



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

## **KLORIIDIDE MÕJU ASFALTSEGU KÜLMAKINDLUSELE**

### **THE INFLUENCE OF CHLORIDES ON THE FROST RESISTANCE OF ASPHALT MIXTURE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karoliina Kais

Üliõpilaskood: 192618EATI

Juhendaja: Kristjan Lill, teedelabori juhataja

# 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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Karoliina Kais

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kloriidide mõju asfaltsegu külmakindlusele“, 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.
- 

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# Ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Karoliina Kais, 192618EATI

Õppekava, peeriala: EATI02/17 – Teedeehitus ja geodeesia, 4 - teede- ja sillaehitus

Juhendaja(d): Laboratooriumi juhataja, Kristjan Lill, +372 5302 2437

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kloriidide mõju asfaltsegu külmakindlusele

(inglise keeles) The influence of chlorides on the frost resistance of asphalt mixture

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade asfaltsegu elukaare ja selle mõjutajate kohta
2. Anda ülevaade Eestis ja maailmas kasutatavate jäätõrje kloriidide kohta
3. Leida erinevaid katsemeetodeid asfaltsegu külmakindluse katsetamiseks
4. Uurida talvises teehoides kasutatavate kloriidide mõju asfaltsegule
5. Analüüsida katsetulemuste läbi kloriidide mõju asfaltsegu vastupidavusele

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teaduskirjanduse läbitöötamine, katseplaani koostamine	29.02.2024
2.	75% tööst on valmis, kaitsmistootluse esitamine	25.04.2024
3.	Katsetulemuste analüüs	01.05.2024
4.	Töö on valmis ning esitatakse retsenseerimisele	17.05.2024

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20.05.2024 a

**Üliõpilane:** Karoliina Kais ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Kristjan Lill ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** Mihkel Kask ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
Lühendite ja tähiste loetelu .....	8
1. SISSEJUHATUS.....	9
2. TEADAOLEVA INFO ANALÜÜS .....	11
2.1 Asfaltkatendi kasutusaeg .....	11
2.1.1 Teekatend .....	11
2.1.2 Kasutusaeg .....	11
2.2 Teedele nõutavad talvised seisunditasemed .....	12
2.3 Libedustõrje viisid.....	13
2.3.2 Optimaalne soolasisaldus .....	15
2.4 Täitematerjalide külmakindlus .....	17
2.5 Bituumeni külmakindlus.....	18
2.6 Asfaltsegu külmakindlus .....	20
2.6.1 Nake - keetmiskatse.....	20
2.6.2 Kaudne tõmbetugevus Euroopa näitel .....	22
2.6.3 Kaudne tõmbetugevus Aasia näitel .....	24
2.6.4 Cantabro katse .....	25
3. KATSED .....	29
3.1 Standarditele vastavate katsete kirjeldused .....	29
3.1.1 Sideaine sisaldus ja terastikuline koostis .....	31
3.1.2 Mahulised omadused .....	33
3.1.3 Veepüsivus ja kaudne tõmbetugevus .....	34
3.2 Külmumis-sulamistsükli katse kirjeldus .....	36
3.2.1 Külmumise ja sulamise protsess kliimakambris .....	38
4. KATSETULEMUSED JA JÄRELDUSED .....	42
4.1 Asfaldi vastavus .....	42
4.1.1 Sideaine sisaldus.....	42
4.1.2 Terastikuline koostis.....	43
4.1.3 Jäävpoorsus .....	44
4.1.4 Veepüsivus.....	45
4.2 Asfaldi külmakindlus .....	46
4.2.1 Tulemused AC 16 surf segu puhul .....	46
4.2.2 Tulemused AC 20 base segu puhul .....	48
4.2.3 Mahulised andmed .....	52
4.3 Järeldused .....	54
KOKKUVÕTE .....	58

SUMMARY .....59

## EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema on sõnastatud autori ideel ning arutelu läbi Tallinna Tehnikaülikooli Teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumi juhataja Kristjan Lillega. Magistritöö eesmärgiks on uurida, kas ja kuidas mõjutavad talvises teehoides kasutatavad jäasulatuskloriidid asfaltsegu vastupidavust läbi külmumis-sulamistsükli.

Autor soovib tänada lõputöö juhendajat Kristjan Lille tema kaasatuse ja innustamise eest katsete teostamise ja töö kirjutamise vältel. Samuti Tallinna Tehnikaülikooli teede- ja ehitusmaterjalide personali katsete teostamisel juhendamise ja abi eest.

Tänuõnad ka pereliikmetele, sõpradele ja kursusekaaslastele, kes olid motivatsiooniks ja toeks lõputöö kirjutamise protsessi jooksul.

**Võtmesõnad:** teede talihoole, asfaltsegu, jäasulatuskloriidid, külmumis-sulamistsüklid, magistritöö

## Lühendite ja tähiste loetelu

AKÖL – Aasta keskmine ööpäevane liiklussagedus

CaCl<sub>2</sub> - Kaltsiumkloriid

KCHO<sub>2</sub> – Kaaliumformiaat

MgCl<sub>2</sub> – Magneesiumkloriid

NaCl - Naatriumkloriid

RTFOT – Bituumeni lühiajalise vananemise laboratoorne katse (*ing. Rolling Thin Film Oven Test*)

SARA – Neli peamist bituumeni keemilist komponenti – küllastunud ühendid, aromaatsed ühendid, vaigud, asfalteenid (*ing. Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes*)

SiO<sub>2</sub> – Ränidioksiid



# 1. SISSEJUHATUS

Asfaltkatendile määratakse projekteerimise käigus teatav kasutusaeg, mil katend peab vastama projektis esitatud vastupidavusele. Sel ajal mõjutavad katendit nii liiklusest tulenevad koormused kui ka pidevalt muutuvad ilmastikutingimused. Eestis läbib katend talihooajal mitmeid külmumis-sulamistsükleid, mis lagundavad katendi struktuuri. Seetõttu laguneb katend olenemata korrektselt teostatud teeholdusest. [1]

Läbi külmumis-sulamistsüklite saab uurida asfaltsegu külmakindlust, ehk uuritava materjali omadust pidada vastu mitmekordsele vahelduvale külmumisele ja ülessulamisele. [1] Eestis on kasutuses standardiseeritud katsed täitematerjali külmakindlusele, kuid puudub konkreetne katse asfaltsegu külmakindlusele. Käesoleva magistritöö eesmärgiks on läbi laboratoorsete katsete uurida külmumis-sulamistsüklite mõju asfaltsegu kaudse tõmbetugevuse meetodiga.

Tulenevalt Eesti talvisel teeholdel kasutatavatele libedustõrje sooladele viiakse katsekehad külmumis-sulamistsüklite teostamisel kokkupuutesse nii vee kui ka soolalahusega, uurimaks kas teeholdes kasutataval kloriidil on katendile täiendav lagunemist kiirendav mõju. Seeläbi saab hinnata, kas soolade kasutamine talvises teeholdes põhjustab asfaltkatte kiiremat lagunemist.

Lõputöös teostatud külmakindluskatsed põhinevad välismaistest teadusartiklitest kogutud taustainfol ning Eestis koostatud uuringutel. Kliimakatsed teostatakse Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide labori kliimakambris ning külmakindluse katsetulemusi hinnatakse läbi kaudse tõmbetugevuse meetodi. Tulemuste kaudu analüüsitakse, milline talviti esinev ilmastikutingimus avaldab katendile enim negatiivset mõju ja kas kloriidil on asfaltsegule täiendav negatiivne mõju.

Lõputöö teises peatükis antakse ülevaade Eestis projekteeritud elastsete katendite kasutusajast ning teede talihoolde teostamise viisidest ning nende optimaalsest kasutamisest kodu- ja välismaa näidetel. Seejärel antakse ülevaade täitematerjalide ja bituumeni külmakindlusest. Laiemalt kirjeldatakse asfaltsegude külmakindluse katsetamisest välismaiste teaduskirjanduste näidetel, mille põhjal koostati ka antud lõputöö katseplaani.

Kolmandas peatükis esitatakse töös teostatud katsete kirjeldused. Kolmanda peatüki esimene pool kirjeldab standardiseeritud katsete teostamist ja kasutatud

arvutusvalemeid. Peatüki teises pooles kirjeldatakse külmakindluskatse teostamist ning kliimakambri tööpõhimõtet.

Neljandas peatükis analüüsitakse katsetulemuste vastavust standardis esitatud nõuetele ning külmakindluskatse vastavust püstitatud hüpoteesile ja eelnevalt uuritud teadusinfole. Lisaks analüüsitakse mahuliste omaduste muutust külmumis-sulamistsüklite järgselt ning esitatakse järeldused.

## **2. TEADAOLEVA INFO ANALÜÜS**

### **2.1 Asfaltkatendi kasutusaeg**

#### **2.1.1 Teekatend**

Katendi moodustavad kaks põhikihti – kate ja alus, võivad lisanduda lisakihid, näiteks drenikiht. Katteks nimetatakse katendi pealmist kihti, mis on vahetus kokkupuutes liiklusvahenditega. Alus on kate ja muldkeha vahel ning võib olla ühe- või mitmekihiline. Katendid, mis on ehitatud tsement- või raudbetoonist liigitatakse jäikadeks, ülejäänud katendid liigitatakse elastseteks. Ühest materjalist valmistatud katendi struktuurilist elementi nimetatakse katendikihiks. [1]

Katendi tüüpideks on püsi-, kerg-, siirde- ja lihtkatendid. Püsikatend võib olla asfalt- või drenasfaltbetoonist, monoliitcementbetoonist või monteeritavast raudbetoonist. Kergkatend on kergasfaltbetoonist, pinnatud mustsegust või pinnatud stabiliseeritud segust ehitatud katend ning on soovitatav kasutada aasta keskmise ööpäevase liiklussageduse (AKÖL) kuni 1500 autot juures. Katet, mis on valmistatud kiilutud killustikust, kruusliiva segust, sideainega töödeldud pinnasest või on 2-kordselt pinnatud loetakse siirdekatendiks. Katendit, millel puudub mõni põhikihtidest või mille kate koosneb juhusliku terakoostisega materjalist nimetatakse lihtkatendiks. Katendi ülesandeks on võtta vastu ja hajutada liiklusvahendite ratastelt tulev koormus muldkeha pinnasele. [1]

#### **2.1.2 Kasutusaeg**

Katendi kasutusaja jooksul peab olema tagatud kogu konstruktsiooni tugevus ja külmakindlus nii katendi üldpaksuses kui ka üksikutel kihtidel. Kasutusaeg on määratud projekti lähteülesandes ja soovitatavalt mitte vähem kui 7 aastat siirdekatendile, 10 aastat kergkatendile ja 20 aastat püsikatendile. Olenemata korrektsest hooldusest ja õigeaegsetest remontidest muutub kate seisund selle kasutusaja jooksul. [1]

Katte seisundit mõjutavad ilm ja liiklusest tulenevad koormused. Transpordivahendid kiirendavad ja aeglustavad, olles kattega vahetus kokkupuutes. Nii mõjuvad katendile nihke-, haarde- ja vertikaaljõud. Eesti asub poolmerelises kliimatsoonis, kus esineb suur hulk sademeid ja vähe päikesepaistelisi päevi. Katendi suhtes esinevad kõige kriitilisemad ilmastikuolud kevaditi, mil toimub enim külmumis-sulamistsükleid.

Jäätunud pinna sulades muutub katend märjaks ning veel tekib võimalus katendi pooridesse tungida. [2]

Pooridesse imbudes hakkab vesi katendit lõhkuma. Temperatuuri langedes vesi külmub ja seeläbi paisub. Pooridesse tunginud vee paisumine suurendab katendi poorsust ja lihtsustab edasist vee katendisse sisenemist. Pooride kaudu jõuab vesi sideaine ja täitematerjali vahele ning hakkab vähendama osakeste vahelist naket, eriti on seda täheldatud soolvee puhul. [2] Vee ja soolvee kahjustusi katendile on maailmas uuritud läbi erinevate katsete, millest antakse ülevaade peatükis 2.6.

Osakeste omavahelise nakke vähenedes nõrgeneb asfaltsegu esialgne struktuur ning kahjustused liiguvad edasi bituumenita jäänud täitematerjalidele. Järgneb asfaldiosakeste murenemine ning kandevõime kadu. Mida rohkem esineb aasta jooksul päevi, mil päeval teekate sulab ning öösel külmub, seda suurema tõenäosusega esinevad katendil kahjustused. [2]

Küll aga tuleb talvistes ilmastikuoludes kasutada teekattelt jää tõrjumiseks kloriide, millel on olenevalt lahuse kontsentratsioonist veega võrreldes madalamad külmumistemperatuurid. Seega talihoolduse tegemisel suurendatakse looduslike külmumis-sulamistsüklite arvu mitmekordselt. [2] Olenevalt teede seisunditasemetest rakendatakse maanteedele erinevaid nõudeid libeduse tõrjumise teostamiseks.

## **2.2 Teedele nõutavad talvised seisunditasemed**

Teehooldusel on oluline roll talvise kliimaga alade toimimas hoidmisel. Läbi infrastruktuuri käib inimeste ja kaupade tihe liikumine olenemata aastaajast. Inimeste ja kaupade sujuvat liikumist võimaldab nõutavate tee seisunditasemete tagamine ning sobivate hooldusstrateegiate leidmine. Libedustõrjevahendeid kasutatakse laialdaselt nii maanteedel kui ka lennuväljadel jääkihtide tekke vältimiseks ja eemaldamiseks. Hooldes kasutatav keemia tagab küll katendi tingimuste kiire paranemise, kuid teisalt võivad libedusetõrjena kasutatavad kloriidid läbi talviste külmumis-sulamistsüklite ja suviste kõrgete temperatuuride mõjutada katendi püsivust, tuuakse välja Norras koostatud uuringus. [3]

Teehooldete tegemine Eestis käib vastavalt Majandus- ja taristuministri määrus nr 92 järgi. Määrusega on tee talvised seisunditasemed jagatud nelja kategooriasse, mis on

määratletud AKÖL-i põhjal ja välja toodud tabelis 2.1 [4]. Kõige karmimad nõuded hooldetasemele kajastuvad seisunditasemega „4“ ning leebeimad seisunditasemega „1“. Taseme „3“ puhul tuleb lume- ja jäävabana hoida sõiduradade sõidujäljed ning taseme „4“ puhul tuleb teekate hoida jää- ja lumevabana sõiduradade ulatuses. Tase „1“ puhul võib teekatte pinnal olla kinnisõidetud lumi või jäätunud kiht ning libedusetõrje tegemine on kohustuslik ohtlikes kohtades, tase „2“ puhul tuleb libedusetõrjet teha kogu teel, kuid teekate võib olla jäätunud või kinnisõidetud lume all [5].

Vastavalt Transpordiameti nõuetele jaguneb kõrgeim seisunditase kaheks - „3“ ja „3+“ [6] ning „3+“ taseme teed on kehtestatud vastavalt Maanteeameti 2019. aasta käskkirjaga [7]. Maanteede jää- ja lumevabana hoidmiseks on teehooldaja vastutuseks valida õige viis tee hooldamiseks.

Tabel 2.1 Maantee talvine seisunditase [4]

Liiklussagedus, autot ööpäevas	Nõutav seisunditase			
	Põhimaantee	Tugimaantee	Kõrvalmaantee	Kohalik maantee
Üle 1000	3	3	3	3
251-1000	3	2	2	2
Kuni 250*	-	1	1	1

\*Liiklussagedusel alla 50 auto ööpäevas määrab nõuded tee seisundile tee omanik tingimusel, et on tagatud tingimused ohutuks liiklemiseks

## 2.3 Libedustõrje viisid

Talvisel hooajal kasutatakse teehoolde tegemisel suures osas teede soolamist. Soolamine takistab libeduse tekkimist ning suurendab seega liiklusohutust. Kloriidide kasutamine libedustõrjeks on efektiivne kui temperatuur on kuni -6 °C. Suuremate miinuskraadide puhul tekib oht, et soolade mõjul sulanud vesi jäätub uuesti ning libeduseoht muutub suuremaks. Talvise teehoolde eesmärgiks on sõidutee katendi haardeteguri suurendamine. [8]

Olenevalt teede liiklussagedusest valitakse vastav teehoolde viis. Hoolde puhul alustatakse libedusetekke ennetamisest, soolates teed olenevalt keskkonnast ja temperatuurist, kas soolalahusega või niisutatud/kuiva soolaga. Ennetav soolamine tuleb teostada 1-6 tundi enne eeldatava libeduse tekkimist. Juba jäätunud ja libeda katendi puhul kasutatakse kas soolamist, puistematerjalide puistamist teele või haardeteguri mehaanilist suurendamist. Puistematerjale ei saa kasutada suure liiklussagedusega teedel, kuna sõidukid pühivad liiva ratastega teedelt ära. Mehaaniliselt tõstetakse haardetegurit võrk-, jää- või tappteradega teepinna karestamise kaudu. [8]

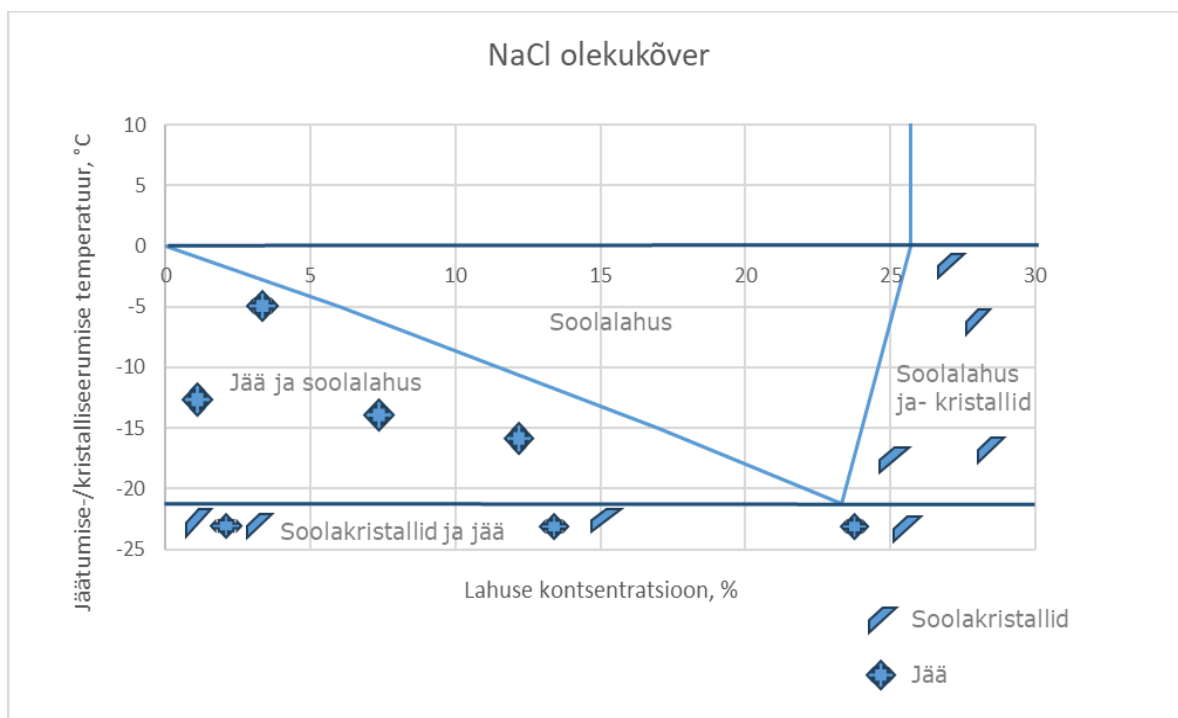
Hetkeseisuga ei ole Eestis kehtestatud nõudeid libedusetõrjel kasutatavetele kloriididele. Libedusetõrje teostamine ja kasutatava soola kvaliteet on teehooldeid tegeva ettevõtte vastutusallas. [8] Kõige sagedasemalt kasutatakse Euroopa ja Põhja-Ameerika teedel jäätõrjekemikaalina naatriumkloriidi (NaCl), kuna see on kättesaadav ning madala hinnaga. Lennujaamades kasutatakse libedusetõrjeks kaaliumformiaati, vältimaks lennukite korrodeerumist. [3] 2021. aastal teostatud uuringu põhjal on Eestis praktiliselt 100% ulatusel libedusetõrjeks kasutusel naatriumkloriid, mida tarniti Eestisse Saksamaalt, Valgevenest ja Egiptusest. [8]

Libedusetõrjel kasutatava soola tüübi ja kasutusvormi valik toimub olenevalt temperatuurist. Temperatuuridel alla  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  väheneb kuiva helvessoolana kasutades NaCl efektiivsus ning toimeefektiivsuse suurendamiseks niisutatakse seda kaltsiumkloriidi ( $\text{CaCl}_2$ ) soolalahusega.  $\text{CaCl}_2$  lisamine tõstab NaCl efektiivsuse  $-7$  kraadilt kuni  $-12$  kraadini. Temperatuuridel  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  on otstarbekas kasutada vaid  $\text{CaCl}_2$ , kuna tema toimivus temperatuuripiir on madalam kui NaCl puhul. Külmemal kui  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatuuri puhul võetakse kloriidide asemel kasutusele puistematerjalid. [8]

Kasutades libedusetõrje reagentidest valmistatud vesilahuseid on olulisteks mõisteteks eutelektiline kontsentratsioon ja temperatuur. Eutelektiline temperatuur on madalaim temperatuur, mille juures reagendi küllastunud vesilahus ei ole veel külmunud ja on võimeline jääd sulatama. Eutelektiline kontsentratsioon on vesilahuse küllastunud ehk suurim kontsentratsioon eutelektilisel temperatuuril. [8]

Joonis 2.1 kujutab naatriumkloriidi toimivust olenevalt reagendi lahuse kontsentratsioonist ja temperatuurist. Joonisel on toodud NaCl eutelektilise temperatuuri joon  $-21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  juures, millest madalamal temperatuuril sool enam ei tööta ning teele moodustuvad soolakristallid ja jää. Eutelektiline kontsentratsioon on 23,3%

juures ning suurema kontsentratsiooni juures tekib küllastunud soolalahus koos soolakristallidega. [8]



Joonis 2.1 Naatriumkloriidi olekukõver [8]

Lahuste kasutamisel tuleb silmas pidada, et kontsentratsioon väheneb lahuse kokkupuutel teel oleva niiskusega, mistõttu võib libedusetõrje tegemine ebaõnnestuda. Kasutades aga küllastusastmest suurema kontsentratsiooniga lahuseid ei ole oodata suuremat efektiivsust ning tegemist on hoopis ebamõistliku kuluga. [8] Ressursside säästlikuks kasutamiseks tuleks reagentide kasutamist optimeerida.

### 2.3.2 Optimaalne soolasisaldus

Kanadas koostatud uuringu põhjal on üheks peamiseks põhjuseks infrastruktuuri ja sõidukite korrodeerumisel teede soolamine. Sooladest tuleneva keskkonnamõju vähendamiseks tuleks välja töötada tasakaalustatud soolamisstrateegia. Teede soolamisel on otsene mõju loodusele - jää ja lume sulades jõuavad kloriidid meie pinnasesse, vette, taimestikku ja elusloodusesse. [9]

2017. aastal Eesti Maaülikoolis kirjutatud magistritöös teemal „Kloriidide kasutamine teehooldel – keskkonnamõju“ tuuakse välja, et ei ole olemas looduslikku protsessi, mille

läbi saaksid looduses kloriidid lõhustuda ja keskkonnast eemalduda. Lõputöös tehtud analüüsi põhjal ei vaja Eestis kasutatav kloriidikogus lisapiiranguid tulenevalt selle mõjust keskkonnale. Küll aga märgitakse, et pinnase seireteks kasutusel olev meetodika on ebapiisav ning pikemaajalisel analüüsil võib põhjavee ja looduskeskkonna kaitseks vajalik olla kasutatavale kloriidide kogusele sätestada lokaalseid piiranguid. [10]

Soolamiskava väljatöötamine sisaldaks endas ka spetsiifilisi lume- ja jäätõrje teostamise juhiseid. Juhised peaksid kirjeldama parimaid soola kasutusnorme vastavalt teepinna katendile või rajatise ehitusel kasutatud betoonile. See nõuaks aga ulatuslikku andmete kogumist, mis on mahukas ja aeganõudev protsess. Samuti tekivad erinevused maanteede seisundiklassides ning infrastruktuuri teenindusotstarbes – vastavalt sõiduteed ja parklad, tuuakse välja Kanada artiklis. [9] Kiiremaks viisiks optimaalse soolasisalduse leidmiseks on katsetamine laboris.

Hiina ülikoolides viidi läbi katsed leidmaks optimaalset soolasisaldust libedusetõrje soolade puhul ning analüüsivõime nende mõju asfaltsegule. Katses kasutatav sool kannab nime Snowmelt, mis vastab Hiinas kehtivatele spetsifikatsioonidele. Jäätõrje efektiivsuse määrab suures osas lumme või jääle sulava kloriidsoola kontsentratsioon. Analüüsivõime erineva kontsentratsiooni mõju jääsulatusvõimele, teostati katse nelja erineva kontsentratsiooniga lahusega. [11]

Kloriidi sulatamisvõime uurimiseks valmistati veega 100 milliliitristes anumates jääkuubikud, mis külmutati  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  juures. 12 tunni möödudes asetati jääkuubikud nelja erineva kloriidisisalduse lahusega (kontsentratsioonidega 6%, 12%, 18%, 24%) anumatesse püsiva temperatuuriga  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 30 minuti möödudes mõõdeti jää sulamismaht. Jää sulamiskiirus arvutati jää sulamismahu ja jää esialgse mahu suhte järgi. [11]

Katsega jõuti järelduseni, et mida suurem on kloriidisisaldus, seda kiirem on ka jää sulamiskiirus, kuid seda vaid kontsentratsioonini, kus saavutatakse küllastus. Eutelektilist kontsentratsiooni ületades jää sulamiskiirus väheneb kuna küllastusolekusse jõudmine takistab kloriidsoola lahustumist ning tekitab sadestumist, takistades edasist sulatamisvõimet. [11]

Kolme peamise kasutusel oleva jäätõrjekloriidi eutelektilised temperatuurid ja kontsentratsioonide on välja toodud tabelis 2.2. [8], [12] Optimaalne kasutus oleks säästlik hoolet teostavale ettevõttele, teede püsivusele ja meid ümbritsevale keskkonnale.



Tabel 2.2 Enimkasutatavate reagentide eutelektilised näitajad [8]

Jäätumisvastane reagent	Eutelektiline temperatuur, °C	Eutelektiline kontsentratsioon, %
Naatriumkloriid	-21,2	23,3
Kaltsiumkloriid	-49,8	31,8
Magneesiumkloriid	-33,6	22 [12]

## 2.4 Täitematerjalide külmakindlus

Külmades oludes on külmakindlus täitematerjalide kasutamisel oluliseks parameetrik. Vastupidavus külmumisele ja sulamisele sõltub looduskivide puhul kivi poorsusest ja niiskussisaldusest ning samuti keskkonnas olevatest võimalikest sooladest. Lubjakivi puhul on näiteks täheldatud häid omadusi külmakindlusele puhtas vees, kuid näitajate langust kokkupuutes soolalahustega. [13]

Täitematerjalide külmakindlust saab vastavalt standardile EN 1367-1 katsetada destilleeritud vees [14] ja vastavalt standardile EN 1367-6 1%-ses NaCl lahuses [15]. 2009. aastal teostati AS Teede Tehnokeskus poolt uurimustöö lubjakivi- ja kruuskillustiku külmakindluse paralleelsele katsetamisele. Katsed teostati nii destilleeritud vees kui ka 1%-ses NaCl lahuses. Saadud katsetulemustest otsiti materjalide omavahelisi seoseid LA purunemiskindluse ning külmakindluse vahel. [16]

Vastupidiselt kruuskillustikule ei leitud lubjakivikillustiku puhul seost materjali külmakindlusele destilleeritud vee ja soolalahuse vahel. Küll aga esines mõlema materjali puhul suund, kus materjalid suurema vastupanuga purunemiskindlusele omasid ka suuremat külmakindlust destilleeritud vees. 1%-se naatriumkloriidi külmakindluse katsetulemustes ei leitud kummagi materjali puhul seoseid tulemustega külmakindluses destilleeritud veega ega LA tulemuste vahel. [16]

Rootsi, Saksamaa ja Islandi koostööl valminud uurimistöös [13] saadi sarnased tulemused Teede Tehnokeskuse poolt tehtud uuringuga [16]. Välismaise teadustöö hüpoteesiks oli, et lubjakivi külmakindlus erineb katsetatuna vees ja soolas mitmekordselt. Katsetena teostati samuti külmakindluskatsed vastavalt standardile EN 1367-1 ja NT BUILD 485, mis vastab standardis EN 1367-6 kirjeldatule [13]. Lisaks

teostati ka veeimavuse katse vastavalt standardile EN 1097-6 [17], uurimaks kas leidub seoseid veeimavuse tulemuste ja külmakindluse massikao vahel.

Külmakindluse väärtused materjalidele arvutati massiprotsendina, mis peale külmumis-sulamistsükli toimumist läbis 4 mm avaga sõela. Mida suurem osa esialgsest 8/16 mm terasuurusega materjalist läbis peale tsükleid 4 mm sõela, seda rohkem muutus esialgne killustikuterade struktuur. Lubjakivi massiivist õhatud materjali puhul läbis peale külmumis-sulamistsükleid katsetatuna vees 4 mm sõela 1,8% materjalist ning katsetatuna 1%-ses NaCl lahuses 39,0%, veeimavuse väärtuseks saadi 0,99. Lisaks massiivist õhatud lubjakivile katsetati veel viite erineva struktuuriga lubjakivi, graniiti, liivakivi, vilgukivirikast gneissi ja marmorit. [13]

Tulemusi analüüsidest leiti seos, et materjalidel, mille veeimavus jäi alla 0,5% esines parem vastupanu külmakindlusele soolalahuses. Küll aga ei leitud seoseid materjalide katsetulemustele massikaol puhta vee ja soolalahuse vahel, mis näitab, et kahjustuste tekkeprotsess soolalahuses erineb protsessist destilleeritud vees. Erinevus tekib selles, et soolalahus käitub erineva suurusega poorides erinevalt. Külmumine algab suuremates veega täidetud poorides ning soolalahuse kontsentratsioon väikestes poorides suureneb kuna soolalahus jääb pooride seintele püsima. See tõstab pooride sees olevat rõhku, mis hakkab pooride kaudu kivi sisestruktuuri lõhkuma. [13]

Sulamise jooksul hakkab jääga täidetud poorides soolalahuse kontsentratsioon vähenema, mis algatab protsessid ka väiksemates poorides. Rõhu ja pooride koosmõjul saavad kahjustavad protsessid soolalahuses toimuda lisaks külmumisprotsessile ka sulamise käigus. Pooride uurimisel skaneeriva elektronmikroskoobiga leiti, et külmakahjustused soolalahuses mõjutavad rohkem nanopore ning puhta vee puhul mikroni suuruses poore. [13]

## 2.5 Bituumeni külmakindlus

Asfaldisegu mehaaniline tugevus oleneb täitematerjalide vastupanust ja sideaine nakkeomadustest. Bituumeni nakkeomadused sõltuvad tema keemilisest koostisest. [18] Bituumeni sisekoostis jaguneb esmalt asfalteenideks ja malteenideks. Malteenid omakorda jagunevad küllastunud ühenditeks, aromaatsseteks ühenditeks ja vaikudeks. Bituumeni jagunemisel moodustuvad seega neli fraktsiooni, mida nimetatakse inglise keelest tulenevalt SARA (*ing. Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes*)

fraktsioonideks. Protsentuaalselt moodustavad bituumeni koostisest küllastunud ühendid 5-15%, aromaatsed ühendid 30-45%, vaigud 30-45% ja asfalteenid 5-20%. [19] Sideaine fraktsioonide sisaldus koostises on peamiseks tee toimivuse määrajaks, kuna komponendid mõjutavad oluliselt bituumeni ja täitematerjali omavahelist naket. Seetõttu on oluline uurida sideaine toimivuse muutumist soolaerosiooni keskkonnas. [18]

2021. aastal uurisid Hiina teadlased kloriidide mõju bituumenile ning simuleerimaks keskkonda, kus bituumen on madalatel temperatuuridel kokkupuutes soolalahustega, asetati bituumeni proovikehad 24 tunniks 5% ja 10% NaCl lahusesse, misjärel teostati 3, 6, 9, 12 ja 15 külmumis-sulamistsükli. Seejärel teostati kastekehadele uus SARA fraktsioonidesse jagamise katse (*ing. four fraction test*) ning bituumeni vananemiskatse (RTFOT). [18]

Katsetulemustest selgus, et tsüklite arvu tõustes suurenes sideaine koostises võrreldes esialgse koostisega asfalteenide ja vaikude sisaldus ning langes küllastunud ja aromaatsete ühendite sisaldus. 15-ne külmumis-sulamistsükli järgselt 10% NaCl lahuses tõusis asfalteenide sisaldus 90,8% ja vaikude sisaldus 105,6%, küllastunud ühendite sisaldus langes 62,9% ja aromaatsete ühendite hulk 42,5%. Tabelis 2.3 on toodud koostisosade sisalduse muutus erinevate tsüklite järgselt. [18]

Tabel 2.3 Bituumeni fraktsioonide osakaalud [18]

Töötlemis-meetod	Lahuse kontsentratsioon	Bituumeni fraktsioon	RTFOT	Külmumis-sulamistsüklite arv					
				0	3	6	9	12	15
Külmumis-sulamistsükkel	5%	Asfalteenid	12,1	9,8	11,4	13,1	14,8	16,1	16,9
		Küllastunud ühendid	18,6	25,6	21,7	16,5	13,6	12,2	10,8
		Aromaatsed ühendid	38,8	41,2	37,5	32,8	29,5	27,9	26,3
		Vaigud	30,5	23,4	29,4	37,6	42,1	43,8	46
	10%	Asfalteenid	12,1	9,8	11,7	13,6	15,9	17,4	18,6
		Küllastunud ühendid	18,6	25,6	21,2	16,3	13,1	11,3	9,5
		Aromaatsed ühendid	38,8	41,2	36,5	31,3	26,4	24,5	23,7
		Vaigud	30,5	23,4	30,6	38,8	44,6	46,8	48,2

Sideaine koostise varieerumise peamiseks põhjuseks kokkupuutes sooladega on vananemisprotsessi kiirenemine. Lisaks SARA jagamisele tehti ka vananemiskatse (RTFOT), mille tulemused sarnanesid soolaerosioonil toimuvale vananemisele. Kokkupuude soolaerosiooniga tõstab sideaine temperatuuritaluvust kõrgetel temperatuuridel, kuid väheneb väsimuskindlus ning madalatel temperatuuridel pragunemiskindlus ja osakeste vaheline haardumine. [18]

## **2.6 Asfaltsegu külmakindlus**

Külmumine ja sulamine on ebapüsivad protsessid, mis on mõjutatud nii sademetest kui ka katendi all olevast pinnasest. Kevadine sulamine algab katendi pinnalt ning liigub seejärel kihte mööda sügavamale. Kuna konstruktsiooni alumised kihid on veel jääs, ei ole katendi pinnal oleval sulaveel kuhugi imbuda, mis hoiab katendit märjana ja põhjustab deformatsioone. [20]

Vee ja liikluskoormuse mõjul toimub sideaine ja täitematerjali vahelise nakke vähenemine ning täitematerjal hakkab lahti kooruma, mis viib lõpuks aukude moodustumiseni. [20] Asfaltsegu külmakindlust kokkupuutes nii puhta vee kui ka soolalahusega on välismaal uuritud läbi erinevate meetodite, millest antakse ülevaade järgnevates alapeatüki punktides. Näiteid tuuakse täitematerjali ja sideaine vahelise nakke uurimisest kui ka asfaltsegu vastupidavusest deformatsioonidele.

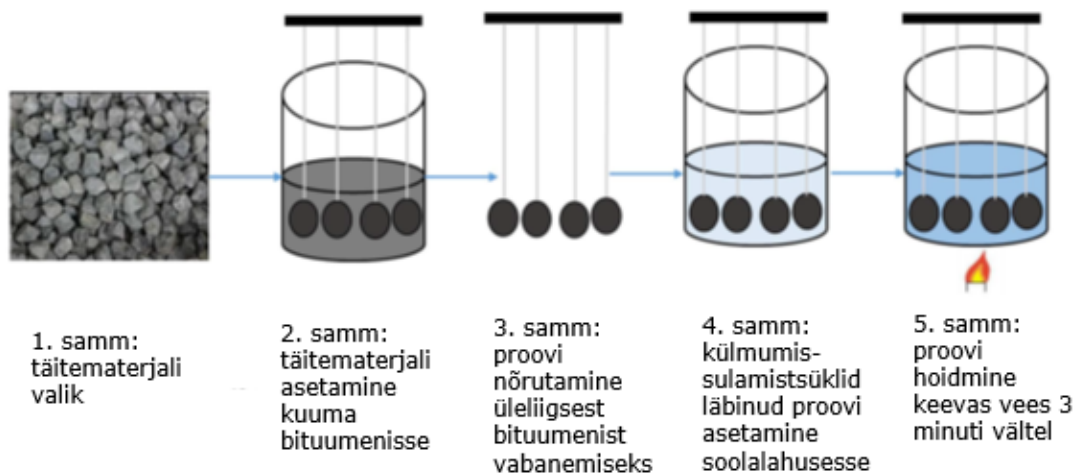
### **2.6.1 Nake - keetmiskatse**

Vastavalt standardile EN 12697-11 on täitematerjali ja sideaine vahelise nakke katsetamiseks kasutusel kolm meetodilt – rullpudeli meetod (Eestis kasutusel), staatiline katsemeetod ja keetmise meetod. Keetmise meetodi puhul hinnatakse tihendamata täitematerjalil bituumeni kaetuse määra peale katseproovi keevas vees hoidmist. [21]

2023. aastal ilmunud ASCE artikli raames on tehtud keetmiskatse kombineerituna külmumis-sulamistsüklite katsega. Katsel kasutati jämedat täitematerjali, mille terasuurus jäi vahemikku 13,2–19 mm. Täitematerjalid pesti ja kuivatati seejärel ahjus 105 °C juures, tagades katsematerjali pinnapuhtuse. Täpsema tulemuse saamiseks tehti iga katse kolme prooviga. Ettevalmistatud täitematerjal kinnitati terastraadiga

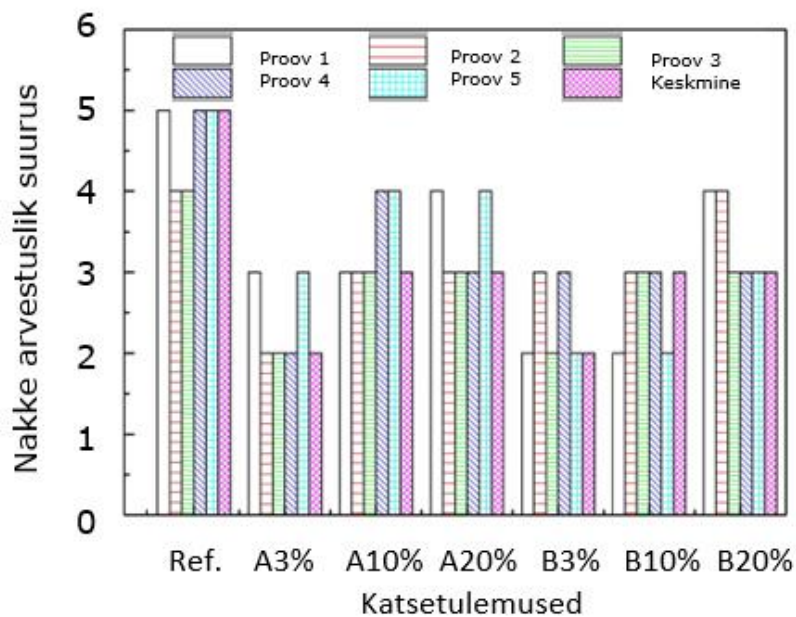
alusele ja kasteti seejärel 45 sekundiks kuuma bituumenisse, mille temperatuur jäi vahemikku 130-150 °C. 45 sekundi möödudes tõsteti alus bituumenist välja ja lasti üleliigsel bituumenil nõrguda. [22] Joonisel 2.2 on kujutatud katsed illustreeriv joonis.

Bituumeniga kaetud täitematerjal jahutati toatemperatuurini, misjärel teostati külmumis-sulamistsüklid kokkupuutes jääsulatussoola lahustega. Proove hoiti sügavkülmas  $-18\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  juures  $16 \pm 1$  tundi ja seejärel tõsteti katsekehad 8 tunniks toatemperatuurile. 8 tunni möödudes sukeldati proovid 3 minutiks keevasse vette. Täitematerjali bituumeniga kaetust võrreldakse enne ja peale keevasse vette kastmist ning kasutatakse indikaatorina sideaine ja täitematerjali nakkeomaduste hindamiseks. [22]



Joonis 2.2 Katse illustatsioon [22]

Külmumis-sulamistsüklid teostati proovidele kahe erineva soolalahusega, millest omakorda oli tehtud kolm erineva kontsentratsiooniga lahust. Eesmärgiks oli uurida, kas erinevate komponentidega sooladel on erinev mõju asfaltsegu niiskustundlikkusele. Kasutati soola A ja soola B, kus sool A koosnes 80% NaCl-st ja 20% CaCl<sub>2</sub>-st ning sool B koosnes 70% NaCl-st, 25% MgCl<sub>2</sub>-st ja 5% CaCl<sub>2</sub>-st. Uurimaks, millist mõju avaldavad erineva kontsentratsiooniga lahused koostati mõlemast soolast soolalahused kontsentratsiooniga 3%, 10% ja 20%, tähistatult vastavalt A3%, A10%, A20%, B3%, B10%, B20%. [22]



Joonis 2.3 Nakke näitajad 16 külmumis-sulamistsükli läbimisel [22]

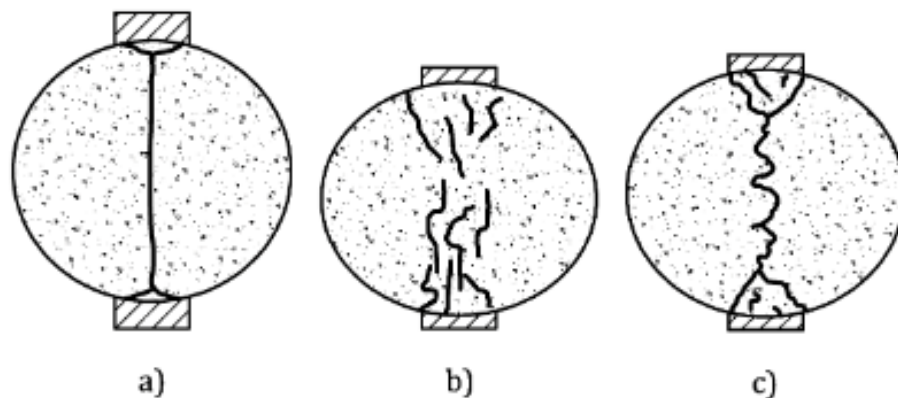
Joonisel 2.3 on kujutatud sideaine ja täitematerjali vahelise nakke katsetulemused peale 16-st külmumis-sulamistsükli. Suurus 5 vastab tulemusele, kus sideaine eraldumine täitematerjali pinnalt on nullilähedane ning suurus 1 kajastab tulemusena sideaine täielikku eraldumist täitematerjali pinnalt. Katsetulemused on võrdluses referentkatsekehadega, millele ei teostatud mitte ühtegi külmumis-sulamistsükli. Tõdeti, et külmumis-sulamistsükli jooksul väheneb asfaldi sideaine ja täitematerjali nakketugevus. Kõige suuremat kahju tekitasid nii A kui ka B soola puhul 3%-ne lahus. [22]

## 2.6.2 Kaudne tõmbetugevus Euroopa näitel

Silindriliste proovikehade kaudse tõmbetugevuse määramise katse on käsitletud Euroopa standardiga EN 12697-23:2017. Kaudne tõmbetugevus on katsetingimustel saadud maksimaalne tõmbetugevus, mis arvutatakse silindrilisele proovikehale, diameetrilise purustamise saavutamiseks rakendatud maksimaalse jõu ja proovikeha mõõtmete alusel. Katse teostamiseks vajalikud seadmed on survepress (mis võimaldab proovikehade konstantse koormamise), surveliistudega katsepea, mõõteseadete koormuse määramiseks ning veevann või õhukamber, milles on võimalik proovikeha läheduses hoida katsetemperatuuri täpsusega  $\pm 1$  °C. Standardi järgi tuleb iga katse ja tingimuse jaoks valmistada ette vähemalt 3 katsekeha. [23]

Katse teostatakse eelnevalt konditsiooni viidud proovikehale. Standardi järgselt on katse teostamise temperatuuriks  $10 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , kui ei ole määratletud teisiti. Temperatuuridel üle  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ei purune proovikeha tõmbele vaid survele. Madalatel temperatuuridel aga ei pruugi survepressi maksimaalne koormus 28 kN olla piisav ning tuleb kasutada tavapärasest võimsamat survepressi. [23]

Proovikeha asetatakse surveliistudega katsepea vahele nii, et seda saaks diameetriliselt koormata. Katse tuleb teostada ruumis, kus vastavalt standardile EN 12697-23:2017 on temperatuur vahemikus  $15\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Proovikeha koormatakse pidevalt konstantse deformatsioonikiirusega kuni tippkoormuse saavutamiseni, mis fikseeritakse mõõteseadmega. Seejärel jätkatakse koormamisega kuni proovikeha puruneb ning fikseeritakse purunemistüüp. Purunemistüübid a), b) ja c) on toodud joonisel 2.4, kus a) puhas tõmbepurunemine, b) deformeerumine ja c) kombinatsioon. Katset korratakse kõigi proovikehadega (vähemalt kolm), mille põhjal arvutatakse üks keskmine kaudne tõmbetugevuse määrang. [23]



Joonis 2.4 Kaudne tõmbetugevus purunemistüübid [23]

Kaudne tõmbetugevus arvutatakse valemiga 2.1,

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \cdot 1000 \quad (2.1)$$

kus  $ITS$  – kaudne tõmbetugevus (kPa), ümardatuna kolmanda tüvenumbrini;  
 $P$  – maksimaalne koormus (N), ümardatuna täisarvuni;  
 $D$  – proovikeha diameeter (mm), täpsusega üks komakoht;  
 $H$  – proovikeha kõrgus (mm), täpsusega üks komakoht. [23]

### 2.6.3 Kaudne tõmbetugevus Aasia näitel

2023. aastal uuriti Hiinas asfaldisegu niiskustundlikust kokkupuutes jääsulatussooladega. Katsetes kasutati jääsulatussoola A ja B, mille koostis on toodud tabelis 2.4. Niiskustundlikuse hindamiseks kasutati kaudse tõmbetugevuse katset, kusjuures proovikehad jagati kahte gruppi ning ühele grupile teostati eelnevat külmumis-sulamistsüklid. Külmumis-sulamistsükleid teostati 8 ja 16 tükki, katsekehasid hoiti ajavahemikul  $16 \pm 1$  h sügavkülmas temperatuuri juures  $-18 \pm 2$  °C, misjärel viidi katsekehad 8 tunniks toatemperatuurile sulama. Katsekehade jahutamine toimus ligikaudu  $2,5$  °C/h ning sulatamine  $1,125$  °C/h. Peale vajaliku arvu külmumis-sulamistsüklite sooritamist viidi kõik katsekehad 10-ks tunniks sügavkülma temperatuuri juurde  $-18$  °C  $\pm 2$  °C. Kasutatud asfaltsegu on suurima teramõõduga 16 mm ja bituumeni penetratsiooniga 80/100. [22]

Tabel 2.4 Soolade koostis [22]

	Sool A	Sool B
Protsentuaalne koostis	NaCl 80%	NaCl 70%
	CaCl <sub>2</sub> 20%	MgCl <sub>2</sub> 25%
		CaCl <sub>2</sub> 5%

Teise grupi puhul hoiti katsekehasid kokkupuutes soolalahustega temperatuuril 20 °C. 10 tunni möödudes võeti katsekehad sügavkülmast välja ning teostati kaudne tõmbetugevuskatse. Katse deformatsioonikiiruseks oli  $50 \pm 5$  mm/min tippkoormuse rakendumiseni. Iga lahuse ja grupi kohta tehti katse viie katsekehaga, mille mõõtmed olid eelnevalt fikseeritud. Kaudne tõmbetugevus arvutati kasutades valemit 2.2,

$$R_{Tn} = 0,06287 \frac{P_{Tn}}{h_n} \quad (2.2)$$

kus  $R_{Tn}$  – kaudne tõmbetugevus (MPa);

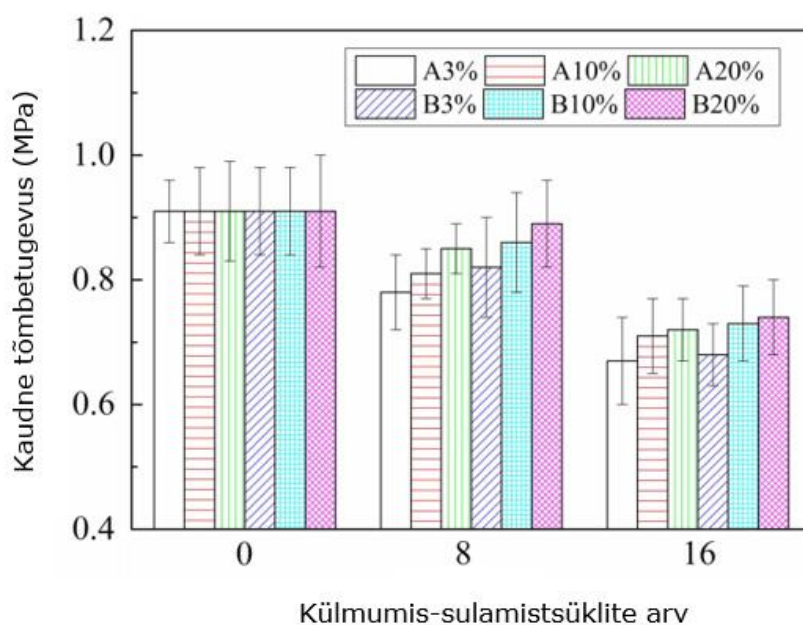
$P_{Tn}$  – tippkoormus (N);

$h_n$  – proovikeha kõrgus peale külmumis-sulamistsükleid (mm). [22]

Arvutuste põhjal koostati joonis 2.5, kujutamaks külmumis-sulamistsüklite järgset mõju proovikehadele. Külmumis-sulamistsüklite jooksul vähenes kaudne tõmbetugevus ning kõige kiiremat langust täheldati 8 tsükli korral. Peale 16 tsükli oli A3% lahuses olnud



proovikeha tõmbetugevuse väärtuseks 0,67 MPa, A10% puhul 0,71 MPa ja A20% puhul 0,85 MPa. Seega suurimat mõju tõmbetugevusele avaldas 3%-ne lahus, nii soola A kui ka soola B puhul, tulemusi illustreerib joonis 2.5 [22], sama tulemust täheldati ka 2.6.1 kirjeldatud keetmiskatse tulemustes. Küll aga mõjutas sool B tugevusnäitajaid vähem kui sool A ning võimalik põhjus selleks on, et sool B koosneb kolmest komponendist, milles on seega kokkuvõtvalt vähem korrosiooni põhjustavad ühendeid NaCl ja CaCl<sub>2</sub>. [22]



Joonis 2.5 Kaudse tõmbetugevuskatse väärtused [22]

Suurimat tõmbetugevuse vähenemist tekitas 3%-ne lahus külmumistemperatuuri languse tõttu. 3% lahusel on võrreldes 10% ja 20% lahusega kõrgem külmumispunkt, mis võib külmumis-sulamistsüklite jooksul suurendada segu sees paisumisrõhku, mis põhjustab lõhenemistõmbetugevuse vähenemist märkimisväärselt. [22]

#### 2.6.4 Cantabro katse

Norra talihooldde tegemisel on suur osa teede soolamisel. 2010/2011 aasta hooajal läks teedel libedusetõrje tagamiseks kasutusele 238 000 tonni soola. Kuigi kloriidide kasutamine annab kiire ja efektiivse tulemuse teekatteseisundis, hakati uurima soola mõju asfaltsegule. Peamiselt olid kasutusel kaks erinevat soolalahust, naatriumkloriid

ja kaaliumformiaat. Katsetamise eesmärgiks oli hinnata asfaltsegu mehaanilist vastupanu kokkupuutes kahe erineva soolalahusega kasutades Cantabro katset. [3]

Katsetel kasutati kahte erinevat Norra spetsifikatsioonidele vastavat asfaltsegu hindamiseks, kas erinevatele täitematerjalidele mõjuvad kloriidid erinevalt. Asfaltsegude koostis on toodud tabelis 2.5. Võrreldavate andmete saamiseks teostati 8 külmumis-sulamistsükli katsekehadega mis olid a) viidud kokku erineva kontsentratsiooniga soolalahustega, b) vees ja c) laboritingimustes kuivana, täpsed andmed on kajastatud tabelis 2.6. [3]

Tabel 2.5 Katsel kasutatud asfaltsegude koostis [3]

Segukoostis	Koostise osakaal, %	
	Segu 1	Segu 2
Kvarts	21,25	48,20
Albiit	30,35	18,30
Muu	48,40	33,50

Tabel 2.6 Katsekeskkond külmumis-sulamistsükliks [3]

Grupp	Jääsulatuskloriid	Kontsentratsioon (% lahuse massist)
a)	NaCl	25
a)	NaCl	12,5
a)	CHKO <sub>2</sub>	50
a)	CHKO <sub>2</sub>	25
b)	H <sub>2</sub> O	100

Katseks vajaminevad proovikehad valmistati laboris kasutades Marshalli lööktihendajat. Katsekehade valmimise järgselt jäeti need 48 tunniks toatemperatuurile seisma, misjärel teostati vajalikud kaalumised ja mõõtmised algandmete kogumiseks. Seejärel teostati katsekehadele eritingimustes ( a), b) ja c)) 8 külmumis-sulamistsükli. Tsükli teostamisel teostati toatemperatuuril Cantabro katse. [3]

Katse viidi läbi vastavalt standardile EN-12697-17:2017. Katse teostamiseks on vaja Los-Angelese katseseadet, termomeetrit, kuivatusahju ja kaalu täpsusega ±0,1%. Iga

proovi kohta tuleb teha katse viie katsekehaga. Katse käik: kogu katse vältel peab olema tagatud püsiv temperatuur, kõikumisvahemikuga kuni  $\pm 2$  °C. Enne katse käiku tuleb katsekehad hoida vähemalt 4 tunni jooksul katsetemperatuuril. Peamiselt on katsetemperatuuriks 15-25 °C. Mõõdetakse katsekeha algkaal ja märgitakse kui  $W_1$ . Seejärel asetatakse üks katsekeha Los-Angelese katseseadmesse, eemaldatakse metallkuulid ning tehakse konstantsel pöörlemissagedusel 31 pööret/minutis kuni 33 p/min 300 korda. Pöörete lõppedes võetakse katsekeha trumlist välja, eemaldatakse rätikuga õrnalt lahtised osakesed ning kaalutakse proovikeha mass  $W_2$ . [24]

Katsekeha vastupanu hinnatakse läbi osakeste kao valemiga 2.3,

$$PL = 100 \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (2.3)$$

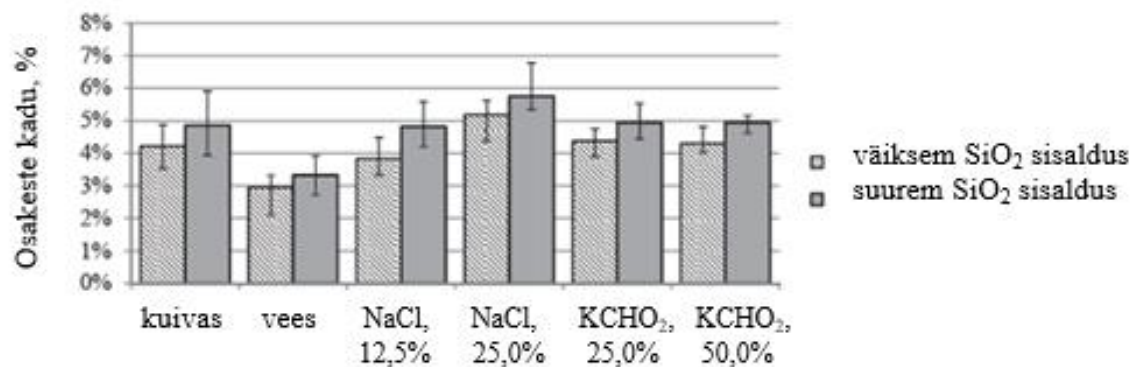
kus  $PL$  - massikao protsent (%);

$W_1$  - katsekeha algkaal grammides (g);

$W_2$  - katsekeha lõppkaal grammides (g). [24]

Arvutused ümardatakse täisarvuni. [24]

Laboris tehtud katsed arvutati vastavalt valemile 2.3 ning saadud tulemustest koostati joonis 2.6. Katsetulemused näitasid selgelt eristuvat mustrit nii kloriidide kui ka asfaltsegude puhul. Asfaltsegu puhul näitas suuremat vastupanu segu, millel oli väiksem ränidioksiidi ( $\text{SiO}_2$ ) sisaldus. Suurimat kahju põhjustas soolalahustest NaCl 25%-ne lahus. Kõige paremat vastupanu näitasid katsekehad, mille külmumis-sulamistsüklid olid läbi viidud vees. Kaaliumformiaadi ( $\text{KCHO}_2$ ) ja naatriumkloriidi 12,50%-ne lahus andis üsna sarnase tulemuse asfaltsegu vastupidavusele. [3]



Joonis 2.6 Cantabro katsetulemused [3]

Laboriuuringu eesmärgiks oli tekkivate kahjustuste hindamine segudele, mis on külmumis-sulamistsüklite jooksul kokkupuutes jääsulatuskloriidide lahustega, kuna viimastel on sideaine ja täitematerjali vahelist naket vähendav mõju. Nii naatriumkloriid kui ka kaaliumformiaat avaldasid suuremates kui ka väiksemates kontsentratsioonides mõju asfaltsegu vastupidavusele. Tulemuste läbi tehti kaks peamist järeldust. Kõige suuremat negatiivset mõju nakkele avaldas 25%-ne naatriumkloriidi lahus, kui NaCl<sub>2</sub> 12,5%-ne lahus avaldas kaaliumformiaadiga ligilähedast väiksemat mõju. Teiseks järelduseks sai, et suurema kvartsisisaldusega segu on külmumis-sulamistsüklitele väiksema vastupanuga võrreldes vähesema SiO<sub>2</sub> sisaldusega asfaltseguga. [3]

### **3. KATSED**

Käesoleva lõputöö katsete teostamise eesmärgiks on uurida, kas ja kuidas mõjutavad teehooles kasutatavad kloriidid asfaltsegu vastupidavust kaudsele tõmbetugevusele. Katseplaani näeb ette kuue standardiseeritud ja ühe eksperimentaalse katse teostamist. Katsete detailsem kirjeldus on toodud peatükkides 3.1 ja 3.2.

Katsete teostamisel kasutati kulumiskihi segu AC 16 surf 70/100 ja kandevkihi segu AC 20 base 70/100. Soolalahuse valmistamiseks kasutati naatriumkloriidi. Kasutatud sool on kasutuses teehooles teostamisel ning pärineb Marokost.

#### **3.1 Standarditele vastavate katsete kirjeldused**

Katsed teostati asfaltsegudega AC 16 surf ning AC 20 base. Mõlemast segust valmistati 12 proovikeha, kokku 24 proovikeha. Base segu puhul kasutati proovikehade valmistamiseks lööktihendajat vastavalt standardile EVS-EN 12697-30. [25] Löökide arv base segu puhul oli 2 x 30 lööki, imiteerimaks vuugiproovi. Surf segu proovikehad valmistati vastavalt standardile EVS-EN 12697-31 güraatortihendajaga. [26]

Katsekehade valmistamisel ei olnud eesmärgiks lähtuda standardis EVS-EN 901-3 kohaselt nõutud tihendamisenenergia nõuetele vastavuse saavutamise, mis mahumassi määramise puhul on 2 x 50 lööki ja veepüsivuse katse puhul 2 x 35 lööki. [27] Löökide arv valiti sedavõrd madal, et proovikeha jääks võimalikult poorne, kuid piisav edasiste katsete teostamiseks. Poorsema katsekeha puhul maksimeeriti tõenäosust, et katseplaanis olevate külmumis-sulamistsüklite läbi viimine põhjustaks katsekeha lagunemist ja tugevusnäitajate vähenemist.



Joonis 3.1 AC 20 base segu jagamine proovikehade valmistamiseks [autori erakogu]



Joonis 3.2 Lööktihendajaga AC 20 base proovikehade valmistamine [autori erakogu]

Joonisel 3.2 on näha lööktihendajaga base segust proovikehade valmistamist. Eelnevalt välja kaalutud asfaltsegu valati eelsoojendatud silindrilisse vormi, misjärel toimus lööktihendajaga tihendamine. Proovikehadel lasti vormides jahtuda, kuni saavutati temperatuur 40 °C. Seejärel suruti proovikehad mehaaniliselt vormidest välja, asetati uuesti jahtuma ning seejärel teostati katsekehadele järgnevad katsed, mis on välja toodud tabelis 3.1.

Kõik tabelis 3.1 teostatud katsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli teede ja liikluse teadus- ja katselaboratooriumis töö autori poolt labori personali kaasabil. Külmutamisulamistsüklite läbiviimiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide teadus- ja katselaboratooriumi kliimakambrit.

Tabel 3.1 Lõputöös teostatud standardiseeritud katsete loetelu

<b>Katse nimetus</b>	<b>Standardi number</b>
Lahustuva sideaine sisaldus	EVS-EN 12697-1:2020
Terastikulise koostise määramine	EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019
Erimassi määramine (meetod A)	EVS-EN 12697-5:2018
Asfaltproovikehade mahumassi määramine (meetod D)	EVS-EN 12697-6:2020
Asfaltsegust proovikehade veepüsivuse määramine (meetod A)	EVS-EN 12697-12:2018
Asfaltsegust proovikehade kaudse tõmbetugevuse määramine (meetod A)	EVS-EN 12697-23:2017
Proovikehade valmistamine lööktihendajaga	EVS-EN 12697-30:2018
Proovikehade valmistamine güraatortihendamisega	EVS-EN 12697-31:2019

### **3.1.1 Sideaine sisaldus ja terastikuline koostis**

Asfaltsegu koostise vastavuse kontrolliks teostati mõlema seguga lahustuva sideaine sisalduse ja terastikulise koostise määramine vastavalt standarditele EVS-EN 12697-1 ja -2. Sideaine ekstraheeriti kasutades metüleenkloriidi lahustit ning leiti massierinevuste meetodi kaudu. Massierinevuste meetodi puhul kaaluti 0,1 grammise täpsusega kaalul enne sideaine eraldamist sõelte, sõelte+asfaldi ning hülsi kaal. Ekstraheerimise lõppedes kaaluti uuesti sõelte+kivi ning hülsi+filleri kaal.

Seejärel kasutades valemit 3.1, leiti sideaine sisalduse kaal ja protsent. [28]

$$S = \frac{100 \times [M - (M_1 + M_w)]}{M - M_w} \quad (3.1)$$

kus  $S$  – lahustuva sideaine sisaldus, %,  
 $M$  – kuivatamata katsekoguse mass, g,  
 $M_1$  – eraldatud mineraalmaterjali mass, g,  
 $M_w$  – kuivatamata katsekoguses olev vee mass, g [28] (antud lõputöö käsitluses kasutatakse kuivatatud katseproovi ning väärtust  $M_w$  arvutustes ei esine)

Terastikuline koostis määrati sõelumise ja kaalumise kaudu, peale sideaine ekstraheerimist, täielikult puhtale ja kuivale proovile. [29] Igale sõelale jäänud katseproov valati kumerasse anumasse ning kaaluti eraldi. Saadud tulemused märgiti tabelisse ning kasutades Microsoft Excel programmi koostati sõelkõvera graafik, mis on nähtav peatükis 4.1.2. Katse teostamiseks jagati vajalik kogus materjali vastavalt standardile EVS-EN 12697-28 kasutades kvarteeringuprotsessi. [30]



Joonis 3.3 Asfaltsegust sideaine ekstraheerimine [autori erakogu]





Joonis 3.4 Täitematerjali sõelumine ekstraheerimise järgselt [autori erakogu]

### 3.1.2 Mahulised omadused

Mahuliste omaduste määramiseks määrati segu ja proovikehade eri- ja mahumassid. Erimassina mõistetakse poorideta segu massi ning katsetamiseks vajaminev proovikogus võeti kasutades kvarteerimist, misjärel see kobestati ja eraldati algosakesteks. Erimassi määramiseks kasutati mahulist meetodit ehk standardi EVS-EN 12697-5 meetodit A. [31]

Proovikehade mahumassid määrati vastavalt standardi EVS-EN 12697-6 meetod D kohaselt ehk leiti mõõtmepõhine mahumass. Mahumassina arvestatakse segu massi, mis sisaldab poore. Silindriliste proovikehade katsetamiseks on vaja mõõtmiste teostamiseks vähemalt 0,1 grammise täpsusega kaalu ning vähemalt 0,1 mm täpsusega nihikut. Mõõtmised teostati kuivale proovikehale ning mõõtmised viidi läbi vastavalt standardile EVS-EN 12697-29. [32], [33] Mõõtmiste järgselt arvutati valemi 3.2 kohaselt mõõtmepõhine mahumass.

$$\rho_{bdim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^3 \quad (3.2)$$

kus  $\rho_{bdim}$  – mõõtmepõhine mahumass, Mg/m<sup>3</sup>,  
 $m_1$  – kuiva proovikeha mass, g,

$h$  – proovikeha kõrgus, mm,  
 $d$  – proovikeha diameeter, mm. [32]

Läbi eri- ja mahumassi andmete arvutati proovikehas olevate pooride maht ehk jäävpoorsus vastavalt standardile EVS-EN 12697-8 0,1 protsendise täpsusega, valemiga 3.3. [34] Jäävpoorsuse kaudu hinnati segu poorsust ning selle vastavust standardis EVS-EN 901-3 esitatud nõuetele.

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (3.3)$$

kus  $V_a$  – asfaldist proovikeha poorsus, %  
 $\rho_m$  – asfaldisegu erimass, Mg/m<sup>3</sup>,  
 $\rho_b$  – asfaldist proovikeha mahumass, Mg/m<sup>3</sup>. [34]

Lõputöös saadud tulemused ja võrdlused standardiga on kajastatud alapeatüki punktis 4.1.3.

### 3.1.3 Veepüsivus ja kaudne tõmbetugevus

Veepüsivuse meetod A kohaselt jagatakse katsekehad kahte gruppi – kuiv ja märg grupp. Katse järgselt arvutatakse veepüsivus märja ja kuiva grupi kaudse tõmbetugevuse väärtuste suhtena. Käesolevas lõputöös jagati mõlemast segust kolm proovikeha kuiva gruppi ja kolm proovikeha märga gruppi. Mõlema grupi puhul mõõdeti proovikehade diameetrid, kõrgused ja mõõtmepõhine mahumass, nagu kirjeldatud alapeatüki punktis 3.1.2. [35]

Märja grupi puhul rakendati mõõtmiste järgselt proovikehadele 30 minutit vaakummahutis vaakumit, misjärel võeti vastavalt standardile EVS-EN 12697-29 uuesti proovikeha mõõtmised. [35], [33] Mõõtmiste järgselt asetati proovikehad veevanni temperatuurile 40 °C 14-ks päevaks. Standardiga on määratud katsete veevannis oleku ajaks 72 ±2 tundi, kuid antud lõputöö katsena hoiti proovikehasid veevannis 14 päeva ehk kaks nädalat.

Kuiva grupi puhul mõõdeti proovikehade mõõtmised ning seejärel jäeti kontrollgrupina toatemperatuurile 14-ks päevaks seisma. [35] Proovikehad asusid TalTechi teedelaboris riivil. Kuiv grupp on veepüsivuse katsel vajalik suhtearvu arvutamiseks, kuid antud

lõputöös kasutatakse seda lisaks kontrollgrupina, mille katsetulemusi võrreldakse ka külmumis-sulamistsüklid läbinud katsekehade kaudse tõmbetugevuse väärtustega.

Märja grupi proovikehasid hoiti veevannis 14 päeva, et viia läbi „pikk veepüsivuse katse“. Katsekehade vees hoidmine standardis määratud ajast (72 ±2 tundi) kauem viib proovikehad tavapärasest katsest ebasobivamasse konditsiooni ja eelduslikult annab nõrgemad tulemused kaudse tõmbetugevuse katsel. Katse eesmärgiks oli uurida, kas eeldus vastab tegelikkusele ning seeläbi hinnata, kas pikaajaline kokkupuude veega ja pidev kõrge temperatuur on asfaltsegule koormavam kui lühiajaline kokkupuude antud tingimustega.

Peale kahte nädalat võeti katsekehad veevannist välja ning lasti neil seista 30 minutit tasasel pinnal. Seejärel viidi katsekehad veevannis kaudse tõmbetugevuse katse sooritamiseks vajalikku konditsiooni. [35] Konditsiooni viimiseks hoiti proovikehasid 4 tundi veevannis temperatuuril +15 °C. Seejärel asetati proovikeha kaudse tõmbetugevuse katseseadme katsepea vahele diameetriliseks koormamiseks. [23] Veepüsivusel kasutatud kaudse tõmbetugevuse katse detailne kirjeldus ja arvutusvalem on toodud peatükis 2.6.2.

Lisaks veepüsivuse proovikehadele teostati kaudse tõmbetugevuse katse ka külmumis-sulamistsüklid läbinud proovikehadele. Kõik kaudsele tõmbetugevuse katsele eelnenud proovikehade konditsioonid on toodud tabelis 3.2. Külmumis-sulamistsüklite arv on valitud vastavalt pika veepüsivuse katsele 14 päeva ehk 14 24 tunnist tsüklit. 3%-ne NaCl lahus on valitud tulenevalt kõige laialdasemalt Eesti teehoides kasutusel olevale naatriumkloriidile [8] ning vastavalt teadusartiklitele annab suurima negatiivse mõju segu vastupidavusele just 3%-ne soolalahus [22]. Gruppide B, C ja D puhul viidi katsekehad enne kaudse tõmbetugevuskatse sooritamist veevannis temperatuurile 15 °C. Seejärel toimus proovikeha koormamine kuni selle purunemiseni.

Tabel 3.2 Katsekehadele rakendatud konditsioonid

<b>Grupp</b>	<b>Konditsioon</b>
A	Kontrollgrupi katsekehad hoitud toatemperatuuril kuivana
B	Katsekehad on hoitud 2 nädala vältel 40°C vees
C	Katsekehadele on teostatud 14 külmumis-sulamistsüklit puhtas vees
D	Katsekehadele on teostatud 14 külmumis-sulamistsüklit 3% NaCl lahuses



Joonis 3.5 Kaudne tõmbetugevuskatse AC 20 base katsekehale [autori erakogu]



Joonis 3.6 AC 20 base proovikehad peale kaudse tõmbetugevuse katset [autori erakogu]

### 3.2 Külumis-sulamistsüklite katse kirjeldus

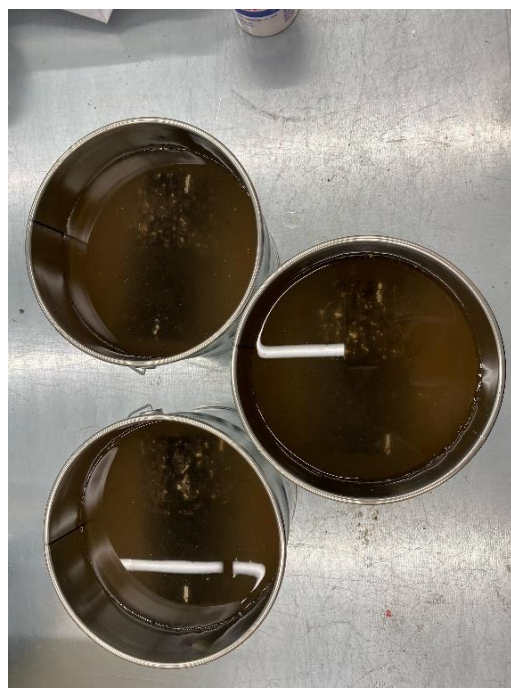
Eksperimentaalse katsena teostati asfaldist proovikehadele külumis-sulamistsüklid kliimakambris. Asfaltsegude külmakindluse katsetamiseks ei ole Eestis seni kasutusel ühtegi standardit ega juhendit. Käesoleva lõputöö külmakindluskatse teostus põhineb välismaisest teaduskirjandusest kogutud infol, millest on ülevaade antud peatükis 2.6. Samuti on mõningaid juhiseid võetud standardist EVS-EN 1367-1, mis kirjeldab täitematerjalide külmakindluse katsetamist.

Katse hüpoteesiks on, et 3%-ne naatriumkloriidi lahus annab märgatavalt nõrgemad tulemused kaudse tõmbetugevuse katses, võrreldes tulemustega puhtas vees. Hüpotees põhineb uuritud teadusartiklites saadud tulemustele ning visuaalsest pildist kevaditi esinevast teekatete seisundist.

Võrreldavate tulemuste saamiseks teostati tsüklid nii AC 16 surf kui ka AC 20 base segule. Mõlemast segust kolm proovi läbis külmumis-sulamistsüklid vees (grupp C) ning kolm proovi läbis tsüklid soolalahuses (grupp D). Proovikehad asetati 3-liitristesse puhastesse värvipurkidesse, kus igas purgis oli kaks proovikeha, kokku kuus anumad. Grupp C puhul täideti anumad ligikaudu 1,5 liitri veega ning grupp D puhul samas mahus soolalahusega.



Joonis 3.7 Katsekehade paigutus anumates [autori erakogu]



Joonis 3.8 Katsekehad soolalahuses [autori erakogu]

Tabel 3.3 Gruppide C ja D külmumis-sulamistsüklite keskkond

Grupp	Ligikaudne vedeliku kogus, g	Vedeliku koostis, %
C	1500	100% H <sub>2</sub> O
D	1500	97% H <sub>2</sub> O, 3% NaCl

Vastavasse keskkonda asetatud proovikehad läbisid Tallinna Tehnikaülikooli ehitusmaterjalide teadus- ja katselaboratooriumi kliimakambris 14 külmumis-sulamistsükli. Külmumiste ja sulamiste jälgimiseks kasutati anumate sees andureid, mis edastasid reaajas graafikuid temperatuuri ja aja omavahelisest seosest. Viis andurit asusid anumate sees kahe proovikeha vahel ning üks andur asus kliimakapis õhus mõõtmaks kapisest temperatuuri. Andurite asetus anumates on näha joonisel 3.9.



Joonis 3.9 Katsekehad kliimakambris [autori erakogu]

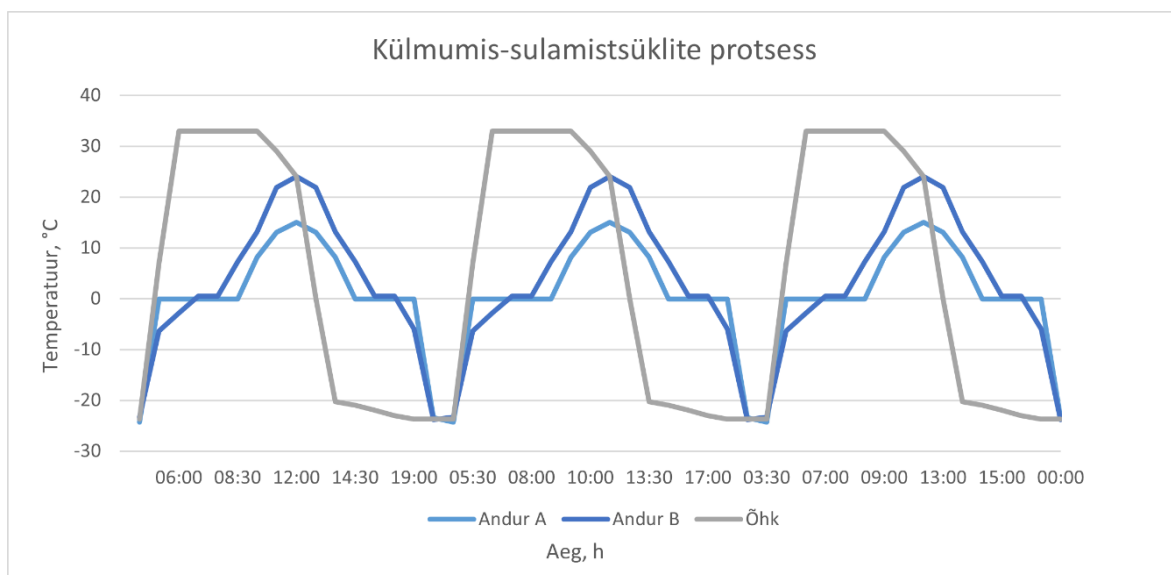
14 tsükli toimused kliimakambris automaatselt 14-ne ööpäeva jooksul 24 tunniste tsüklikena. Tsükli lõppedes viidi katsekehad Tallina Tehnikaülikooli teedelaborisse ning määrati kaudne tõmbetugevus vastavalt standardile EVS-EN 12697-23. [23]

### 3.2.1 Külmumise ja sulamise protsess kliimakambris

Vee külmumine ja sulamine toimub alati konstantsel temperatuuril  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mida nimetatakse sulamistemperatuuriks. Sulamise käigus energia neeldub ning tahkumise käigus energia eraldub. Temperatuuri tõustes hakkavad aine osakesed üksteisest kaugemale liikuma ning suureneb nende vastastikmõju potentsiaalne energia. Aine täielikuks sulamiseks vajaminevat energia kogust iseloomustab mõiste sulamissoojus. Jää sulamissoojuseks on  $330\text{ kJ/kg}$  ehk  $1\text{ kg}$  jää sulamisel neeldub  $330\text{ 000 J}$  energiat,

vee jäätumine on sulamise pöördprotsess ning jäätumise käigus eraldub sama kogus energiat. [36]

Allolev joonis 3.10 kirjeldab lõputöö raames kiimakapist saadud anduri tulemusi külmumis-sulamistsüklite protsessist. Mõlema anduri graafikutelt on näha ajavahemik, mil nii sulamise kui ka külmumise protsessis püsib temperatuur konstantselt 0 °C juures. Temperatuuri tõusmisest alates liikus anumates oleva vedeliku temperatuur -24,3 kraadi pealt 0 kraadi juurde 2 tunniga, kuhu jäi püsima kolmeks tunniks (andur A). Külmunud vedeliku soojenemine toimus hüppeliselt, kuid sulamistemperatuuri saavutamisel jäi selle juurde püsima nii kauaks, kuni kogu anumates olev jää oli sulanud [37].



Joonis 3.10 Külmumis-sulamistsüklite protsess

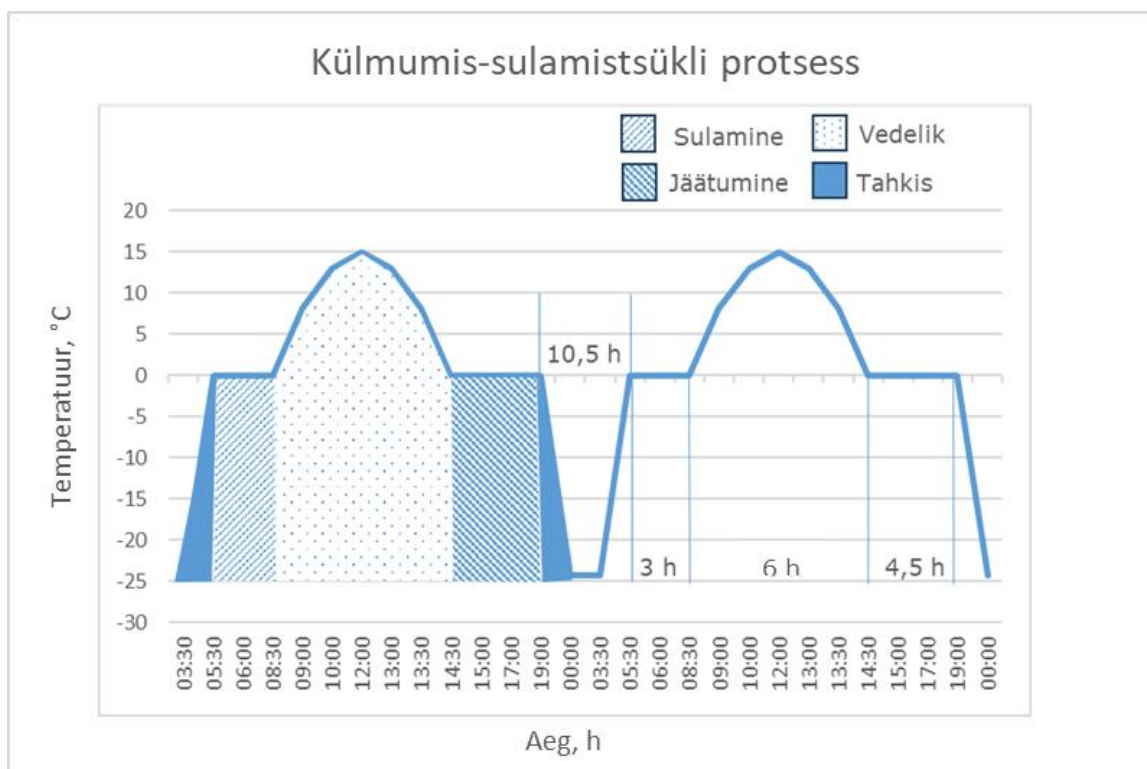
Jää täieliku sulamise järgselt hakkas ka anumates oleva vedeliku temperatuur tõusma, kuid saavutas oma haripunkti alles siis, kui õhus olev temperatuur oli juba langema hakanud. Seejärel temperatuuri langemisel taaskord sulamistemperatuurini, algas külmumisprotsess ning temperatuur püsis 0 °C juures kuni anumates olev vedelik oli täielikult läbi jäätunud [37]. Järgnes temperatuuri langemine seni, kuni kliimakapis oleva õhu temperatuur tõusma hakkas ning algas uus tsüklil.

24 tunni jooksul liikus temperatuur vahemikus ligikaudu -25 kraadi kuni +35 kraadi. Joonise hall graafik kirjeldab anduri tulemusi, mis asus kliimakapis õhus ning mõõtis kapisest temperatuuri. Andur A kirjeldab tulemusi anumates, mis asusid kapi ukse ees ning andur B tulemusi anumatele, mis asusid kapi seinas ees.

Andur A ja B tulemuste erinevused tulenevad kliimakapi ehitusest, millel ventilaator asub siseseinas, mis põhjustab ventilaatorile lähemal olevate anumate intensiivsemat temperatuuri muutust. Anduri A puhul püsis sulamisel temperatuur 0 °C ümber 3 tundi, kuid andur B puhul püsis sulamistemperatuur vaid 1 tunni. Jäätumise puhul püsis andur A puhul temperatuur sulamissoojusel 4,5 tundi ning andur B puhul 2 tundi.

Kliimakapi ehitusest tulenevat erinevust sulamise ja külmumise kiiruses minimeeriti anumate asetusega. Igast grupist asus üks proovikeha kambri tagumises servas, keskel ning ukse ees. Seeläbi toimus kõikides anumates olenemata kiiruste erinevusest 14 24-tunnist külmumis-sulamistsükli. Vedeliku sulamise kiiruse erinevust on näha eelpool oleval joonisel 3.9.

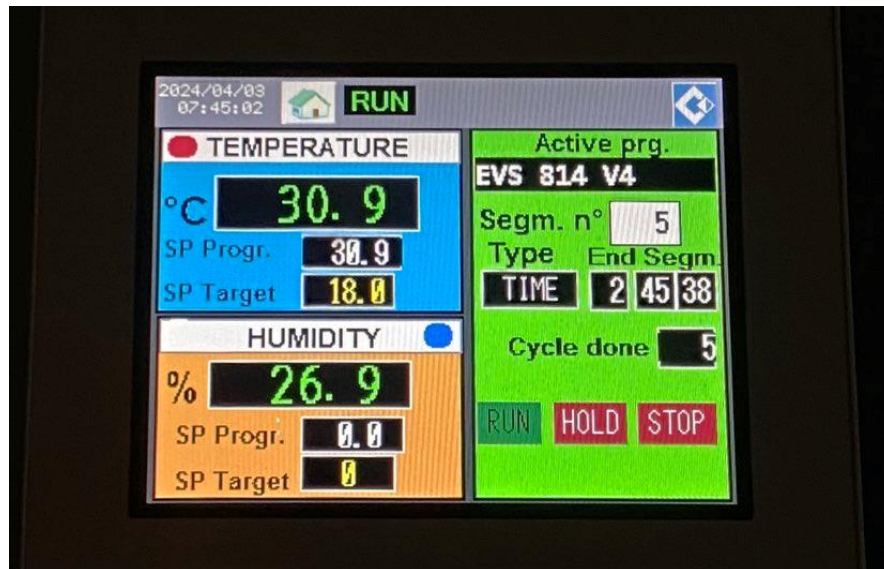
Külmumise ja sulamise detailset protsessi kirjeldab joonis 3.11. Joonise koostamisel on kasutatud anduri A andmeid ehk anuma sees oleva anduri näitajaid. 24-tunnise protsessi käigus püsis temperatuur miinuskraadidel 10,5 tunni vältel, sulamisprotsess toimus 0 °C juures 3 tundi, plusskraadidel püsis anumasine temperatuur 6 tundi, misjärel toimus jäätumine 0 °C juures 4,5 tundi. Seejärel algas uus samasugune tsükkel.



Joonis 3.11 Külmumis-sulamistsükli protsess



Anduri tulemused näitavad, et jäätumine 0 °C juures kestis 1,5 tundi kauem kui samal temperatuuril sulamine. Samuti püsis temperatuur miinuskraadidel kauem kui plusskraadidel – vastavalt 10,5 h ja 6 h. Kliimakapi sisetemperatuur püsis plusspoolel 8,5 tundi ja miinuspoolel 15,5 tundi.



Joonis 3.12 Kliimakapi infokraani näitajad [autori erakogu]

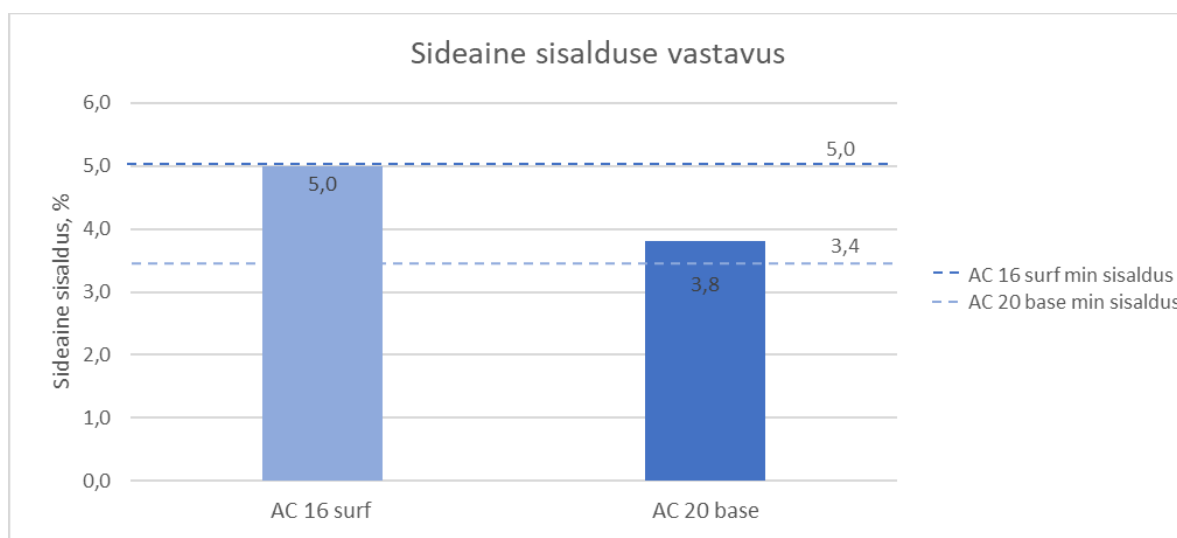
## 4. KATSETULEMUSED JA JÄRELDUSED

### 4.1 Asfaldi vastavus

Standardis EVS-EN 901-3 on määratud asfaltbetoonile rakenduvad nõuded. Antud lõputöö katsetulemusi võrreldakse standardis esitatud terastikulise koostise, lubatud poorsuse ning kaudsete tõmbetugevuste läbi leitud veepüsivuse omadustega. [27] Järgnevad alapeatükid kajastavad katsete käigus saadud tulemusi ning nende vastavust standardile.

#### 4.1.1 Sideaine sisaldus

Sideaine sisaldus leiti ekstraheerimise käigus ning tulemused arutati kasutades standardis EVS-EN 12697-1 massierinevuse meetodi valemit. Standardi EVS-EN 901-3 tabel 10 kohaselt on minimaalne lubatud sideaine sisaldus AC 16 surf segu puhul 5,0%, mis vastab täpselt laboris määratud sideaine sisaldusele. AC 20 base segu puhul on minimaalne sideaine sisalduse nõue toodud standardi tabelis 12, milleks on 3,4%. Laboris teostatud katsetulemusena saadi segu sideaine sisalduseks 3,8%. Seega vastavad mõlema segu laboratoorselt määratud sideaine sisaldused standardis esitatud nõuetele.



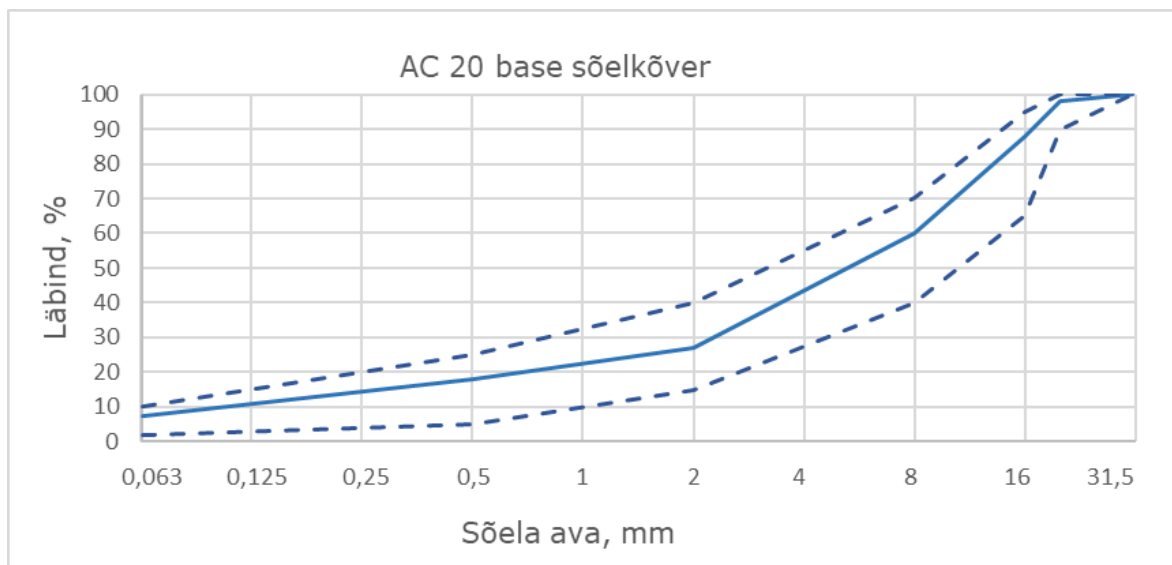
Joonis 4.1 Segu sideaine sisalduse vastavus standardile

Standardis esitatud nõudest väiksem sideaine sisaldus võib põhjustada katte laikudena murenemist, mille tagajärjena hakkavad tekkima löökaugud. Löökaugud omakorda suurendavad vee katendi alumistesse kihtidesse tungimist. Liiga suur sideaine sisaldus

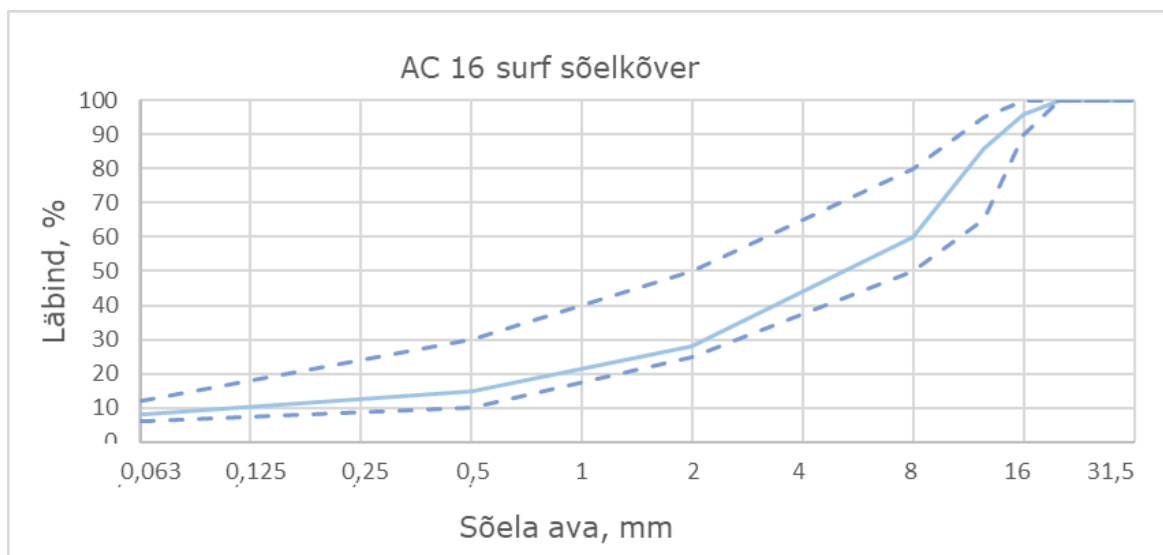
muudab katte pinna „higistavaks“, mis põhjustab sideaine kleepumist rehvide ja autokere külge. Samuti võib suur bituumeni osakaal tekitada täitematerjaliga liigselt tugeva nakke, mis ei lase liiklusel täitematerjali pinda piisaval hulgal paljandada. See põhjustab teekatte libedaks muutumist. [2]

#### 4.1.2 Terastikuline koostis

Standardis EVS-EN 901-3 on määratud asfaltbetoonile rakenduvad nõuded. Üheks nõudeks on vastavus terastikulisele koostisele. Standardi tabelis 10 on välja toodud sõela läbindi minimaalsed ja maksimaalsed väärtused, mille vahele peab jääma katsetatud asfaltsegu terastikuline koostis AC surf segude puhul ja tabel 12 AC base segude jaoks. Mõlemad lõputöös kasutatud asfaltsegud vastavad oma terastikulise koostisega standardis toodud nõuetele ning sobivad edasiseks katsetamiseks. Segude sõelkõverad on näidatud joonistel 4.2 ja 4.3.



Joonis 4.2 AC 20 base sõelkõver

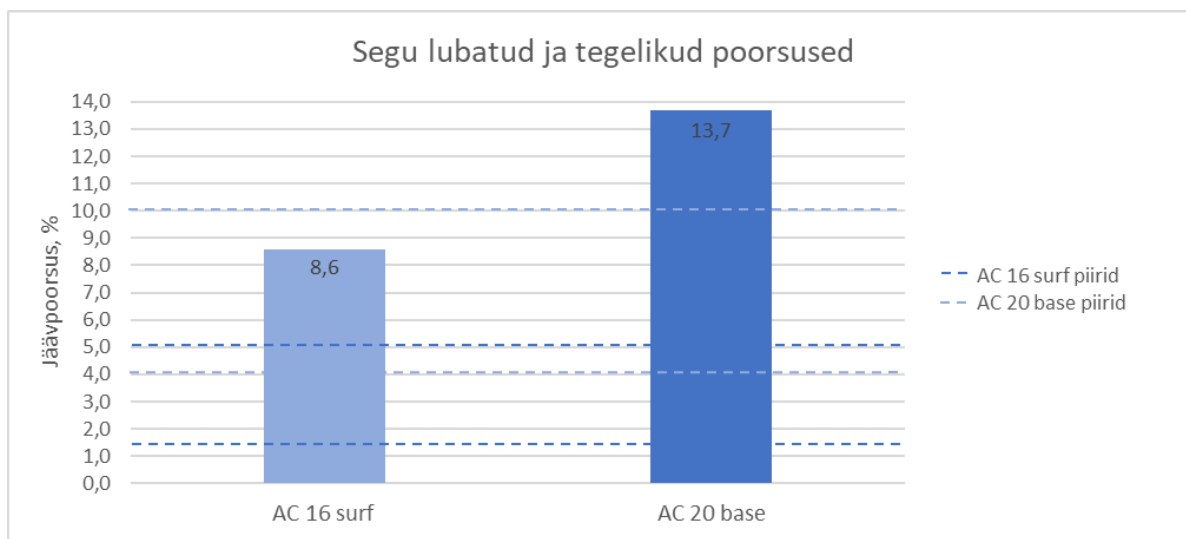


Joonis 4.3 AC 16 surf sõelkõver

### 4.1.3 Jäävpoorsus

Jäävpoorsuse andmete saamiseks määrati laboris proovikehadele mõõtmepõhine mahumass ja mahulise meetodi läbi erimass. Mahu- ja erimassi kaudu arvutati mõlema segu jäävpoorsused. Joonis 4.4 kajastab kõigi 12-ne lõputöös katsetatud AC 16 surf ja AC 20 base proovikeha keskmist jäävpoorsust mahuprotsentides. Kummagi katsetatud segu poorsusnäitajad ei jäänud standardis EVS-EN 901-3 toodud lubatud minimaalse ja maksimaalse poorsuse piiridesse. Antud tulemust oli ka oodata, kuna mõlema segu puhul valmistati taotuslikult võimalikult poorsed proovikehad, et võimendada külmumis-sulamistsükli jooksul eeldatavalt tekkivaid kahjustusi.

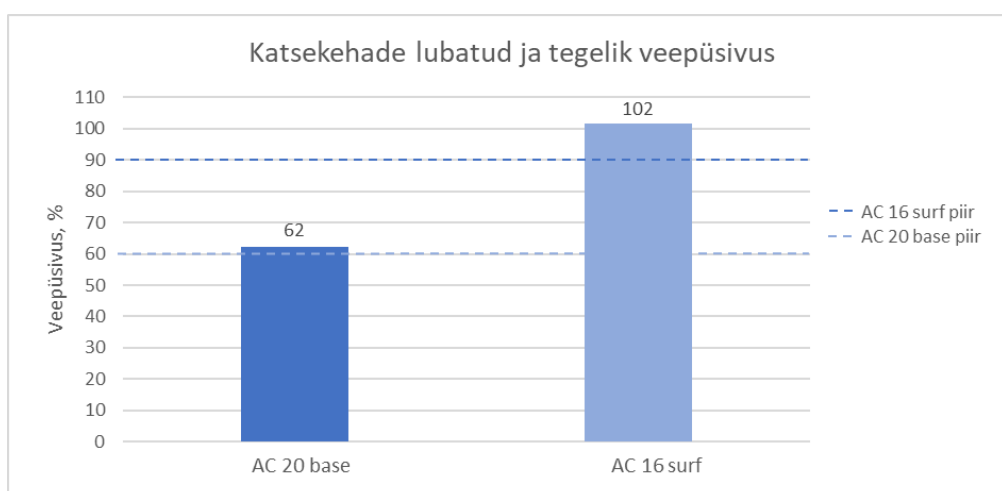
Katendi kõige poorsemateks kohtadeks on vuugid, mis on vastuvõtlikumad ilmastiku mõjutustele. Mida poorem on kate, seda suuremas osas saab vesi pooridesse imbuda ning läbi külmumis-sulamistsükli katendit lagundada. [2] Tavapärasest poorsemate proovikehadega on hüpoteetiliselt külmumis-sulamistsükli ja soolalahuse mõju katsetulemustes paremini tuvastatav. Joonisel 4.4 on kajastatud AC 16 surf ja AC 20 base proovikehade keskmine jäävpoorsus ning standardiga määratud minimaalsed ja maksimaalsed piirid jäävpoorsusele.



Joonis 4.4 Asfaltsegu lubatud ja tegelik jäävpoorsus

#### 4.1.4 Veepüsivus

Katsekehade veepüsivus arvutati kuiva ja märja grupi kaudse tõmbetugevuse katsetulemuste suhtena. Veepüsivuse katse teostati antud lõputöö puhul standardi EVS-EN 12697-12 meetodi A kohaselt ning katsetati 14 päeva möödumisel kuivalt ja märjalt. Kaudne tõmbetugevuse katse viidi läbi proovikehadele, mis olid eelnevalt viidud 15 °C temperatuuri juurde. Katse järgselt arvutati AC 16 surf ja AC 20 base mõlema grupi proovikehade tulemuste keskmine ning leiti nende suhe.



Joonis 4.5 Katsekehade lubatud ja tegelik veepüsivus

Standardi EVS-EN 901-3 kohaselt peab AC 16 surf segu puhul veepüsivus olema vähemalt 90% ning AC 20 base puhul vähemalt 60%. Pika veepüsivuse katse hüpotees, et kastetulemused ei vasta standardi nõuetele, ei pea tulemuste põhjal paika. Kulumiskihi segu veepüsivuse tulemuseks on 102% ning kandevkihi puhul 62%. Mõlemad segud on üle veepüsivuse nõutud alampiiri. Tulemusi kajastab joonis 4.5.

## 4.2 Asfaldi külmakindlus

Külmakindluse katsetamiseks kasutati TalTech ehitusmaterjalide katselabori kliimakambrit, milles teostati 14 külmumis-sulamistsükli. Tsüklid viidi läbi ajavahemikul 28.03.2024-11.04.2024. Tsükli lõpetamisel olid kõik proovikehad oma keskkonnas sulanud ning tsükli jooksul saavutanud plusskraadide maksimaalse temperatuuri.



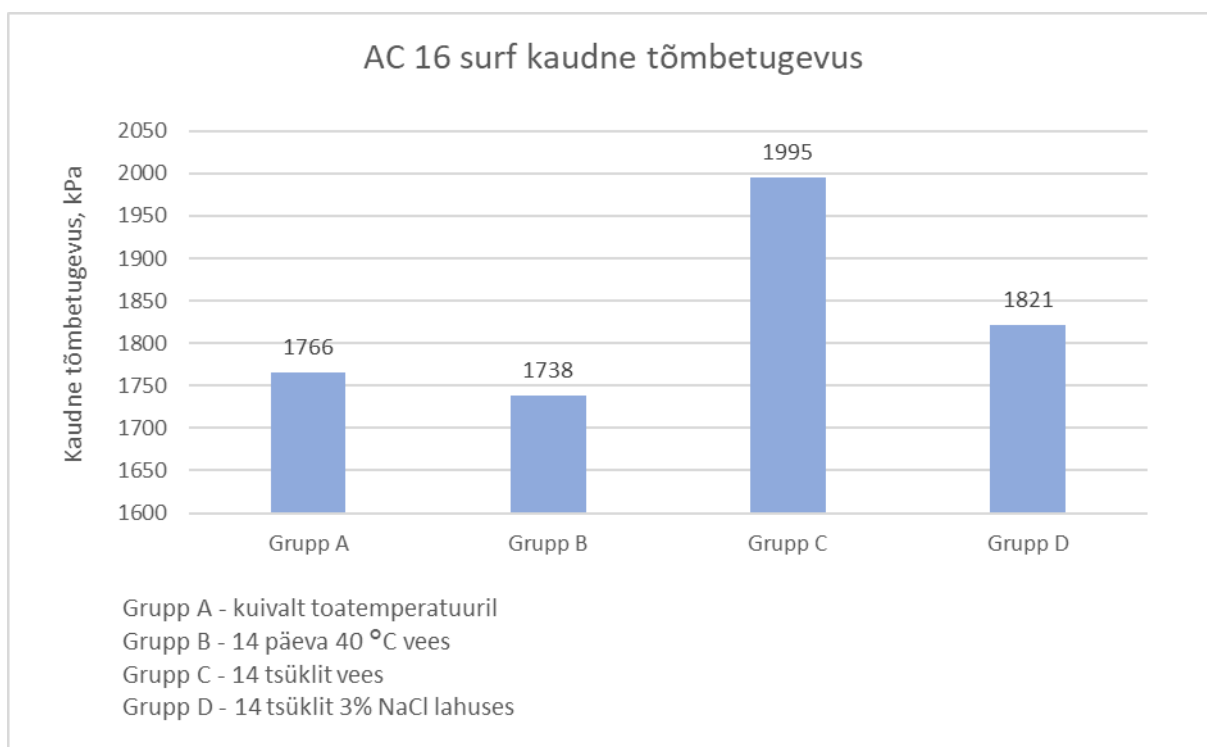
Joonis 4.6 Proovikehad kliimakambris külmumis-sulamistsükli lõppedes [autori erakogu]

### 4.2.1 Tulemused AC 16 surf segu puhul

Laboratoorse katsetulemuste ja arvutuste põhjal on koostatud joonis 4.7, mis kujutab AC 16 surf segust valmistatud iga grupi katsetulemusi. Lõputöö hüpoteesile täielikult vastupidise tulemuse andis AC 16 surf kaudne tõmbetugevus peale 14-t külmumis-

sulamistsükli. Katsetulemused nii vees kui ka soolas andsid mõlemad paremaid tulemusi, kui ilma konditsiooni viimata ja tavatingimustel katsetatud proovikehad. Peale külmumis-sulamistsükleid vees oli surf segu puhul kaudse tõmbetugevuse väärtus võrreldes referents katsekehaga 11% ja soolas 3% kõrgem.

Peale 14 tsükli vees oli kaudse tõmbetugevuse väärtuseks 1995 kPa ning soolas 1821 kPa. Peatükis 2.6.3 kirjeldatud katsetulemused peale 16 külmumis-sulamistsükli soolalahuses olid aga märgatavalt väiksema väärtusega – 670 kPa [22], võrreldes antud lõputöö tulemusega on see 63% madalam ning sarnaneb rohkem lõputöös saadud base segu katsetulemustele. Uurimuste tulemuste erinevus võib suuresti tuleneda asfaltsegu poorsusnäitajatest ning kasutatud materjalide eripäradest. 2.6.3 peatükis kirjeldatud uuringus valmistati proovikehad Marshalli lööktihendajaga tihendamisenergiaga 2 x 50 lööki, lõputöö puhul valmistati proovikehad güraatortihendajaga 8%-se poorsuseni.



Joonis 4.7 AC 16 surf kaudse tõmbetugevuse tulemused

Külmumis-sulamistsükli tulemuste erinevus soolalahuses ja vees vastas aga siiski hüpoteesile ning tulemused peale tsükli soolalahuses olid 9% madalamad kui vees – vastavalt 1821 kPa ja 1995 kPa. Võrreldes nelja grupi katsetulemusi andis kõige madalama kaudse tõmbetugevuse väärtuse grupp B, mida hoiti 14 päeva jooksul 40 °C juures vees.

Võrreldes grupi C ja D katsetulemusi, mis läbisid külmumis-sulamistsüklid, olid tulemused grupi A ja B-ga võrreldes suuremad, mis lükkab kulumiskihi segu puhul antud katsetulemuste põhjal lõputöös püstitatud hüpoteesi ümber.

**Purunemistüübiks** AC 16 surf katsekehade puhul osutus kategooria c) „kombinatsioon“ ehk näha on tõmbepurunemise jooned ning deformeerumine surveviistude läheduses. Kulumiskihist proovikeha täielikul purustamisel katsekeha uurides on näha, et purunemine toimus bituumenist ning on nähtav joonisel 4.8.



Joonis 4.8 AC 16 surf proovikeha purunemine kaudse tõmbetugevuse katsel [autori erakogu]

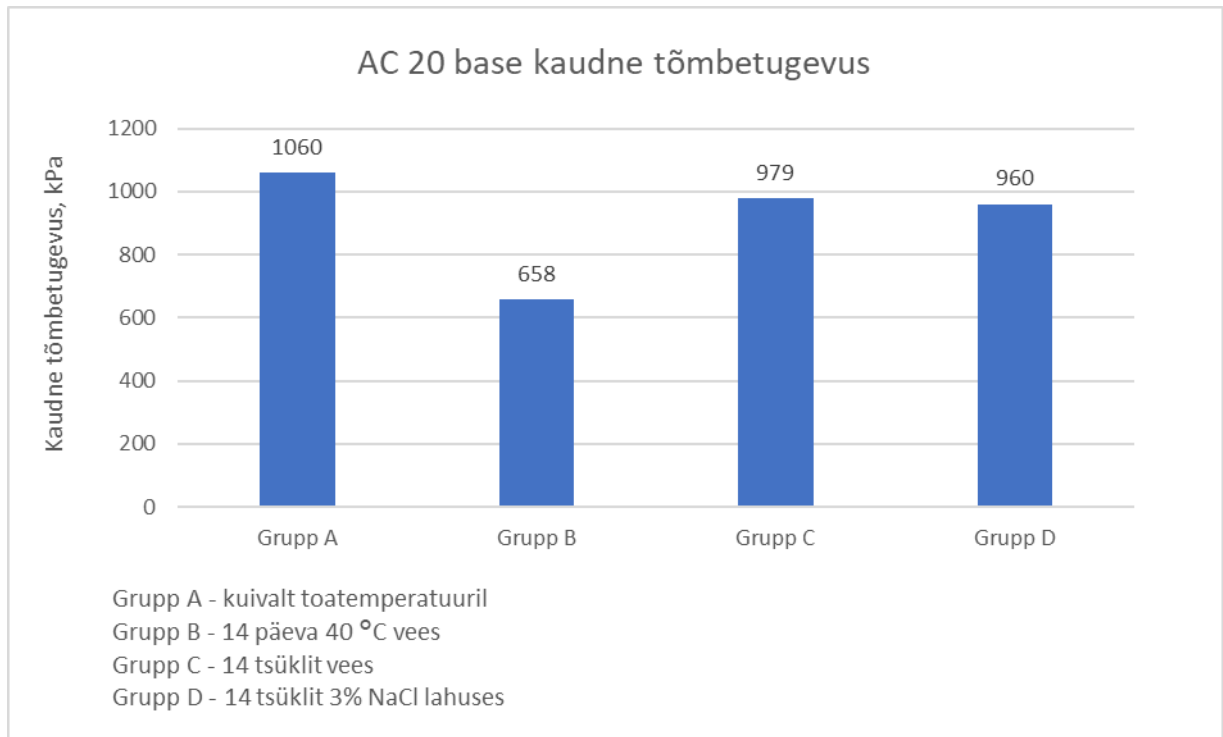
#### 4.2.2 Tulemused AC 20 base segu puhul

AC 20 base segu puhul olid kaudse tõmbetugevuse tulemused katsetatuna puhtas vees ja soolalahuses üsna sarnased. Kaudse tõmbetugevuse väärtus peale külmumist ja sulamist vees tuli 979 kPa ning soolas 960 kPa ehk vaid 2% vähem kui vees. Referents katsekehade tulemuseks ehk grupp A katsetatuna tavatingimustes ja kuivalt on 1060 kPa, mis on külmumis-sulamistsüklitega vees 8% ja soolas 9% kõrgem tulemus. Sarnaselt surf seguga andis kõige madalama kaudse tõmbetugevuse katseväärtuse



grupp B, mida hoiti kahe nädala vältel 40 °C vees - võrreldes referents katsekehaga (grupp A) on grupi B tulemus 38% nõrgem.

Grupi B katsetulemus 658 kPa on sarnane peatükis 2.6.3 kirjeldatud uurimuse tulemusele, mis saadi surf segu puhul peale 16-t külmumis-sulamistsükli 3%-es NaCl lahuses. Grupi D tulemus 960 kPa on 30% kõrgem tulemus, võrreldes eelmainitud uurimuses [22] saadud surf segu tulemusega.



Joonis 4.9 AC 20 base kaudse tõmbetugevuse tulemused

Katsekehade visuaalsel vaatlusel nii surf kui ka base segu puhul oli märgatavaid kahjustusi näha vaid base segu juures. Seda saab seletada täitematerjali erinevusega – surf segu puhul on täitematerjaliks graniitkivi ning base puhul paekivi. Paekivi on graniitkivist rabedam ja peab ilmastiku mõjutustele kehvemini vastu, paekivi vastupidavusest külmumis-sulamis tsüklitele on pikemalt kirjutatud peatükis 2.4.

Täitematerjali kahjustusi oli näha külmumis-sulamistsüklite järgselt nii grupi C kui ka grupi D puhul. Joonisel 4.10 on näha, kuidas paekivi tükk on proovikehast eraldunud ning kivi struktuur on muutunud kihiliseks. Kihiti purunemine võis tuleneda ka lööktihendamisest, kuid segust lahti löömine on toimunud tsüklite käigus.



Joonis 4.10 Näiteid täitematerjali purunemist külmumis-sulamis tsüklite järgselt [autori erakogu]

Piltidelt on näha, et base segu puhul ei ole kahjustada saanud sideaine ja täitematerjali vaheline nake vaid täitematerjal ise. Proovikeha küljed, mis olid otseses kokkkupuutes vee ja soolalahusega on saanud enim kahjustusi ja tükke lahti löönud.

**Purunemistüübiks** base segu puhul on samuti kategooria c) ehk kombinatsioon. Joonisel 4.11 on näha, et võrreldes surf seguga (joonis 4.8) on purunemine toimunud täitematerjalist, surf segu puhul toimus purunemine bituumenist. Täielikult purustatud katsekeha sisestruktuuri visuaalsel vaatlusel oli näha palju lõhenenud ja kihilisi paekivi tükke.

Grupp A proovikeha



Grupp C proovikeha



Grupp D proovikeha



Joonis 4.11 AC 20 base proovikehade purunemine kaudse tõmbetugevuse katsel [autori erakogu]

Joonisel 4.11 on ülevalt alla näha proovikehade sisestruktuurid, mida on peale valmistamist hoitud 14 päeva jooksul kuivadel tingimusetel toatemperatuuril (grupp A), läbinud 14 külmumis-sulamistsüklit vees (grupp C) ja 14 tsüklit soolas (grupp D). Visuaalsel vaatlusel silmaga on raske tuua selget järeldust, kas soolalahus on tunginud

katsekeha sisemusse ning täitematerjali lõhkunud. Sellekohase selgema tulemuse saamiseks oleks vaja teostada mikroskoopilised uuringud sarnaselt peatükis 2.4 kirjeldatud uuringule. Kuna kuiva grupi ja soolalahuses tsüklid läbinud katsekehade kaudse tõmbetugevuse tulemuste erinevus on vaid 9%, ei saa ka oodata silmale nähtavat täitematerjali tugevusomaduste muutust.

Valitud 14 tsüklit võis olla visuaalsete muutuste nägemiseks liiga lühike aeg ning tulevastest uuringutes soovitab autor külmumis-sulamistsükleid läbi viia pikema perioodi vältel. Lisaks külmumis-sulamistsüklitele mõjuvad looduses katendile lisaks päikene, mis katendit kuivatab ning soojendab ja teisalt sademed ja sulamine, mis võib katendi pika aja jooksul märjana hoida.

### **4.2.3 Mahulised andmed**

Uurimaks proovikehade mahulisi muutuseid tulenevalt külmumisest mõõdeti proovikehade paksused ja diameetrid vastavalt 3.1.2 punktis kirjeldatule enne ja peale külmumis-sulamistsüklite teostamist. Mahuliste muutuste hüpoteesiks on, et külmumise käigus toimuv vee paisumine põhjustab proovikehade mõõtmete suurenemist.

Hüpoteesile leiab kinnitust base segust valmistatud katsekehade tulemuste analüüs, kuid surfi tulemuste puhul hüpotees kinnitust ei leia. Kulumiskihist proovikehade puhul toimub vastupidiselt hüpoteesile hoopis proovikehade mõõtmete vähenemine. Kandevkihist proovikehade puhul toimub vastavalt hüpoteesile proovikehade mõningane suurenemine. Küll aga on mõlema segu puhul erinevus esialgsega minimaalne – surf segu puhul suurim erinevus on proovikeha mõõtmete vähenemine 0,4% ehk 0,41 mm ja base segu puhul proovikeha suurenemine 0,2% võrra ehk 0,20 mm.

Mõõtmete erinevus esialgse ja külmumise järgse tulemusega on küll vähene, kuid erineb ka katsetamise keskkonna suhtes. Surf segust valmistatud proovikehade paksus muutus soolakeskkonnas 0,08% rohkem kui vees ning diameetrid 0,12% võrra rohkem. Base segu puhul suurenes proovikehade paksus soolakeskkonnas 0,04% rohkem kui vees ning diameetri puhul 0,08%. Peatükis 2.4 kirjeldatakse uuringu tulemusi, milles selgub, et vee ja soolalahuse külmumisprotsessid toimuvad erinevalt tulenevalt soolade kinnitumisest segu pooride seintele. Proovikehade esialgsed ja tsüklite järgsed mõõtmistulemused ja nende erinevused on toodud tabelis 4.1.

Proovikehad, mille mõõtmistulemused olid peale külmumis-sulamistsükleid võrreldes esialgsete mõõtmistulemustega suuremate muutustega andsid kaudse tõmbetugevuse katses nõrgemaid tulemusi. AC 16 surf puhul oli katsekeha nr. 4 ainus, mille mõõtmed suurenesid ning samal proovikehal oli ka oma grupi madalaim maksimaalne purustava jõu väärtus. AC 20 base puhul olid suurimad mõõtmete erinevused võrreldes esialgsega proovikehadel nr. 10 ja 11, mis andsid ka kaudsel tõmbetugevusel oma grupis kõige nõrgemad tulemused.

Kuigi mõõtetulemuste erinevused on esialgsega võrreldes niivõrd väikesed, et need võib lugeda ka mõõtemääramatuse alla, on huvipakkuv, et just suurima erinevusega proovikehad andsid ka madalaimad tulemused kaudse tõmbetugevuse katsel. Tulemusi kajastavad tabeli 4.1 ja tabeli 4.2 tumesinised lahtrid. Tabeli 4.1 all olev skeem kujutab anumate paiknemist kliimakambris. Nagu skeemilt ja tabelist näha, tekkis suurim erinevus teistega nendel proovikehadel, mis asusid kliimakambri tagumises servas. Tagumises servas toimusid temperatuurimuutused intensiivsemalt ning see on tulemuste järgselt mõjutanud ka proovikehade omadusi.

Tabel 4.1 Proovikehade mõõtmed enne ja pärast külmumis-sulamistsükleid

Materjal: AC 16 surf 70/100									
Keskkond	Vesi (taga)			Vesi (keskel)			Vesi (ees)		
Proovikeha nr.	1	1a	erinevus	2	2a	erinevus	3	3a	erinevus
Keskmine paksus, mm	72,4	72,3	-0,14	72,1	72,0	-0,12	72,3	72,2	-0,15
Keskmine diameeter, mm	99,8	99,7	-0,06	100,0	99,9	-0,15	100,0	99,8	-0,23
Keskkond	Sool (taga)			Sool (keskel)			Sool (ees)		
Proovikeha nr.	4	4a	erinevus	5	5a	erinevus	6	6a	erinevus
Keskmine paksus, mm	72,6	72,7	0,13	72,6	72,3	-0,35	72,3	72,2	-0,10
Keskmine diameeter, mm	100,1	100,1	0,02	100,3	99,9	-0,41	100,3	99,9	-0,36

Materjal: AC 20 base									
Keskkond	Vesi (taga)			Vesi (keskel)			Vesi (ees)		
Proovikeha nr.	7	7a	erinevus	8	8a	erinevus	9	9a	erinevus
Keskmine paksus, mm	64,8	65,1	0,27	66,4	66,4	0,01	65,6	65,6	-0,03
Keskmine diameeter, mm	101,7	101,6	-0,13	101,7	101,8	0,09	101,8	101,8	-0,03
Keskkond	Sool (taga)			Sool (keskel)			Sool (ees)		
Proovikeha nr.	10	10a	erinevus	11	11a	erinevus	12	12a	erinevus
Keskmine paksus, mm	67,0	67,2	0,18	65,4	65,6	0,17	64,5	64,5	0,03
Keskmine diameeter, mm	101,6	101,8	0,18	101,5	101,7	0,20	101,9	101,8	-0,11

\*1 - algandmed

\*\*1a - andmed peale tsükleid

Skeem:

Kapi tagumine sein	
S1 B7	S4 B10
S2 B8	S5 B11
S3 B9	S6 B12
Kapi uks	

Tabel 4.2 Kaudse tõmbetugevuse väärtused peale 14 külmumis-sulamis tsüklit

AC 16 surf, 14 tsüklit	vees			soolas		
Proovikeha	1	2	3	4	5	6
Mõõdetud maksimaalne jõud, kN	21,888	23,163	22,834	19,413	21,147	21,791
Max jõu keskmine, kN	22,628			20,784		
Kaudne tõmbetugevus, kPa	1928	2045	2011	1701	1849	1913
Keskmine, kPa	1995			1821		

AC 20 base, 14 tsüklit	vees			soolas		
Proovikeha	7	8	9	10	11	12
Mõõdetud maksimaalne jõud, kN	10,788	10,133	9,847	8,608	10,372	11,156
Max jõu keskmine, kN	10,256			10,045		
Kaudne tõmbetugevus, kPa	1042	955	939	805	995	1081
Keskmine, kPa	979			960		

### 4.3 Järeldused

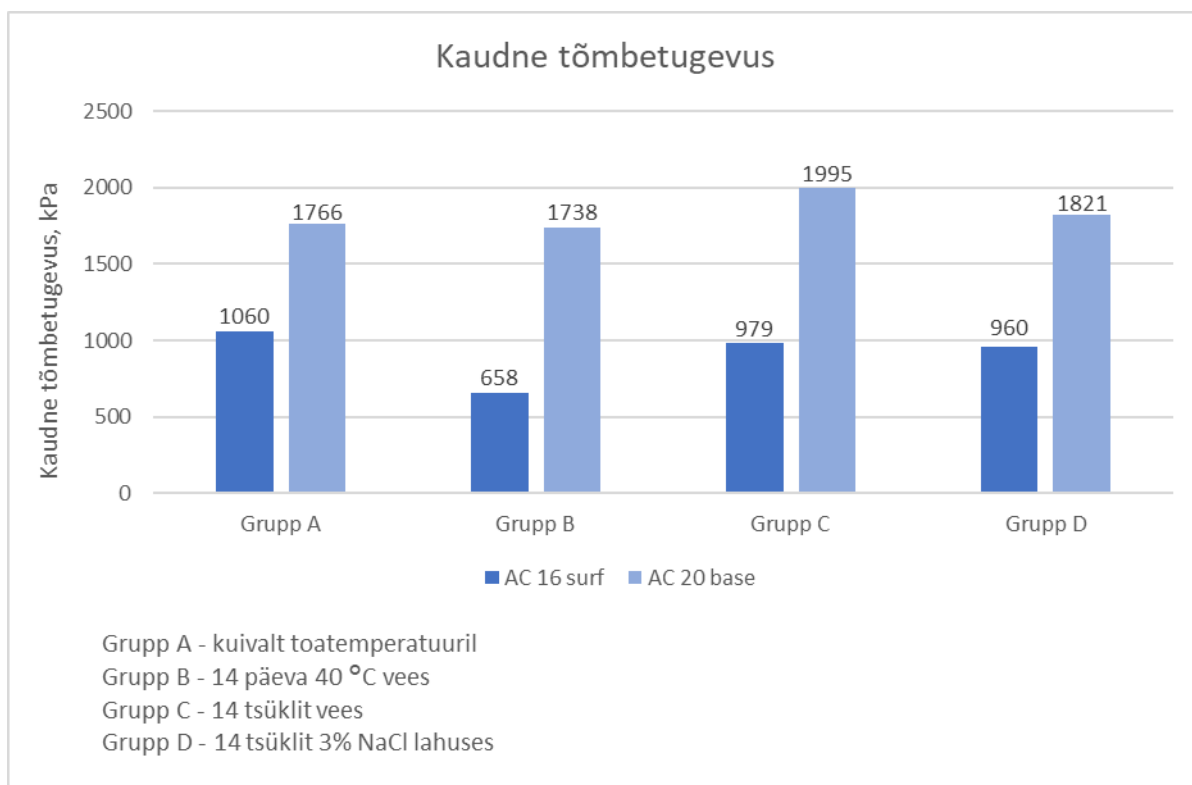
Võrreldes nii AC 16 surf kui ka AC 20 base segudest valmistatud proovikehade katsetulemusi on näha, et ilmastikutingimustest on asfaltsegule kõige ebasobivam pikalt kõrgel temperatuuril (40 °C) märjas keskkonnas olemine. Pikk veepüsivuse katse andis proovikehadele madalamad katsetulemused kui külmumis-sulamistsüklite puhul ning seda mõlema segu puhul.

Base segu puhul toimus proovikeha purunemine täitematerjali läbi ning surfi katsekeha puhul bituumeni purunemise tõttu. Base segust valmistatud proovikehadel oli peale külmumis-sulamistsükleid näha visuaalset täitematerjali purunemist ja murenemist, samuti oli paekivi tükke proovikehast tsüklite jooksul lahti murdunud. Surfi puhul ei olnud visuaalseid kahjustusi tsüklite järgselt näha. Samuti ei vähenenud külmumis-sulamistsüklite järgselt surf segust proovikehade vastupidavus, vaid andis just ka tavatingimustel hoitud katsekehast paremaid tulemusi.

Üheks põhjuseks, miks AC 16 surf segu puhul katsetulemused hüpoteesile ei vastanud võib pidada seda, et veepüsivuse ja kontrollgrupi katsekehad valmistati 2023. aasta novembrikuus ning külmakindluskatse proovikehad 2024. aasta märtsikuus. Võrreldes nende katsekehade mahumasse on näha mõningased erinevused – novembrikuus valmistatud proovikehade keskmine mahumass oli 2,279 Mg/m<sup>3</sup> ja märtsikuus

valmistatud proovikehade keskmine mahumass 2,252 Mg/m<sup>3</sup>. Mahumasside erinevus võib olla tingitud mõõtmistäpsusest nihikuga ja mõõtemääramatusest.

Seega võisid veepüsivuse ja kontrollgrupi katsekehad anda kaudse tõmbetugevuse meetodit kasutades nõrgemad tulemused tulenevalt poorsusomaduste erinevusest külmaskindluskatse läbinud proovikehadega. Joonisel 4.12 on võrdluseks toodud iga grupi katsekehade kaudse tõmbetugevuse tulemused.



Joonis 4.12 Kaudse tõmbetugevuse katsetulemused

Tulenevalt TalTechi ehitusmaterjalide labori kliimakapi ebaühtlasest temperatuuri jagunemisest kapi siseehituse tõttu paigutati külmumis-sulamistsükleid läbivad anumad kliimakappi hajutatult. Seeläbi sai katsekehadele arvutada keskmised väärtused, mis tasandasid välja külmumise ja sulamise kestvuse erinevused. Enim mõjutab proovikehade mahulisi muutuseid soolakeskkonnas külmumis-sulamistsüklite läbimine kliimakapi tagumises servas, kus temperatuurimuutused toimusid kõige intensiivsemalt. Tsüklite läbimisel vees erilisi mahumuutusi mõõtmiste põhjal ei täheldatud.

Edasiste uuringute teostamisel tuleks kasutada kliimakambrit, milles temperatuur tõuseb ja langeb kogu kapi ulatuses ühtlaselt. Seeläbi saaks katsetulemusi analüüsides täpsemad tulemused. Käesoleva lõputöö puhul toimusid kliimakambri eri otstes

temperatuurimuutused erinevatel kiirustel, mis võisid mõningal määral mõjutada külmakindluskatse tulemuste täpsust. Selgelt andsid kõige nõrgemad kaudse tõmbetugevuse väärtused need katsekehad, mis asusid kliimakambri tagumises servas ja olid kokkupuutes soolalahusega. AC 16 surf madalaim väärtus soolas oli 19,413 kN ning suurim 21,791 kN. AC 20 base madalaim tulemus soolakeskkonnas oli 8,609 kN ning suurim 11,156 kN.

Kui soolalahuse puhul oli selgelt näha, et temperatuuri intensiivsem muutus kajastus ka tulemustes siis vee puhul see nii selge ei ole. AC 16 surf puhul andis vees nõrgima katsetulemuse proovikeha nr 1, mis asus kliimakapi tagumises servas. AC 20 base puhul andis nõrgima tulemuse proovikeha nr 9, mis asus kliimakapi eespooles otsas, kus temperatuurimuutused toimusid võrreldes tagumise servaga vähesema intensiivsusega. Katsekehade paiknemine on näha tabeli 4.1 juures oleval skeemil. Seega ebatäpsete tõlgenduste vältimiseks tasuks edasistel uuringutel kasutada kliimakappi, milles temperatuur muutub kogu kapi sisemuses ühtlaselt.

Lõputöös kasutatud kliimakambri puhul andis iga anumasest temperatuuri muutnud andur erineva graafiku ning selle vältimiseks tuleks katse sooritamisele eelnevalt kliimakambri tingimused üle kontrollida. Soovitatavalt võiks teostada kliimakambri eelnevalt kontrolltsüklid ning analüüsida, kas kontrollkatse läbinud proovikehade andurid annavad külmumise ja sulamise protsesside käigus ligilähedased graafikud.

Proovikehadele valiti külmumis-sulamistsüklite teostamise arvuks 14 ööpäeva, mis vastas pika veepüsivuse katse teostamise ajale. Tulemusi analüüsides võib järeldada, et nõrgemate tulemuste saamiseks kaudse tõmbetugevuse meetodi puhul võiks rakendada ehk pikemat tsüklite toimumise kulgu. Valitud tsüklite arv võis antud katse puhul jääda liiga lühikeseks kui tugineda katsetulemustele, mis on saadud välismaiste teaduskirjanduste põhjal. Samuti võis tulemuste puhul mängida rolli valitud 3%-ne NaCl lahuse kontsentratsioon ning põhjalikuma uuringu huvides võiks sooritada külmumis-sulamistsüklid pikema perioodi vältel ning võrdluseks ka suuremate kui 3%-te soolalahuste keskkonnas.

Kõrvutades kevaditi esinevad murenemised ja augud teekattes lõputöös saadud katsetulemustega, saab järeldada, et katte lagunemine võib olla tingitud pidevalt muutuvatest ilmastikuoludest. Talveperioodil puutub katend kokku pidevate külmumis-sulamistsüklitega, on sulades ja sademetega kokkupuutes pidevalt märg ning kevadel välja tulev päike tõstab katendi temperatuuri. Samuti kasutatakse teede talihooldes libedusetõrjeks naatriumkloriidi, mis andis base segu puhul märgatavaid visuaalseid



kahjustusi katsete käigus ning vähendas nii surf kui base segu puhul kaudse tõmbetugevuse väärtust. Seega toimub teede soolamisel kandevkihis täiendav lagunemine, kui sool alumiste kihtideni jõuab.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida kas ja kuidas mõjutavad talvises teehoides libedusetõrjena kasutusel olevad kloriidid asfaltsegu vastupidavust. Lõputöö raames teostatud külmakindluskatsel kasutati Eesti teehoides kasutusel olevat naatriumkloriidi ning tugineti välismaistele teadusartiklitele. Töös anti ülevaade nii Eestis kui ka välismaal teostatud uuringutest soola kasutamisest talihooldes ning asfaltsegu külmakindluse katsetamise meetoditest. Lühidalt kirjeldati eraldi täitematerjali ja bituumeni külmakindluse katsemeetodeid ja nende tulemusi.

Lõputöös viidi läbi katsed kahe asfaltseguga – AC 16 surf ja AC 20 base, et võrrelda kulumis- ja kandevkihi vastupanuvõimet ilmastikutingimustele. Asfaltsegu vastavuse kontrolliks teostati standardite kohaselt terastikulise koostise, sideaine sisalduse ning poorsusomaduste määramine, mida võrreldi standardi EVS-EN 901-3:2021 nõuetega. Standardi põhjal teostati ka veepüsivuse katse, mida pikendati tavapärasest 72 tunnist 14-nea ööpäeva peale. Uuriva katsena teostati asfaldist proovikehadele külmakindluskatse kliimakambris, kus teostati 14 külmumis-sulamistsükli kokkupuutes vee ja soolalahusega.

Veepüsivuse ja külmakindluskatse teostamisel kasutati peale konditsiooni viimist kaudse tõmbetugevuse meetodit. Võrreldavate tulemuste saamiseks rakendati kaudse tõmbetugevuse meetodit ka kontrollgrupile, mille proovikehasid hoiti konditsiooni viidud katsekehadega võrdse aja vältel kuivades tingimustes toatemperatuuril. Töö hüpoteesiks oli, et külmakindluskatse soolakeskkonnas annab märgatavalt nõrgemad tulemused külmakindluskatsest vees.

Võrreldes omavahel vaid külmumis-sulamistsükleid läbinud kastekehade tulemusi, vastab hüpotees tegelikkusele ning katsekehad, mis läbisid külmakindluskatse soolas andsid võrreldes grupiga, mis läbis tsüklid vees, nõrgemad tulemused. Kõige nõrgemad tulemused avaldusid peale pikka veepüsivuse katset, kui katsekehad viibisid 14-nea päeva jooksul 40 °C vees.

Selgemate tulemuste saamiseks teekatte lagunemise ja külmakindluse kohta tuleks aga teostada täiendavad pikemaajalised ja laiahaardelisemad uuringud. Samuti annaks lisatulemusi teekatete uurimine katselõikudena väljaspool laborit soolatatavatel teedel. Täpsemaid tulemusi antud teemal võiks anda väli- ja laborikatsete kombineerimine.

## SUMMARY

The aim of this master's thesis was to investigate whether and how chlorides used as de-icers in winter road maintenance affect the durability of the asphalt mixture. The frost resistance test performed as part of the final thesis used sodium chloride, which is used in Estonian road maintenance, and was based on foreign scientific articles. The work gave an overview of the studies carried out both in Estonia and abroad on the use of salt in winter maintenance and methods of testing the frost resistance of asphalt mixture. Test methods and their results for frost resistance of aggregate and bitumen were briefly described.

In the thesis, tests were carried out with two asphalt mixtures - AC 16 surf and AC 20 base, in order to compare the wearing and base layer's resistance to weather conditions. In order to check the conformity of the asphalt mixture, the determination of particle size distribution, soluble binder content and air void content was carried out in accordance with the standards. Test results were compared with the requirements of the standard EVS-EN 901-3:2021. Based on the standard, a water resistance test was also performed, which was extended from the usual 72 hours to 14 days. As an exploratory test, a frost resistance test was performed on asphalt samples in a climate chamber, where 14 freeze-thaw cycles were performed in contact with water and salt solution.

When performing the water retention and cold resistance test, the indirect tensile strength method was used after conditioning. In order to obtain comparable results, the indirect tensile strength method was also applied to the control group, whose specimens were kept in dry conditions at room temperature for the same period of time as the conditioned specimens. The hypothesis of the work was that the cold resistance test in a salt environment gives significantly weaker results than the cold resistance test in water.

Comparing the results of test specimens that only underwent freeze-thaw cycles, the hypothesis corresponds to reality, and the test bodies that underwent the frost resistance test in salt gave weaker results compared to the group that underwent cycles in water. The weakest results were manifested after a long water resistance test, when the test specimens were in 40 °C water for 14 days.

However, additional longer-term and more comprehensive studies should be carried out to obtain clearer results about pavement degradation and frost resistance. Also,

the study of pavements as test sections on salted roads outside the laboratory would provide additional results. More precise results on this topic could be obtained by combining field and laboratory experiments.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Transpordiamet, „Elastsete teekatendite projekteerimine,“ 2023.
- [2] V. Mespak, Väike asfaldiraamat III asfaltkatete elukaar, Tallinn: Eesti Asfaldiliit, 2013.
- [3] S. Anastasio, I. Hoff ja C. Thodesen, „Effect of Freeze-thaw Cycles and Deicing Fluids on Pavements,“ %1 *Ninth International Conference on the Bearing Capacity of roads, Railway and Airfield*, Trondheim, 2016.
- [4] „Majandus- ja taristuministri 14. juuli 2015. a määrus nr 92 „Tee seisundinõuded“ Lisa 6,“ 05.11.2018.
- [5] „Majandus- ja taristuministri 14. juuli 2015. a määrus nr 92 „Tee seisundinõuded“ Lisa 8,“ 2018.
- [6] Transpordiamet, „Talvine teehoole,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.transpordiamet.ee/talvine-teehoole>. [Kasutatud 10 03 2024].
- [7] Maanteeamet, „Teede korrashoiu juhendid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://transpordiamet.ee/riigiteede-juhendid#tee-korrashoid>. [Kasutatud 10 03 2024].
- [8] T. Kaal, L. Kaal, T. Tootsi ja A. Aavik, „Kloriidide katsetamine,“ Transpordiamet, Tallinn, 2021.
- [9] K. Hossain, L. Fu ja M. El-Hakim, „Determination of Optimum Salting Rates for Asphalt,“ American Society of Civil Engineers, 2022.
- [10] A.-A. Pärna, „Kloriidide kasutamine teehooldel - keskkonnamõju,“ 2017.
- [11] P. Zhou, W. Wang, L. Zhu, H. Wang ja Y. Ai, „Study on Performance Damage and Mechanism Analysis of Asphalt under Action of Chloride Salt Erosion,“ Special Issue Advances in Asphalt Materials, 2021.
- [12] North American Salt Company, Sifto Canada Corp, „MgCl<sub>2</sub> Magnesium Chloride Technical Manual,“ North American Salt Company, Sifto Canada Corp, 2013.
- [13] J. E. Lindqvist, K. Malaga, B. Middendorf, M. Savukoski ja P. Pétursson, „Frost Resistance of Natural Stone, the Importance of Micro- and Nano-porosity“.
- [14] „EVS-EN 1367-1:2007 Täitematerjalide soojuslike omaduste ja ilmastikukindluse katsetamine. Osa 1: Külmaskindluse määramine“.
- [15] „EVS-EN 1367-6:2008 Täitematerjalide soojuslike omaduste ja ilmastikukindluse katsetamine. Osa 6: Külmaskindluse määramine soolalahuses (NaCl)“.
- [16] R. Jefremova, M. Hain, J. Hendrikson ja S. Siht, „Lubjakivi- ja kruuskillustike külmaskindluse paralleelne katsetamine,“ AS Teede Tehnokeskus, Tallinn, 2009.

- [17] „EVS-EN 1097-6:2022 äitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 6: Terade tiheduse ja veeimavuse määramine“.
- [18] K. Zhang, Y. Luoc, W. Xieb ja J. Wub, „Evaluation of road performance and adhesive characteristic of asphalt binder in salt erosion environment,“ Materials Today Communications, 2020.
- [19] D. Lesueur, „The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification,“ Advances in Colloid and Interface Science, 2008.
- [20] A. Dawson, Water in Road Structures - Movement, Drainage and Effects, Nottingham: Springer, 2008.
- [21] „EVS-EN 12697-11:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 11: Täitematerjali ja bituumeni vahelise nakke määramine“.
- [22] Z. Wu, C. Shi, P. Gao, H. Zhang ja X. Hu, „Moisture Susceptibility of Asphalt Mixture Subjected to,“ Journal of Materials in Civil Engineering, 2022.
- [23] „EVS-EN 12697-23:2017 ASFALTSEGUD Katsemeetodid Osa 23: Asfaltsegust proovikehade kaudse tõmbetugevuse määramine“.
- [24] „EVS-EN 12697-17:2017 Bituminous mixtures - Test methods - Part 17: Particle loss of porous asphalt specimens“.
- [25] „EVS-EN 12697-30:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 30: Proovikehade valmistamine lööktihendajaga“.
- [26] „EVS-EN 12697-31:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 31: Proovikehade valmistamine güraatortihendamisega“.
- [27] „EVS 901-3:2021 Tee-ehitus. Osa 3: Asfaltsegud“.
- [28] „EVS-EN 12697-1:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 1: Lahustuva sideaine sisaldus“.
- [29] „EVS-EN 12697-2:2015+A1:2019 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 2: Terastikulise koostise määramine“.
- [30] „EVS-EN 12697-28:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 28: Proovide ettevalmistamine sideainesisalduse, veesisalduse ja terastikulise koostise määramiseks“.
- [31] „EVS-EN 12697-5:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 5: Erimassi määramine“.
- [32] „EVS-EN 12697-6:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 6: Asfaltproovikehade mahumassi määramine“.

- [33] „EVS-EN 12697-29:2020 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 29: Asfaltsegust proovikeha mõõtmete määramine“.
- [34] „EVS-EN 12697-8:2018 ASFALTSEGUD Katsemeetodid Osa 8: Asfaltsegust proovikehade poorsusomaduste määramine“.
- [35] „EVS-EN 12697-12:2018 Asfaltsegud. Katsemeetodid. Osa 12: Asfaltsegust proovikehade veepüsivuse määramine“.
- [36] J. Paaver ja E. Tempel, Füüsika õpik 9. klassile Soojusõpetus, tuumaenergia, Tallinn: Maurus Kirjastus OÜ, 2018.
- [37] „Tec-Science,“ 25 01 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tec-science.com/thermodynamics/temperature/why-does-the-temperature-remain-constant-during-the-change-of-state-phase-transition/>. [Kasutatud 15 04 2024].