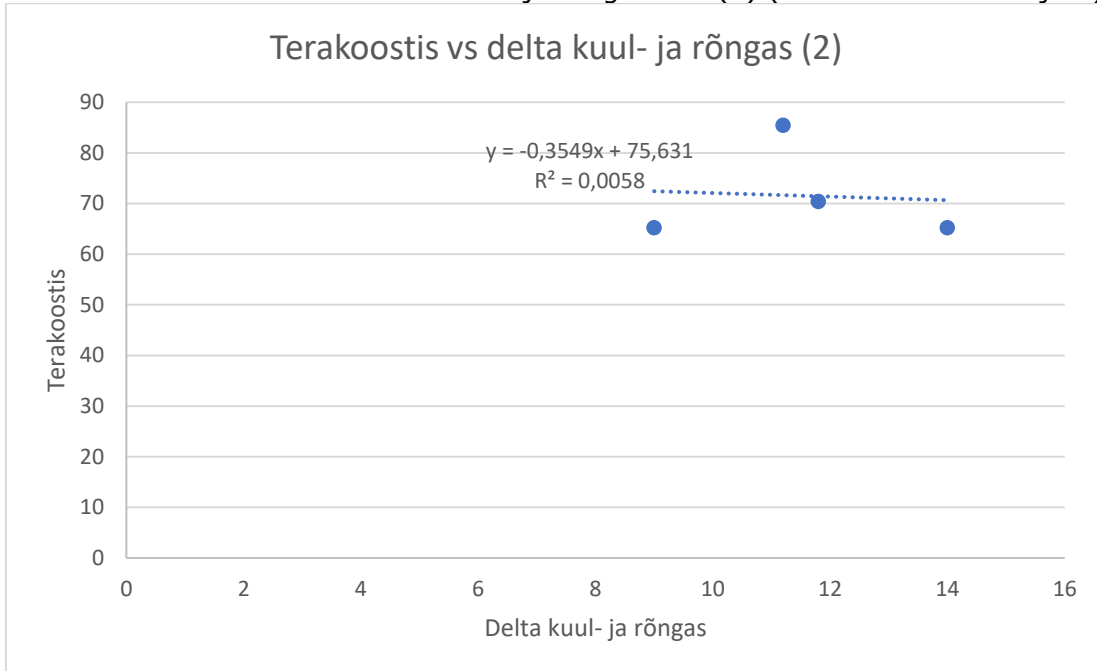
Joonis 3.27 Mõõdetud CaO vs delta kuul- ja rõngakatse (2) (ilma kustutatud lubjata)



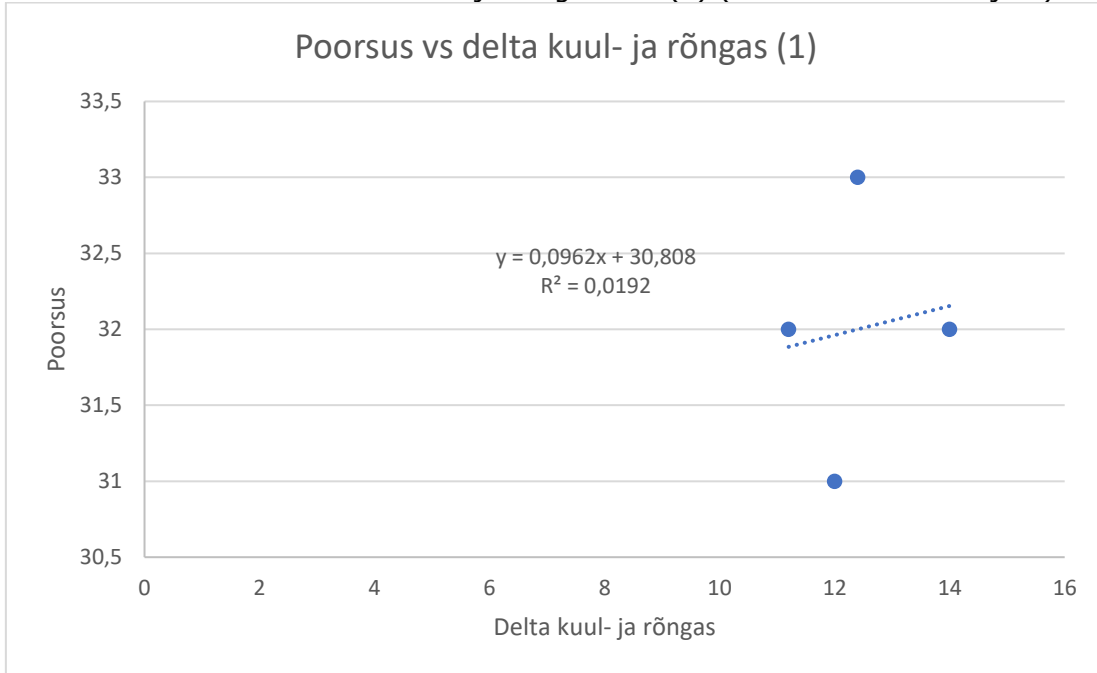
Joonis 3.28 Terakoostis vs delta kuul- ja rõngakatse (1) (ilma kustutatud lubjata)



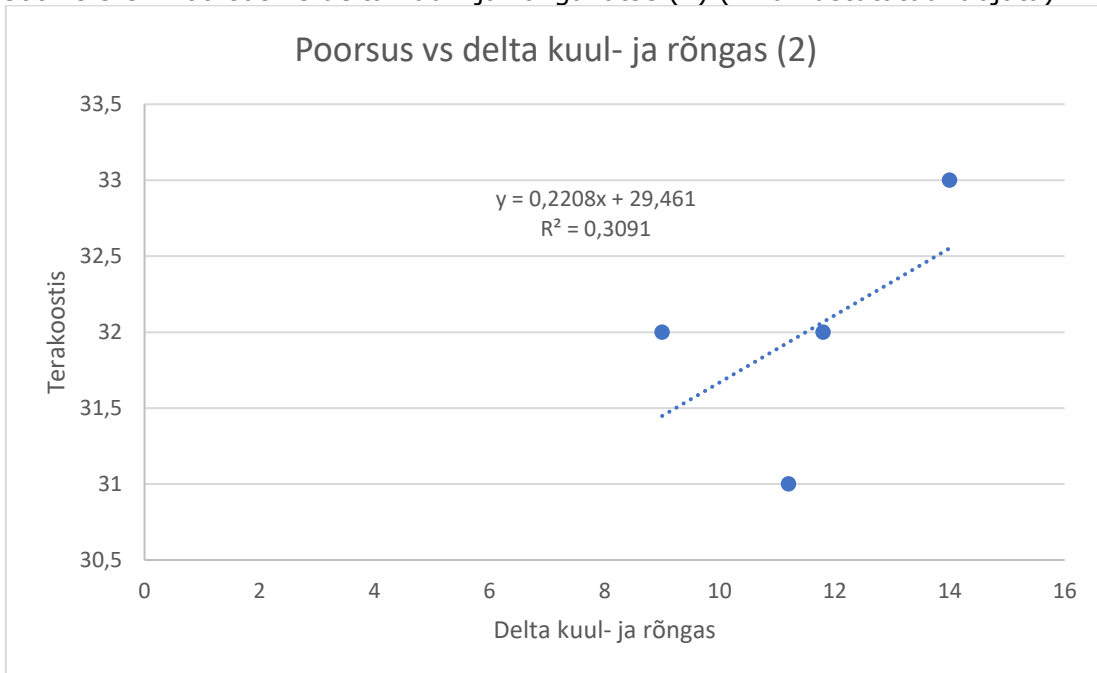
Joonis 3.29 Terakoostis vs delta kuul- ja rõngakatse (2) (ilma kustutatud lubjata)



Joonis 3.30 Poorsus vs delta kuul- ja rõngakatse (1) (ilma kustutatud lubjata)



Joonis 3.31 Poorsus vs delta kuul- ja rõngakatse (2) (ilma kustutatud lubjata)



3.8 Pehmenemistäpi tulemused

Kuna katsetati kahte erinevat bituumenit 70/100 ja 160/220, siis pehmenemistäpi tulemusi on kaks.

Sitkema bituumeniga 70/100 tehtud tulemused kajastuvad tabelis 3.10 pehmenemistäpp (1). Pehmema bituumeniga 160/220 tehtud tulemused kajastuvad tabelis 3.10 pehmenemistäpp (2).

Bituumeni pehmenemistäpp iseloomustab temperatuuri, mille juures eeldatakse, et bituumen muutub teekattes kasutuks ja ei ole võimeline vastu võtma liikluse poolt tekitatud jõudusid. Katse teostamise seisukohalt on tegemist temperatuuriga, mille juures bituumen ei suuda enam üleval hoida 3,5 grammise raskusega teraskuuli. Mida kõrgem on bituumeni pehmenemistäpp, seda parem on selle bituumeni vastupidavus plastsele deformatsioonile, higistamisele jne. [11]

Tabel 3.10 Pehmenemistäpi tulemused

Materjal	Pehmenemistäpp (1)	Pehmenemistäpp (2)
Lubjakivi filler 1	57,8	51,4
Kustutatud lubi	Tükkis*	Tükkis*
Lubjakivi filler 2	58,6	50,8
Paetolm	60,6	48,6
Graniiditolm	59,0	53,6
Lubjakivi filler 3	58,8	51,0
Tsement	61,8	51,4
Graniiditolm (0,5), Lubjakivi filler 1 (0,5)	60,8	52,0
Graniiditolm (0,5), Lubjakivi filler 3 (0,5)	61,8	51,2
Graniiditolm (0,5), Lubjakivi filler 2 (0,5)	56,2	50,6
Graniiditolm (0,8), Kustutatud lubi (0,2)	66,8	52,6
Graniiditolm (0,8), Tsement (0,2)	62,0	51,2

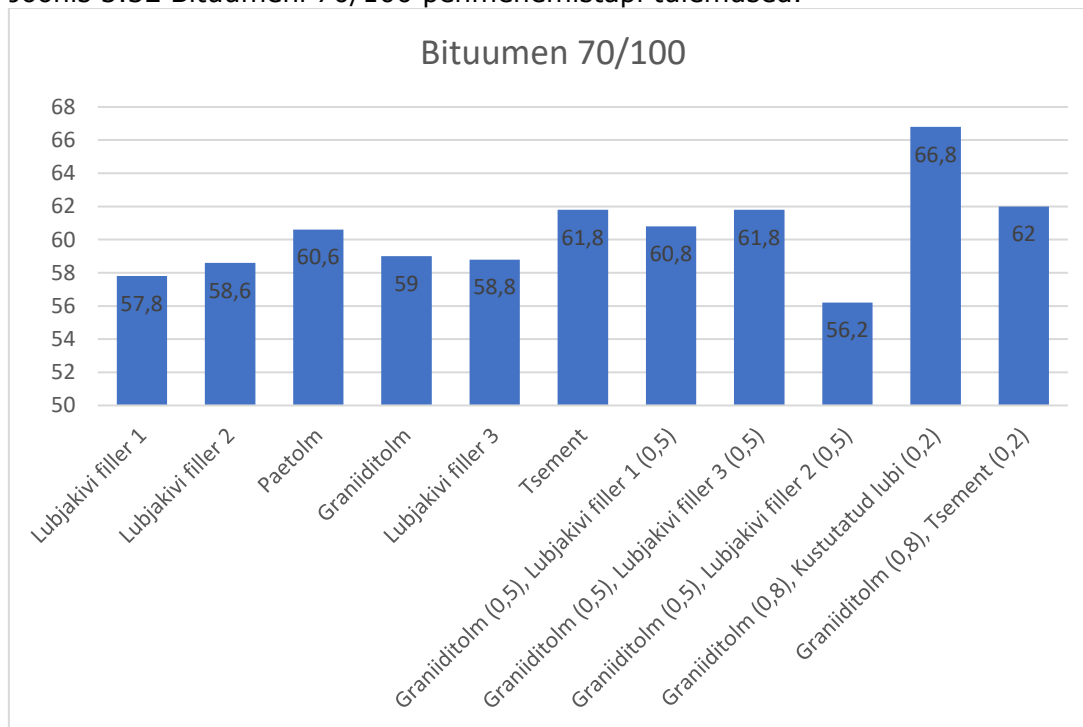
Märkus: *bituumen läks segamisel tükki ja ei olnud voolav

Kustutatud lubjaga pehmenemistäpi tulemust ei saanud ei 70/100 ega ka 160/220 bituumeniga. Kuna bituumen läks proovi segamise ajal tükki, siis ei olnud võimalik katset lõpuni teha. Teiste materjalidega probleeme ei olnud.

Joonisel 3.32 on välja toodud tulpdiaagrammina bituumeniga 70/100 pehmenemistäpi tulemused. Tulemused jäävad vahemikku 56,2 – 66,8 ning 11 proovi keskmine tulemus on 60,38° C. Teebituumeni standardi EVS 901-2 järgi peab penetratsiooniga 70-100 pehmenemistäpp jääma vahemikku 43 – 51° C. Seega bituumeniga 70/100 tulemused on kõrge temperatuurilised. Kui tulemusi üksikult võrrelda, siis peale kahe tulemuse on teised tulemused üpris samad. Kõige madalama tulemused andis segu, kus oli kokku segatud graniiditolm (0,5) ja lubjakivi filler (0,5) ning kõrgeima tulemuse segu kus oli

kokku segatud graniiditolm (0,5) ja kustutatud lubi (0,2). Kui kustutatud lubi läks segamise ajal tükki, siis koos teise materjaliga kokku segatuna andis see tunduvalt parema tulemuse kui teised.

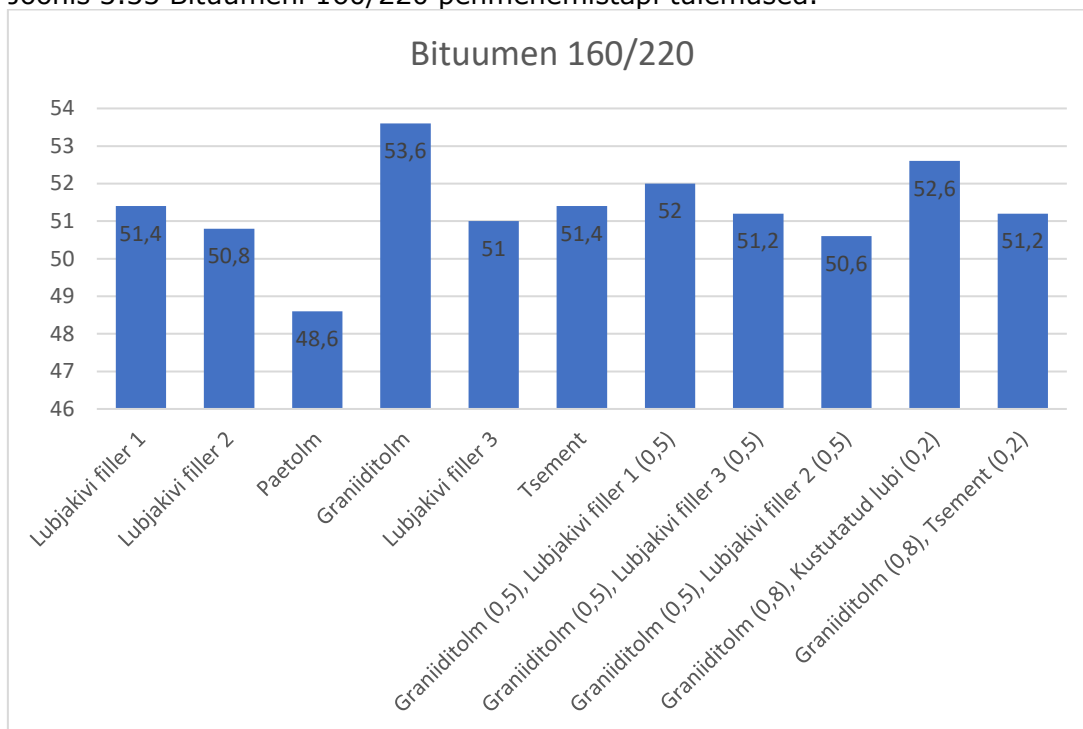
Joonis 3.32 Bituumeni 70/100 pehmenemistäpi tulemused.



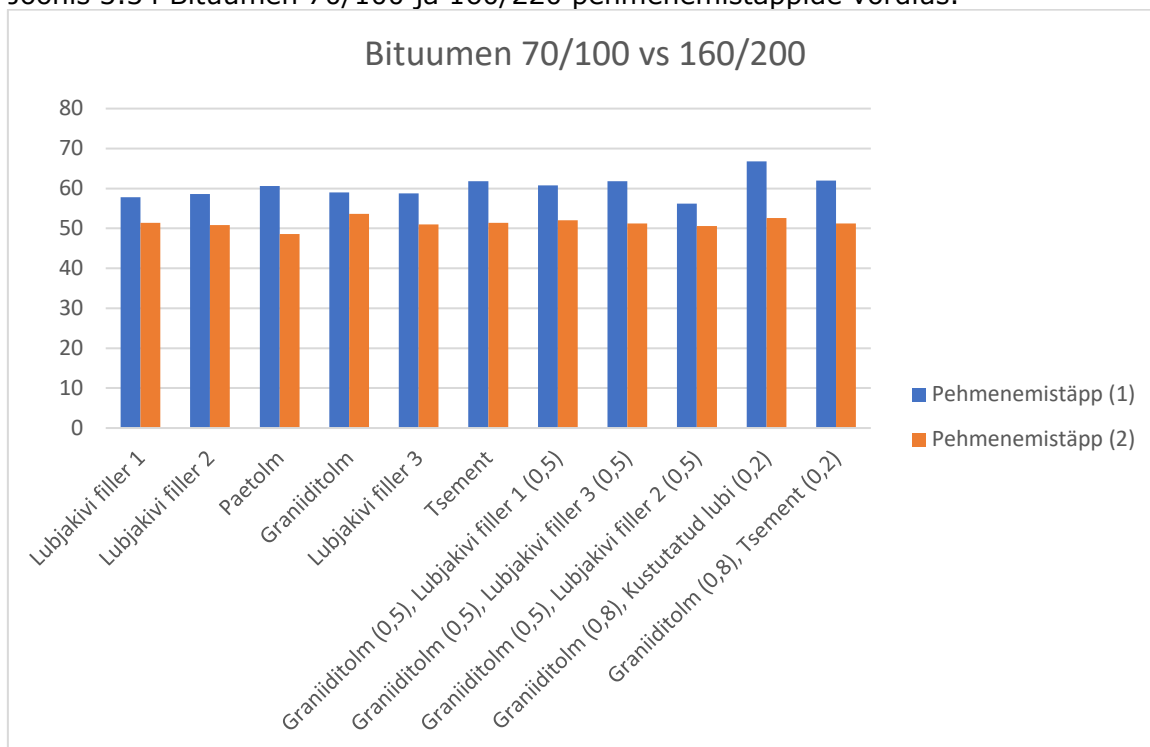
Joonisel 3.33 on välja toodud tulpdiagrammin pehme bituumeni 160/220 pehmenemistäpi tulemused. Tulemused jäävad vahemikku 48,6 – 53,6 ning 11 proovi keskmine tulemus on 51,31° C. Teebituumeni standardi EVS 901-2 järgi peaks penetratsiooniga 160 – 220 pehmenemistäpp jääma vahemikku 35 – 43° C. Seega ka bituumeni 160/220 tulemused on standardi nõuetest kõrgemad. Kui tulemusi üksikult võrrelda, on tulemused rohkem ühtlasemad kui sitkema bituumeniga. Madalaima tulemuse andis paetolm ning kõrgeima graniiditolm.

Joonisel 3.34 on võrreldud kahe bituumeni pehmenemistäpi tulemusi, 70/100 ja 160/220. Sitkema bituumeni 70/100 tulemused on pehmema bituumeni tulemustest kõrgemad. Keskmine erinevus on 9° C. Kõige suurem erinevus on materjalil, kus segatud graniiditolm (0,8) ja kustutatud lubi (0,2), 14,2° C. Teistel materjalidel tuli erinevuseks alla <10° C. Kuna kahe bituumeni tulemused omavahel erinesid, siis tuleks mõlemat bituumenit käsitleda individuaalselt.

Joonis 3.33 Bituumeni 160/220 pehmenemistäpi tulemused.



Joonis 3.34 Bituumeni 70/100 ja 160/220 pehmenemistäppide võrdlus.



KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli anda ülevaade kustutatud lubjast, mineraalsest pulbrist, mida kasutatakse asfaltsegudes väga aktiivselt USA-s ning teistes Euroopa riikides. Võrrelda kustutatud lupja teiste filleritega ning analüüsida tulemusi ja leida seoseid delta kuul- ja rõngakatsega. Lisaks katsetada kõiki fillereid kahe erineva bituumeniga, nii pehme kui ka sitkega.

Töö esimeses osas toodi välja, millised on nõuded fillerile Eestis ning kuidas fillereid määratletakse Euroopas. Toodi välja, milliseid mineraalseid pulbreid on katsetatud/proovitud. Kuna Eestil puudub kogemus kustutatud lubjaga, siis saame välja tuua teiste riikide inseneride kogemused. Kustutatud lubi parandab jäikust ja vähendab roobaste teket, on oivalt irdumisvastane aine, vähendab oksüdatsiooni ja vananemist ja vähendab pragunemist. Saksamaal tehti uuring, kus koguti maateelõigult andmeid pärast 2, 5 ja 11 aasta möödumist, eesmärgiga uurida asfaltbetoonkatte vananemist. Tulemus oli märkimisväärne. Prantsusmaal ja Belgias katsetati, milline mõju on kustutatud lubjal asfaltsegul niiskuskindlusele. Tulemustest on selgelt näha, et lubi võib niiskuskindlust parandada. Austrias uuriti, milline mõju on kustutatud lubjal sideaine jäigastumisele, võrdluses oli kaks erinevat lõiku. Lõigus kus segu sisaldas lupja olid tulemused paremad, kui lõigus kuhu seda polnud lisatud. Kõigi nende uuringute põhjal võib põhjendatult väita, et meil võiks kustutatud lubjast kasu olla.

Lõputöö teine osa, mis on antud töö kõige lühem osa, keskendus kahe põhilise katsetamismeetodi kirjeldusele: delta kuul- ja rõngakatsele ning pehmenemistäpi määramisele. Nendelt katsetelt saadud tulemustega otsiti seoseid teiste fillerite katsete tulemustega.

Lõputöö kolmandas osas tehti filleritele standardile nõutavad katsed, delta kuul- ja rõngakatse ning määrati bituumenitele pehmenemistäpp. Otsiti seoseid fillerite ühtsuse, füüsikaliste, keemiliste, geomeetriliste omaduste delta kuul- ja rõngakatse tulemuste vahel. Segudes, kus kustutatud lubi oli kaasatud oli seos olemas. Segudes, kus kustutatud lubi polnud sisse arvestatud ei tekkinud mingisuguseid seoseid. Seega delta kuul- ja rõngakatse tulemusi ei saa fillerite tulemuste põhjal ennustada.

Pehmenemistäpi tulemustes on näha, et kustutatud lubi läks segamisel tükki. Fillerite tulemused olid pigem kõrge temperatuurilised. Aga filler, mis oli kustutatud lubjaga eraldi kokku segatud, andis arvestatava tulemuse. Kindlasti ei saa kustutatud lubjal olla samad nõuded, mis lubjakivi filleril.

Kui vaadata tulemusi puhtalt võrdlusena kustutatud lubja ja teiste fillerite tulemustega nii keemilistes, füüsikalistes kui ka geomeetrilistes omadustes, siis võib väita, et kustutatud lubi on kindlasti materjal, mida Maanteeamet võiks kasutusse võtta.

Käesolev lõputöö annab ülevaate, milleks kasutatakse kustutatud lupja asfaltbetoonsegu. Teame, et see parandab jäikust ning vähendab irdumist, mõranemist, vananemist, roobaste teket ja pragunemist. Aga meie jaoks on see siiski täiesti tundmatu mineraalne pulber. Me võime teada ja tunda selle omadusi teoreetiliselt ning ka laboratoorsetelt katsetelt, aga milliste omadustega või ohtudega peame me arvestama asfaltbetoonsegu paigaldamisel, kuhu on lisatud kustutatud lupja? Kas kustutatud lubjaga asfaltbetoonsegu võib asfalditehases toota ka väiksemates kogustes või ainult suurtes? Kas see sobib ainult maanteedele, kus asfaldilaotur paigaldab sirget paani, või ka linnatänavatele, kus on palju raadiusi ning nurki?

SUMMARY

ADDING HYDRATED LIME TO HOT MIX ASPHALT

The objective of the thesis was to give an overview of hydrated lime, a mineral powder that is used in asphalt mixtures very actively in the USA and other European countries, to compare hydrated lime with other fillers and to analyze the results and find links with the delta ball and ring test. In addition, all fillers were tested with two different bitumens.

The first part of the work outlined the requirements for fillers in Estonia and how fillers are defined in Europe. I was covered which mineral powders have been tried / tested. As Estonia has no experience with hydrated lime, we can highlight the experience of engineers from other countries. Hydrated lime improves stiffness and reduces rutting, is an excellent anti-stripping substance, reduces oxidation and aging, and reduces cracking. In Germany, a study was carried out in which data were collected from a section of road after 2, 5 and 11 years. Objective was to study the aging of asphalt concrete pavement. The result was remarkable. In France and Belgium, the effects of hydrated lime on the moisture resistance of asphalt mixtures were tested. It is clear from the results that lime can improve moisture resistance. In Austria, the effect of lime binder oxidation was studied, comparing two different sections. In the section where hydrated lime was mixed, the results were better than in the section where no slaked lime was added. Based on all these studies, it is safe to say that we could benefit from hydrated lime.

The second part of the thesis, which is also the shortest part, focused on the two main experimental methods. Delta ball and ring test and determination of softening point. The results obtained from these experiments were used to find correlations between other filler test results.

In the third part of the thesis, the fillers were subjected to the tests required by the standard, delta ball and ring tests were performed, and the softening point of the bitumens were determined. Relationships between filler integrity, physical, chemical, geometric, and delta ball and ring test results were sought. In the comparison where hydrated lime was involved, there was a slight correlation. No links were found in the comparisons where hydrated lime was not included. Thus, the results of the delta ball and ring test cannot be predicted from the filler results.

The results of the softening point show that the hydrated lime merged during mixing and the results of the other fillers were rather high temperature. But the filler, which was mixed with the hydrated lime separately, gave a considerable result. Certainly hydrated lime cannot have the same requirements as limestone filler.

If we look at the results purely as a comparison of the results of hydrated lime and other fillers in chemical, physical or geometric terms, it can be said that hydrated lime is definitely a material that the Road Administration authorities could allow to use.

This thesis provides an overview of the use of hydrated lime in asphalt concrete mixes. We know that it reduces stripping, cracking, aging, improves stiffness and reduces the formation of cracks. But for us, it is still a completely unknown mineral powder. We can study and acknowledge its properties theoretically and also from laboratory experiments. But what properties or risks do we need to consider when applying to an asphalt concrete mix with added hydrated lime? How should the mix be produced in mixing plants: in minimal quantities or only in large quantities? Is it only suitable for roads where the asphalt paver installs a straight panel or also for city streets where there are many radial turns and corners?

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Eesti Standard EVS 901-1:2020 Tee-ehitus. Osa 1: Asfaltsegude ja pindamiskihtide täitematerjalid, Eesti Standardikeskus, 2020.
2. Eesti Standard EVS 901-1:2009 Tee-ehitus. Osa 1: Asfaltsegude täitematerjalid, Eesti Standardikeskus, 2009.
3. Eesti Standard EVS-EN 13043:2004, Asfaltsegude ning teede, lennuväljade ja muude liiklusalade pindamiskihtide täitematerjalid, Eesti Standardikeskus, 2004.
4. Lubjakivifilleri ja tardkivitolmu mõju erinevused asfaltsegu deformatsiooni- ja veekindlusele, Uurimistöö aruanne, AS Teede Tehnokeskus, 2011.
5. The use of hydrated lime in the formulation of asphalt mixtures: European case studies, 2016
<https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=1020>
6. The National Lime Association, <https://www.lime.org/lime-basics/uses-of-lime/construction/asphalt/>
7. How to add Hydrated Lime to Asphalt An Overview of Current Methods, National Lime Association, 2003
https://www.graymont.com/sites/default/files/how_to_add_hydrated_lime_to_asphalt.pdf
8. Hydrated Lime a proven additive for durable asphalt pavements, European Lime Association, 2011
<https://docplayer.net/31645024-Hydrated-lime-a-proven-additive-for-durable-asphalt-pavements-critical-literature-review.html>
9. Eesti Standard EVS-EN 13179-1:2013, Bituumensgedes kasutava täitematerjali katsed osa 1: Delta ring- ja kuulkatsed, Eesti Standardikeskus, 2013
10. Method of quantification of hydrated lime in asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 2014
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814006825>

11. Uued viisid bituumensideainete kvaliteediomaduste määramiseks ja võimalused nende rakendamiseks, pidades silmas konkreetsele objektile vastavaid kriteeriume sideaine eeldatavast elueast ja kasutuskohast lähtuvalt, Teadus- ja arendustöö lõpparuanne, Tallinna Tehnikaülikool, 2015

https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/bituumenuuring_2015.pdf