



TALLINNA  
TEHNIKA KÕRGGKOOI

Andreas Arula

# Libedustõrje teostamise süsteemide analüüs

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2024



**Andreas Arula**

# **Libedustõrje teostamise süsteemide analüüs**

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Teedehitus

Juhendaja: Sven Sillamäe, *MSc*

Tallinn 2024

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina/meie, Andreas Arula

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Libedustõrje teostamise süsteemide analüüs

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

### **Autorideklaratsioon**

Mina/meie, Andreas Arula

tõendan/tõendame, et lõputöö on minu/meie kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Juhendaja Sven Sillamäe

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

*(allkirjastatud digitaalselt)*

*(kuupäevad digiallkirjades)*

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	5
1 TALIHOOLDE TÖÖD EESTI TEEDEL .....	7
1.1 Eesti kliima ja seda mõjutavad tegurid .....	7
1.2 Talihooldde tööd .....	8
1.3 Haardetegur ja selle mõõtmiseks kasutatavad seadmed .....	12
1.4 Teede talihooldetööde järelevalve .....	14
1.5 Eestis kasutatavad kloriidid ja puistematerjalid .....	15
2 LIBEDUS EESTI TEEDEL .....	17
2.1 Libeduse tekke põhjused talvel .....	17
2.2 Libedustekke ennustamine ja ennetav libedustõrje .....	19
2.3 Libedustõrje meetodid .....	21
2.4 Vajaliku soolakoguse leidmine .....	22
2.5 Libedustõrje ja keskkond .....	22
3 LIBEDUSTÕRJE TEMPERAATUURIPÕHISE PUISTAMISE SÜSTEEM .....	24
3.1 Libedustõrje süsteemid .....	24
3.2 Katseplaan .....	25
3.3 Thermologic seadme tööpõhimõte .....	26
3.4 Katsed Thermologic seadmega puistamisel .....	28
3.5 Analüüs .....	34
KOKKUVÕTE .....	37
SUMMARY .....	38
VIIDATUD ALLIKAD .....	39

## SISSEJUHATUS

Libedustõrje on oluline teema, mis mängib keskset rolli liiklusohutuse tagamisel talvekuudel. Libeduse teket põhjustavad mitmed tegurid, nagu temperatuurilangus, sademed ja teede niiskus, ning nende mõistmine on efektiivse libedustõrje aluseks. Käesoleva töö eesmärk on süvitsi uurida automaatsete libedustõrje seadmete kasutamist, keskendudes eelkõige ThermoLogic seadmele ja selle integreerimisele puisturitega, et saavutada parimad võimalikud tulemused.

Libedustõrje meetodid on mitmekesised, ulatudes soolalahuse, kuiva soola ja niisutatud soola kasutamisest kuni mehhaaniliste meetoditeni, nagu liiv ja killustik. Iga meetodi eelised ja puudused ning sobivus erinevates olukordades leiavad põhjalikku käsitlust. Näiteks soolalahus on kiire toimega, samas kui niisutatud sool püsib kauem teel.

Lõputöös käsitletakse libeduse tekke ennustamist, mis on kriitilise tähtsusega ennetava libedustõrje rakendamisel. Täpsed ilmaprognoosid ja teede sensorid võimaldavad ennustada libeduse tekkimist, mis omakorda aitab planeerida ennetavaid meetmeid. Ennetav libedustõrje, nagu soola varajane laotamine võib oluliselt vähendada jää tekkimise ohtu ja tagada sujuvama liikluse.

Põhjalik ülevaade antakse erinevatest meetoditest, mida kasutatakse libeduse ennetamiseks ja tõrjumiseks. Näiteks on oluline mõista, kuidas sool ja muud kemikaalid mõjutavad jää sulamist ning kuidas nende õigeaegse ja õige kogusega kasutamine aitab ära hoida libeduse teket.

Juba tekkinud libeduse tuvastamine ja selle tõrjumiseks vajalike meetmete võtmine on samuti tähelepanu all. Arutan, kuidas määrata parim aeg libedustõrje alustamiseks, kasutades reaajas andmeid ja teede temperatuuri jälgimist. Tähelepanu pööratakse ka sellele, kuidas leida vajalikku soolakogus, võttes arvesse jääksoolasust, teel olevat veekogust, sademete hulka ja temperatuuri. See aitab määrata hooldeautojuhile antavad baasnormid, et tagada optimaalse soolakoguse kasutamine.

Libedustõrje automatiseerimisel on liiklusohutuse tagamisel talvistes tingimustes suur tähtsus, kuna see võimaldab kiiret ja täpset reageerimist muutuvale ilmale ja teeoludele. Efektiivset libedustõrjet saavutatakse kaasaegsete tehnoloogiate, nagu näiteks ThermoLogic seadme kasutamise kaudu, mis võimaldab reaajas jälgida teepinna temperatuuri ja seisundit. See võimaldab hooldeautodel rakendada õigeaegselt sobivaid meetodeid, nagu soolalahuse, kuiva soola ja niisutatud soola kasutamine, et hoida teed libedusvabad ja tagada ohutu liiklemine ka kõige karmimates talvistes oludes.

Käesoleva töö eesmärk on süvitsi uurida automaatsete libedustõrje seadmete kasutamist, keskendudes eelkõige ThermoLogic seadmele ja selle integreerimisele puisturitega, et saavutada parimad võimalikud tulemused.

# 1 TALIHOOLDE TÖÖD EESTI TEEDEL

## 1.1 Eesti kliima ja seda mõjutavad tegurid

Eesti paikneb Ida-Euroopa lauskmaa loodenurgas mereliselt kliimalt mandrilisele ülemineku vööndis. Päikese kiirguse ja õhutemperatuuri tunduv aastaajaline kõikumine siinsele kliimale on suure geograafilise laiuse tõttu iseloomulik. Eestis on pikk ja tavaliselt püsiva lumekattega talv. Eesti kliimat mõjutab Atlandi ookean, Põhja-Atlandi hoovus ja Islandi miinimum. Islandi miinimum kujutab endast tsüklonite kujunemise piirkonda, kus keskmine õhurõhk on naaberaladest madalama. Läänetuulte mõjul kandub niiske mereline õhumass Atlandi ookeanilt mandri siseossa, mis toob kaasa külmal poolaastal soojema ja soojal poolaastal mõnevõrra jahedama ilma.

Mere mõju tõttu on Eesti rannikuvööndis õhutemperatuuri ööpäevane ja aastane amplituud väiksem kui sisemaal. Mere termiline inertsus nihutab aastaringi kõige soojema ja külmema aja hilisemaks. Rannikualadel on tavaliselt väiksem pilvisus ja sademete hulk ning lumikatte kestus on lühem. Samuti on rannikul rohkem päikesepaistet, õhk on niiskem ja tuule kiirus suurem. Teepindadele võib libeduse oht tekkida mereäärsetel aladel hiljem ning kevadel kesta kauem.

Tsüklonialane tegevus hõlmab tsüklonite ja antitsüklonite tekkimist, arenemist, liikumist ning häbumist; Eestis mõjutab aastas ilma umbes 130 tsüklonit ja poole vähem antitsükcloneid. Ligikaudu 2/3 päevadest aastas on Eesti ilm madalrõhkkondade mõju all, eriti sügisel ja talvel, põhjustades muutlikku ilma, tugevat tuult, sademeid ja järske temperatuurikõikumisi. Enamik tsükcloneid tekib Atlandi ookeani põhjaosa kohal ja liigub läänest itta, kuid Eesti ilma mõjutavad ka Vahemere piirkonna lõunatsüklonid, eriti suvel (10-15% esinemissagedusega).

Kõrgrõhkkonnad, mis mõjutavad Eesti ilma, tekivad peamiselt Fennoskandias (talvel), Assoori saartel ja Vahemere piirkonnas (suvel) ning Ida-Euroopa lauskmaal. Tsüklonite liikumisega kaasnevad atmosfäärifrondid, mis mõjutavad Eesti ilma umbes pooltel päevadel aastas, eriti sügisel ja eeltalvel. Külma frondi üleminek põhjustab järsu õhutemperatuuri languse, sooja frondi üleminek aga tõusu. Soojal poolaastal esineb rohkem külmi fronte, külmal poolaastal aga sooje. Ligikaudu pooled frondid on külmad, kolmandik soojad ja ülejäänud hääbuvad oklusioonifrondid. Enamus fronte saabub läänekaartest.

Läänemeri mõjutab oluliselt Eesti õhutemperatuuri erinevusi. Sügisel ja talvel hoiab meri rannikualad soojemana kui sisemaa, mille tulemusel kulgevad isotermid põhja-lõuna suunas, olles läänes soojemad ja idas külmemad. Jaanuaris on Kesk- ja Ida-Eestis

keskmine õhutemperatuur  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , samas kui Lääne-Eesti saarestikus on see  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rannikualadel on külmim kuu veebruar, keskmise temperatuuriga umbes ühe kraadi võrra madalam kui jaanuaris. Kevadel soojeneb sisemaa kiiremini kui meri, mistõttu jäävad rannikualad jahedamaks kui ülejäänud Eesti.

Eestis on siseosades aasta keskmine tuule kiirus alla  $4\text{ m/s}$ , rannikul üle  $6\text{ m/s}$ . Tuule kiirus on suurem sügisel ja talvel, olles kõige tugevam detsembris ja kõige nõrgem juulis ning augustis. Lääne- ja lõunakaarte tuuled on sagedasemad, idakaarte tuuled harvemad. Sisemaal esineb tormituuli (üle  $15\text{ m/s}$ ) vaid mõni kord aastas, kuid rannikul ja saartel on keskmiselt 20–30 tormipäeva aastas. Tormide sagedus on viimastel aastakümnetel märgatavalt suurenenud.

Eesti asub niiskes kliimavööndis, kus sademete hulk ületab aurustamise. Aasta keskmine suhteline õhuniiskus on 80–83%, talvekuudel suurem ja mais väiksem, umbes 70%. Rannikualadel on õhuniiskus soojal poolaastal suurem kui sisemaal. Aasta keskmine üldpilvisus on Eestis kõrgem novembris ja detsembris ning madalam mais ja juunis. Rannikuvööndis on pilvisus märgatavalt väiksem kui sisemaal. Eestis varieerub sademete keskmine aastasumma 550–800 mm piires, kusjuures kõige vähem sademeid langeb tavaliselt rannikuvööndis. Eestis on lumikattel väga suur territoriaalne ja ajaline muutlikkus ning keskmine kestus varieerub 75–135 päeva aastas. [1]

## 1.2 Talihoolde tööd

Eestis teostatakse talihoolde töid riigiteedel, linnades, vallateedel, era- ja metsateedel. Riigi poolt hooldatavaid teid Eestis on 16 982 km, millele lisandub talvel ilmast sõltuvalt kuni 87,6 km ajutisi jääteid. Kohalikele omavalitsustele ja linnadele kuuluvaid teid on 23 588 km, erateid 39 442 km ja metsateid 9440 km. [2]

Riigiteede liigitus [2]:

- põhimaantee - ühendab pealinna teiste suurte linnadega, neid linnu omavahel ning pealinna ja teisi suuri linnu tähtsate sadamate, raudteesõlmede ja piiripunktidega;
- tugimaantee - ühendab linnu ning neid põhimaanteedega;
- kõrvalmaantee ja muud riigiteed - ühendab linnu alevite ja alevikega, aleveid ja alevikke omavahel või küladega ning neid kõiki põhi- ja tugimaanteedega;
- ühendusteel - liikluse kogumiseks või liiklusvoogude kanaliseerimiseks, samuti teede ristumisala sujuvaks ja ohutuks toimimiseks rajatud kogujatee, juurdepääsutee, ramp või muu sarnane tee;
- riigi kergliiklusteed - sõiduteest eraldatud jalgratta- ja jalgteed, jalgteed, jalgrattateed või tee koosseisu kuuluv kõnniteed;

- riigi jäätee - talvisel ajal veekogudele, nagu järved või meri, moodustuv ajutine tee, mis on piisavalt tugev, et kanda sõidukeid ja inimesi.

Kohalikud teed Eestis jagunevad kolmeks [2]:

- kohalikud maanteed;
- kohalikud tänavad;
- kohalikud kergliiklusteed.

Talihoolde korraldamine avalikult kasutatavatel teedel toimub vastavalt 2015. aastal kehtestatud tee seisundinõuete määrusele. See tähendab, et lisaks üldistele nõuete täitmisele tuleb teostada ka libedusetõrjet ja lumesahkamis töid, nii teedel, kui ka teedele kuuluvatele osadele nagu näiteks parklad, bussipeatused, mahasõidud, sillad jne. Avaliku ligipääsuga erateid hoiab teeomanik korras nii, et saaks toimuda ohutu liiklemine. Seisundinõuete määruse järgi on nii kattega teedele, kui ka kruusateedele määratud liiklussageduse järgi seisunditasemed. Tee omanik on kohustatud seisundinõuded avalikult kasutatavatel teedel täitma igapäevaselt ja ööpäevaringselt. Talihoolde nõuded hakkavad kehtima talvistes teeludes, milleks on lumi, jäide, tuisk jne. Seisunditasemeid Eesti riigiteedel on kolm tükki, milleks on kõrge, keskmine, madal. [3]

Kõige kõrgem seisundi tase jaguneb kaheks, tase 3+ teed ja tase 3 teed. Need on riigi põhiteed, suurema liiklussagedusega tugimaanteed ja mõned kõrvalteed. Teepind või vähemalt sõidurajad on vaja hoida lume- ja jäävabad. Teedel kehtib ennetava libedusetõrje kohustus.

Keskmise seisunditaseme alla kuuluvad tase 2 teed. Need on riigi tugiteed ja suurema liiklusega kõrvalteed. Lume- ja libedusetõrje tuleb teostada 8 tunni jooksul libeduse tekkimisest või lumesaju lõpust.

Madalaima seisunditaseme alla kuuluvad tase 1 teed. Sinna kuuluvad enamjaolt kõrvalteed. Libeduse- ja lumetõrje teostatakse 12 tunni jooksul libeduse tekkest või lumesaju lõpust. Täpsemad kirjeldused kõigi seisunditasemete kohta (Tabel 1). [4]

Tabel 1. Tee talvised seisundinõuded [4]

<b>Tee talvised seisundinõuded</b>					
<b>Seisunditase</b>	<b>Prioriteet</b>	<b>Kirjeldus</b>	<b>Lumetõrje</b>	<b>Libedusetõrje</b>	<b>Nõuded lume paksusele</b>
3+	Kõrge	Seisunditasemega 3+ teid on 1638 km. Sinna kuuluvad riigipõhiteed ning suurema liiklusega tugi- ja üksikud kõrvalteed. Teepind või vähemalt sõidujäljed on lume- ja jäävabad.	Hiljemalt 5 h jooksul pãras lumesaju või tuisu lõppu	Hiljemalt 2 h jooksul pãrast libeduse teket.	Kriitilise koheva lume paksus ei tohi ületada 4 cm, kriitilise mãrja lume paksus 2 cm
3	Kõrge	Seisunditasemega 3 teid on 1649 km. Sinna kuuluvad riigipõhiteed ning suurema liiklusega tugi- ja üksikud kõrvalteed. Teepind või vähemalt sõidujäljed on lume- ja jäävabad	Hiljemalt 5 h jooksul pãras lumesaju või tuisu lõppu	Hiljemalt 4 h jooksul pãrast libeduse tekkimist	Kriitilise koheva lume paksus ei tohi ületada 4 cm, kriitilise mãrja lume paksus 2 cm
2	Keskmine	Seisunditasemega 2 on kattega teid 4490 km. Sinna kuuluvad enamus tugiteid ja osa suure liiklusega kõrvalteid. Tehakse libedusetõrjet, kuid teed ei pruugi olla lume- ja jäävabad.	Hiljemalt 12 h jooksul pãrast lumesaju või tuisu lõppu	Hiljemalt 8 h jooksul pãrast libeduse tekkimist	Kriitilise koheva lume paksus ei tohi ületada 8 cm, kriitilise mãrja lume paksus 4 cm
1	Madalaim	Seisunditasemega 1 teid on 8828 km ehk valdav enamik. Tehakse libedusetõrjet, kuid teed ei pruugi olla lume- ja jäävabad.	Hiljemalt 24 h jooksul pãrast lumesaju või tuisu lõppu	Hiljemalt 12 h jooksul pãrast libeduse tekkimist	Kriitilise koheva lume paksus ei tohi ületada 10 cm, kriitilise mãrja lume paksus 5 cm

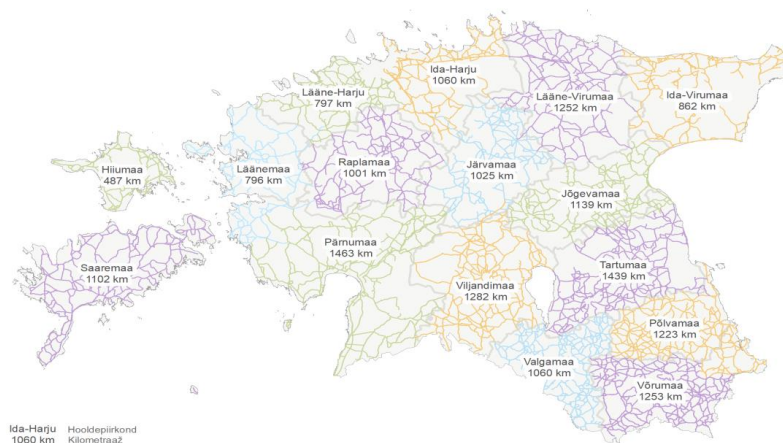
Seisunditasemetel on samuti ka hooldustsükli aeg ning need on välja toodud (Tabel 2). Hooldustsükkel on aeg, mille jooksul peavad olema teedel seisundinõuded täidetud. Hooldustsükli tähtaeg hakkab jooksuma libeduse tekkest või lumesaju või tuisu lõppemise korral. Aeg hakkab kehtima ka siis, kui lubatud nõuded ületavad kriitilise piiri.

Tabel 2. Hooldustsükli aeg tundides [5]

Hooldustsükkel	Seisunditaseme nõuded			
	1	2	3	3+
Lume ja lõrtsi eemaldamine sõiduteelt	24	12	4	2
Aeg nõutava haardeteguri tagamiseks	12	8	4	2
Soola-lume segu eemaldamine sõiduteelt	12	12	8	4
Könnitee ning jalg- ja jalgrattatee puhastamine ja libedusetõrje	12	12	8	6
Tee kohta kehtivate nõuete täitmine	36	24	12	8

Valdadel ja linnadel on samuti omad seisunditasemed teedele ning tänavatele. Kindlaid määruseid pole aga seisundinõuetele ning need varieeruvad vastavalt linnade ja valdade vajadustele. Samuti on erinevad ka hooldustsükli aegad ning haardeteguri nõuded. Era- ja metsateedel teostatakse talihooldete tööd korras põhiliselt lumesahkamis ja lumekoristus töid. [6]

Riigiteedel toimub hoole 16-es eri piirkonnas 16 erilepingu alusel. Seda teostab üheksa erinevat ettevõtet, kas peatöövõtjana või alltöövõtjana (Joonis 1). [7]



Joonis 1. Hooldepiirkondade kaart [7]

### 1.3 Haardetegur ja selle mõõtmiseks kasutatavad seadmed

Teehooldes kasutatakse libeduse määramiseks konkreetset näitajat, milleks on haardetegur. Teekatte haardetegur on näitaja, mis kirjeldab teekatte ja sõiduki rehvide vahelise hõõrdumise tõhusust. See on oluline liiklusohutuse seisukohalt, kuna mõjutab sõiduki pidurdusvõimet ja juhitavust erinevates teeoludes. Tavaliselt määratakse haardetegur, et hinnata teekatte sobivust liiklemiseks ning tagada ohutu sõitmine. Tegemist on suhtelise ühikuga, mille teoreetiline arvvärtus küünib nullist üheni. Väärtus null oleks tinglikult olukord, mil sõiduk pidama ei jäägi, ja väärtus üks võrduks sõitmisega vastu seina. Tegelikuses kõigub haardetegur meil mõõdetavate seadmetega piirides 0,10st kuni 0,60...0,80ni. [8]

Eestis põhiliselt kasutusel olev haardeteguri mõõteseadmeks Trippy Oy poolt toodetud ELTRIP65 seade. ELTRIP mõõteseadmega on võimalik mõõta haardetegurit ning samuti ka teepikkuseid ja kiirust. Haardeteguri mõõtmine käib pidurduse teel. Haardeteguri väärtus arvutatakse pidurdamisel saadud ratta pöörlemiskiiruse vähenemise ja pidurdamisaja pikkuse täpse mõõtmise teel. ELTRIP-i miinuseks on paigaldamine, mis on vajalik teostada autoelektronikat tundvas esinduses. Teiseks miinuseks on see, et ELTRIP ei talleta andmeid ning see vajab lisaseadmeid andmete edastamiseks. [9]

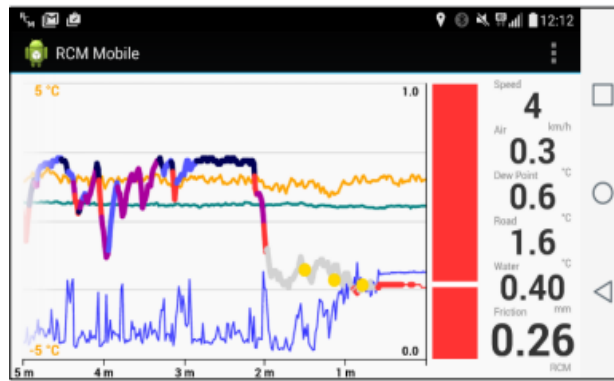
Vähem levinud aga järkjärgult hooldelepingute nõuetesse sisse toodud on optiline seade. Optiline haardeteguri mõõtmine seade tööpõhimõtte on teepinnalt tagasi peegeldunud signaali optiline spektraalanalüüs. Anduris olev tarkvara teeb mõõtmise ja tuvastab saadud andmete järgi teepinna seisukorra, tuvastab vee ja/või jää olemasolu ning koguse teepinnal ja nende andmete põhjal määratleb andurisse sisse ehitatud mudel teepinna haardeteguri väärtuse. Anduril on olemas standardne paigalduskomplekt selle

kinnitamiseks sõiduki kärke külge kuid anduri kinnitamiseks on võimalik kasutada ka muid ebastandardseid lahendusi. Kärke külge kinnitades tuleb jälgida ka auto summuti asukohta. Summutist tulev soe õhk või näidata temperatuuri andmeid tegelikkusest kõrgemaks. Oluline on tagada ligilähedaselt anduri pea kaugus tee pinnast ca 50 cm ja anduri suunamine nurga all ratta jälge (Joonis 2). Andur on paigutatud kaitsetorusse, mille ots on lõigatud nurga all viltu, et see töötaks visiirina ja kaitseks anduri pead sõiduki alt üles tõusnud pritsmete eest. [9]



Joonis 2. Optiline seade kärke külge paigaldatuna [10]

Anduri asendi muutumisel on tarvis andur uuesti kalibreerida. Selleks kasutatakse spetsiaalset kalibreerimise matti, anduri kalibreerimine võtab aega mõne minuti. Anduri komplekti kuulub tavaliselt ka infrapuna teepinna temperatuuri andur. Mõõtmisandmed saadetakse anduri külge juhtmega ühendatud modemi kaudu kas mobiiltelefoni rakendus või otse serverisse. Mobiiltelefoni rakendus võimaldab koguda ja visualiseerida anduri andmeid sõidukis, koguda mõõtmistele lisaks pildimaterjali tee kohta ja edastada saadud infot andmepakettidena serverisse andmete edasiseks töötlemiseks ja visualiseerimiseks. Mobiiltelefoni rakendus on sisse ehitatud ka telefoni kiirendusanduril põhinev haardeteguri rakendus, mis tähendab seda, et järsul pidurdamisel näidatakse rakenduse ekraanil lisaks optilise anduri andmetele ka kiirendusanduriga saadud haardeteguri väärtust. Väärtused on võimalik üleslaadida Teede Tehnokeskuse veebirakendusse [mtss.teeinfo.ee](http://mtss.teeinfo.ee), kus on see näha ligipääsu saanud isikutele. Seadet on lihtne paigaldada ning kerge vaevaga saab ümber tõsta ühelt sõidukilt teisele (Joonis 3). [9]

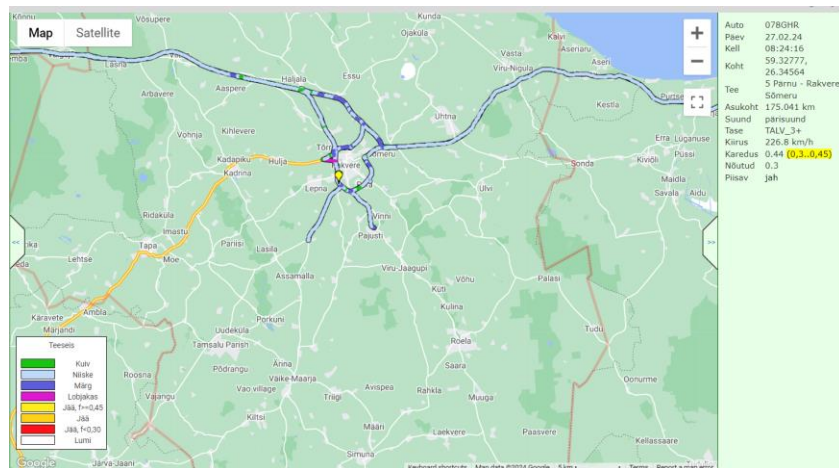


Joonis 3. Mobiiltelefoni rakenduses kuvatud info optilisest seadmest Bluetoothi kaudu, tee seis jää punaselt pikliku ribana, haardetegur 0,26, tee temperatuur +1,6 kraadi [11]

#### 1.4 Teede talihooldetööde järelevalve

Teede talihooldetööde järelevalvet teostab riigimaanteedel Transpordiameti poolt välja valitud asutuses töötav isik vastavate pädevustega. Järelevalve teostab teede järelevalvet aastaringselt ja jälgib, et teed vastaks seisundinõutele. Talihooldde ajal lisaks põhilistele ülesannetele peab järelevalve teedel mõõtma tee katte haardetegurit, lumevallide kaugust, lumevallide kõrgust, roopa sügavust jne. Kõrguseid, kauguseid ja sügavusi mõõdetakse rihtlatiga, loodiga ja mõõdulindiga. Haardeteguri mõõtmist tehakse põhiliselt ELTRIP haardeteguri mõõtmis seadmega või vastava analoogiga. [12]

Haardeteguri mõõtmisseadmega varustatud autoga teostatakse patrullisõite ning kontrollitakse pidurdades teede seisundinõutele vastamist. Pidurdusel saadud näit laetakse ülesse mtss.teeinfo.ee leheküljele (Joonis 4) ning sealt näeb seda juba teehooldaja. [13]



Joonis 4. Järelevalve poolt üleslaetud haardeteguri näit. Saadud haardeteguri 0,44, minimaalne nõutud haardeteguri 0,3 [13]

Joonisel on kujutatud pidurduse asukoht ja tee katte haardeteguri tulemus. Valdades ja linnades teostab järelevalvet, kas kohalik teede spetsialist või ostetakse järelevalveteenust sisse.

## 1.5 Eestis kasutatavad kloriidid ja puistematerjalid

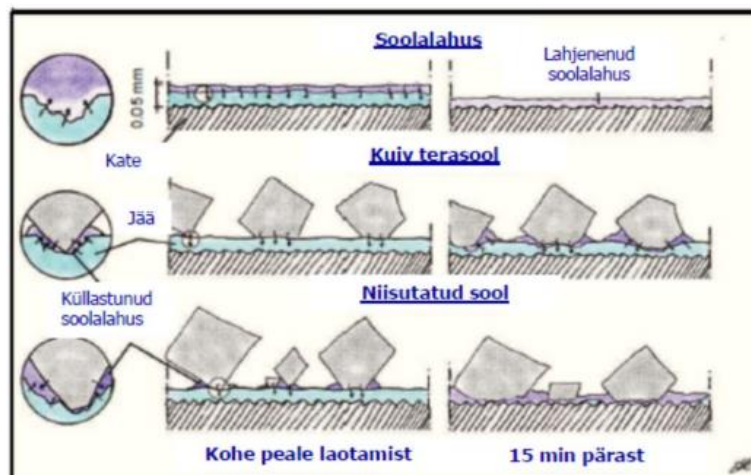
Libedustõrjeks võib sooladena kasutada naatriumkloriidi ( $\text{NaCl}$ ), kaltsiumkloriidi ( $\text{CaCl}_2$ ) ja magneesiumkloriidi ( $\text{MgCl}_2$ ). Eestis kasutatakse peamiselt talihooldel naatriumkloriidi ( $\text{NaCl}$ ), kuna see on teistega võrreldes odavam. Hooldelepingute korrashoiutööde tehnilises kirjelduses on kirjas, et väga madalate temperatuuride korral (alla  $-12\text{ }^\circ\text{C}$ ) kui  $\text{NaCl}$ -ga puistamine on raskendatud, tuleb libedusetõrje teostata  $\text{CaCl}_2$ -ga või sarnase mõjuga muu libedusetõrjematerjalidega. Kaltsiumkloriidi kasutatakse pigem väga külmade kraadide juures ja ekstreemsetes oludes. Selle kasutamist välditakse peamiselt selle hinna tõttu.  $\text{NaCl}$  efektiivsus väheneb kui õhutemperatuur on alla  $-7\text{ }^\circ\text{C}$  ning tavaliselt siis teed enam ei soolata. Temperatuuride juures alla  $-18\text{ }^\circ\text{C}$  tuleb kasutada ainult puistematerjale. Puistematerjalidena on kasutusel liiv ja soolaliiva segu. Soolalahuse asemel kasutatakse niisutatud soola, kui teetemperatuur on alla  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ . [14]

$\text{CaCl}_2$  ja  $\text{NaCl}$  omaduste võrdlus [15]:

- $\text{CaCl}_2$  kasutatakse soolalahusena kristallilise  $\text{NaCl}$  niisutamiseks;
- mõned uuringud näitavad, et  $\text{CaCl}_2$  on  $\text{NaCl}$  võrreldes vähem korrosiooni põhjustav, kuid samas  $\text{CaCl}_2$  suuremat hügroskoopsust peetakse suuremaks metalli korrosiooniriskiks, kuna see hoiab seda kauem niiskena;
- $\text{CaCl}_2$  mõjub negatiivsemalt ka sõiduki piduritele, kui  $\text{NaCl}$ ;
- $\text{NaCl}$  efektiivsus väheneb oluliselt õhutemperatuuril alla  $-7\text{ }^\circ\text{C}$  ja sellisel juhul teed enam tavaliselt puhta  $\text{NaCl}$ -ga ei soolata;

- kuni  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  õhutemperatuurini on võimalik NaCl toimeefekti suurendada, kui seda niisutada  $\text{CaCl}_2$  soolalahusega;
- $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  juures on otstarbekas kasutada libedusetõrjeks ainult  $\text{CaCl}_2$ ;
- alla  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  võiks kasutada ainult puistematerjale (soolaliiva, sõelmeid, peent killustikku).
- $\text{CaCl}_2$  hoiab oma suurema hügrooskoopsuse tõttu tee kaua niiskena (just seetõttu kasutatakse  $\text{CaCl}_2$  kruuskatete tolmutõrjel);
- $\text{CaCl}_2$  on vanale betoonile suurem murendav mõju, kui NaCl (see on olnud peamine põhjus, miks  $\text{CaCl}_2$  ei kasutata talihooldeks Rootsis);
- mõju põhjavee kvaliteedile ja taimestikule on kloriidide sisalduse tõttu mõlemal soolal ( $\text{CaCl}_2$  ja NaCl) sarnane.

Kloriide kasutatakse teede soolamiseks kolmel viisil: kuiva helvessoolana, niisutatud helvessoolana või vesilahusena. Vesilahus laotub ühtlaselt ja seguneb teepinnal oleva niiskusega. Kui niiskust on liiga palju, lahjeneb soolalahus liialt ja võib ebaõnnestuda, põhjustades tee jäätumise. Kuiv helvessool laotub juhuslikult ja osa soolateradest lendub tee nõlvale. Enne jää sulatamist peab kuiv sool imama niiskust. Suurte kadude tõttu on kuiv sool majanduslikult ebaökoonoomne ja seda üldiselt ei kasutata. Niisutatud helvessool sisaldab vajalikku algniiskust, mis parandab kontakti jääga ja kiirendab mõju. Niiskus suurendab soolaterade kaalu, vähendades kadusid laotamisel ja liikluse all. Niisutamiseks lisatakse kuivale soolale 25-30% soolalahust (vähemalt  $80\text{ l/m}^3$  soola kohta). Niisutatud sool on efektiivsem ja ökonoomsem variant võrreldes kuiva soolaga ning toimib paremini, kui vesilahus võib lahjeneda liialt (Joonis 5). [15]



Joonis 5. Soola vesilahuse ja helvessoola mõju jääle teekatte pinnal kohe peale soola laotamist ja 15 minutit pärast seda [15]

## 2 LIBEDUS EESTI TEEDEL

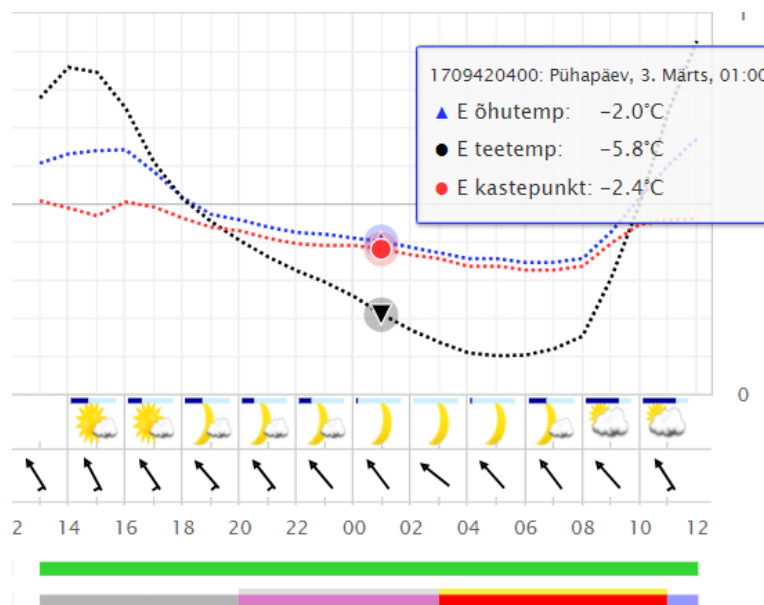
### 2.1 Libeduse tekke põhjused talvel

Teekate on libe siis, kui sellel esineb järgmises olekus vett: jää, härmatis, lahtine lumi ja liikluse poolt kinnisõidetud lumi. Nendest kõige vähem libe on lumine pind ja enim märg jää. Kui teepind on kuiv või peaaegu kuiv, ei ole see libe ka suure pakasega. [16]

Libeduse tekke puhul on oluline kastepunkt ja selle temperatuur. Kastepunkt on temperatuur, mille juures õhus olev vee aur hakkab kondenseeruma. Õhk mahutab teatud hulga veeauru, mis sõltub õhutemperatuurist - kõrgema temperatuuri juures rohkem, madalama juures vähem. Kui õhutemperatuur langeb ja saavutab kastepunkti, hakkab vee aur kondenseeruma, mis avaldub udu, kaste või härmatisena. [17]

Kastepunkti temperatuuri tõus ja langus [17]:

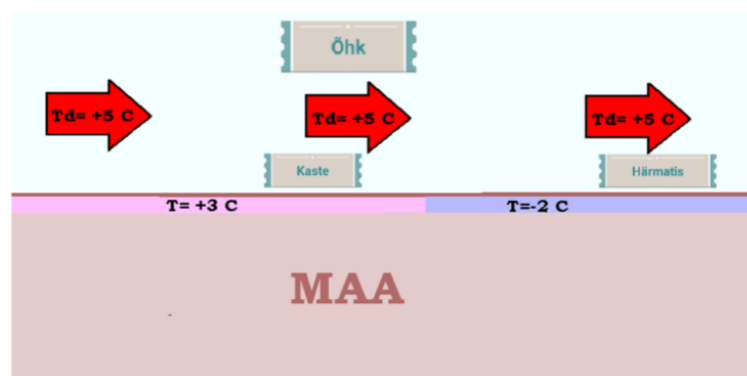
- teekatte kuivamine - kui teekatte temperatuur on kõrgem kui kastepunkt, siis toimub teekatte kuivamine;
- kondenseerumine - kui teekatte temperatuur on madalam kui kastepunkt, kondenseerub niiskus teepinnale;
- tasakaal - kui teekatte temperatuur on võrdne kastepunktiga, ei toimu kuivamist ega niiskuse lisandumist;
- härmatis - kui teekatte temperatuur on alla nulli, tekib härmatis (Joonis 6).



Joonis 6. TIK prognoos. Tee temperatuur langeb prognoosi järgi alla kastepunkti tähistatud temperatuuri. Härmatisel võimalust kuvab lilla toon joonisel [18]

Joonisel märgitud musta punktiirjoonega teetemperatuur langeb alla punase punktiirjoonega märgitud kastepunkti temperatuuri. Kui prognoos on õige, tekib kondenseerumine ning selle tulemusena teepinnale härmatis. Samuti on jooniselt näha, et tee temperatuuri languse aeg toimub selginemine.

Härmatis tekib, kui tee temperatuur hakkab järsult langema ning langeb alla kastepunkti temperatuuri. Järsu temperatuuri languse võib põhjustada selginemine. Peale seda tekib kondenseerumine ning teele tekib niiskus, mis miinus kraadidega hakkab kristalliseeruma ning võib tekitada libedust (Joonis 7). Samuti võib see tekkida siis, kui kuskil piirkonnas on olnud pikalt külmakraadid ning õhutemperatuur hakkab järsult tõusma. Teepinna temperatuur ei jõua järgi õhutemperatuuri tõusule.



Joonis 7. Härmatise ja kaste tekkimise joonis,  $T_d$  on kastepunkti temperatuur ja  $T$  on tee temperatuur [19]

Järgmiseks libeduse tekke põhjuseks võiks lugeda jäävihma ja uduvihma. Jäävihma sademed kujutavad endast peenikesi tugevaid läbipaistvaid jääteri diameetriga 1 - 3 mm (vihmapiisad satuvad langedes atmosfääri soojast kihist külma, kus nad külmuvad). Kui vihmapiisad maapinnale jõuavad, külmuvad nad kokkupuutel - tekitades sileda, tugeva jääkihi, mis katab kogu maapinna. Sarnase jääkihi võib moodustada uduvihmast tingitud sademed. Seda tüüpi jääd nimetatakse mustaks jääks. Seda tüüpi jääkiht on kõige libedam kõigist sademetüüpidest - luues sõiduki rehvidele peaaegu nulli hõõrdeolukorra. Must jää on nii nimetatud, kuna see näeb välja tume, just nagu märg asfalt. On oluline meeles pidada, et must jää ilmub mustana ainult tumedatel teekattematerjalidel, nagu asfalt. Betoontedel võib must jää välja näha hall või beež, näiteks sama värvi nagu teekate ise. [20]

Musta jää taolist olukorda võib tekitada ka talvine udu. Udu tekib, kui kastepunkti temperatuur tõuseb kõrgemale kui seda on õhutemperatuur. Kuna udu on veepiiskade kogum, võivad need hakata madalatel temperatuuridel kristalliseeruma ning seejärel

teepinnale langeda. Kui seda koguneb sinna liiga palju, võib tekkida teepinnala musta jää taolise olukorra, millega liiklejad ei pruugi osata arvestada. [20]

Libedust või haardeteguri vähenemist põhjustab ka lumesaju ja/või (pinna)tuisuga teele sattuv lumi. Paksem lumi sõidetakse autodega kinni, mis suurema liiklussageduse olukorras muutub jäiseks. Lisaks libedusele muutub tee konarlikuks ning raskelt läbitavaks. Sama probleem on ka (pinna)tuisu. Tugevad tuulepuhangud või järjepidev tuul puhub lendleva ja kergema lume teepinnale. Tee pinnale jäänud lumi muutub jäiseks läbi liiklusvahendite poolt teele toodava soojuse. Lumega seonduvad tõsisemad libeduse probleemid esinevad eelkõige siis, kui hooldustegevus ei ole õigeaegne ja/või piisav. [16]

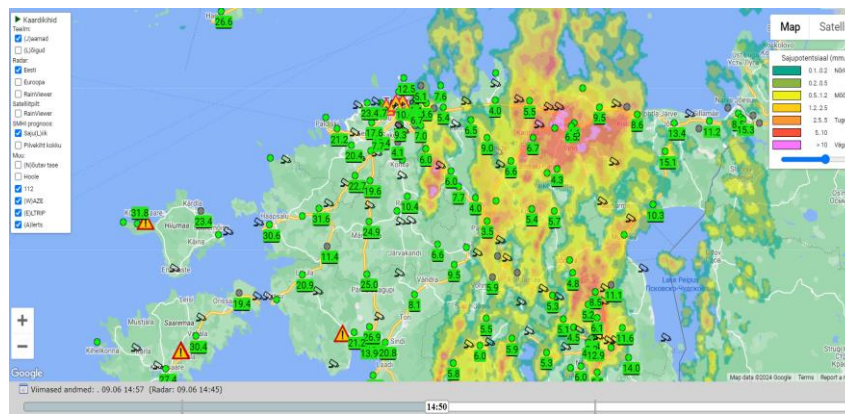
## 2.2 Libedustekke ennustamine ja ennetav libedustõrje

Libeduse tekke ennustamine on hea viis libeduse ära hoidmiseks või libeduse kontrollimiseks. Libeduse teket ei saa ainult tavalise ilmaprognoosiga ennustada, sest vaja on teada ka teeseisu puudutavaid andmeid, näiteks teetemperatuur, kastepunkti temperatuur, veekihi paksus jne. Selleks on Eesti riigiteedel ja suuremates linnades paigaldatud teilmajaamad. Teilmajaamade andurid koguvad andmeid üle kümne erineva näitaja kohta ning esitab neid TIK lehel nii numbrite, kui ka graafikuna (Joonis 8). [21] [22]

Koht	Aeg	Õhu temp	Tee- temp	Tee- temp	Kaste- temp	Tuule- kiirus	Sajaja- intens	Sajaja- sikk	Nõu- kus	Tuule- suund	Tee- kaste	Kare- dus	Nõlita- vus	Max- tuul	Sajaja- summa	Vee- kihi	Sajaja- hulk	Tee- niisk	Sõidur- ting	Lume- hulk	Lume- kiht
Aegvidu	09.06.14:20.11.9	mäng	19.7	10.8	1.8	0.00	ei saja	53	↑	→	→	→	2000	4.0	5.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Angu Lufft	09.06.13:20.13.9	mäng	19.3	12.5	6.4	0.00	ei saja	92	↑	→	→	→	2000	9.4	3.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Arvola	09.06.14:20.13.4	mäng	15.5	10.2	4.2	0.00	ei saja	97	↑	→	→	→	2000	8.6	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aravika	09.06.14:20.13.1	tuv	19.1	11.1	1.7	0.00	ei saja	88	↑	→	→	→	2000	5.2	3.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Arusaala	09.06.14:20.14.0	mäng	17.8	10.8	4.3	0.00	ei saja	81	↑	→	→	→	2000	7.3	6.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Asakama	09.06.14:20.17.2	tuv	24.9	9.8	3.5	0.00	ei saja	62	↑	→	→	→	2000	8.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Audru	09.06.14:20.15.3	mäng	28.5	7.3		0.00	ei saja	59	↑	→	→	→	2000	8.2	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Enumäe	09.06.14:20.12.5	mäng	16.3	11.5	4.2	0.00	ei saja	54	↑	→	→	→	2000	6.4	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Enge	09.06.14:25.16.1	tuv	30.2	7.8	4.3	0.00	ei saja	58	↑	→	→	→	2000	10.5	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hehermaa KAUJ	09.06.14:27.14.7	tuv			3.8		ei saja	56	↑	→	→	→	2000	9.0							
Haldemeeste	09.06.14:20.14.3	tuv	23.5	8.1	3.9	0.00	ei saja	66	↑	→	→	→	2000	11.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hüaru	09.06.14:20.15.1	tuv	24.1	9.1	4.7	0.00	ei saja	67	↑	→	→	→	2000	9.1	2.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jäki	09.06.14:25.14.1	tuv	23.0	8.5	6.3	0.00	ei saja	69	↑	→	→	→	2000	9.7	1.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Invere	09.06.14:20	mäng																			
Jaskna	09.06.14:20.15.5	tuv	35.0	7.2	4.1	0.00	ei saja	58	↑	→	→	→	2000	8.4	3.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jägala	09.06.14:20.13.5	mäng	16.7	11.3	1.8	0.00	ei saja	87	↑	→	→	→	2000	8.6	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jägava KAUJ	09.06.14:27.15.5	tuv			2.2		ei saja	88	↑	→	→	→	2000	5.2							
Jõhvi	09.06.14:20.17.1	tuv	25.3	10.6	3.0	0.00	ei saja	66	↑	→	→	→	2000	6.1	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Juri	09.06.14:20.13.2	mäng	17.4	11.5	2.4	0.00	ei saja	89	↑	→	→	→	2000	4.3	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Juri 2	09.06.14:20	mäng																			
Kanama	09.06.14:25.13.9	tuv	21.3	8.9	4.2	0.00	ei saja	72	↑	→	→	→	2000	8.0	1.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kangu	09.06.14:20.12.9	mäng	15.4	10.3	1.9	0.00	ei saja	84	↑	→	→	→	2000	5.8	0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Karjala	09.06.14:20.17.9	tuv	24.7	8.1	6.0	0.00	ei saja	53	↑	→	→	→	2000	10.9	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kassimäe	09.06.14:20.13.2	mäng	17.3	12.0		0.00	ei saja	92	↑	→	→	→	2000	6.4	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Käski	09.06.14:20.16.5	tuv	20.8	9.3	4.4	0.00	ei saja	62	↑	→	→	→	2000	8.2	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kella Keskvaljak	09.06.14:20.14.6	tuv	17.1	9.8			ei saja	73	↑	→	→	→									
Kella Pihlaka	09.06.14:20.15.9	tuv	23.5	11.1			ei saja	73	↑	→	→	→									
Kella Rõõmu	09.06.14:20.14.4	mäng		9.8			ei saja	74	↑	→	→	→									
Kemba	09.06.14:20.12.3	mäng	15.8	10.5	2.0	0.00	ei saja	89	↑	→	→	→	2000	4.5	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kemza	09.06.14:20.15.3	mäng	27.7	8.1	2.4	0.00	ei saja	62	↑	→	→	→	2000	7.7	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kõnu KAUJ	09.06.14:27.14.2	tuv			9.0		ei saja	68	↑	→	→	→	2000	10.8							
Kõne-Risti	09.06.14:20.13.0	mäng	16.7	10.8	2.7	0.00	ei saja	86	↑	→	→	→	2000	5.0	1.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Küllapala	09.06.14:20.13.5	mäng	15.4	10.7	2.1	0.00	ei saja	89	↑	→	→	→	2000	4.8	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Kunda KAUJ	09.06.14:27.15.7	tuv			5.1		ei saja	70	↑	→	→	→	2000	8.9							
Kõnusteet	09.06.14:20.14.6	tuv			6.4		ei saja	64	↑	→	→	→									

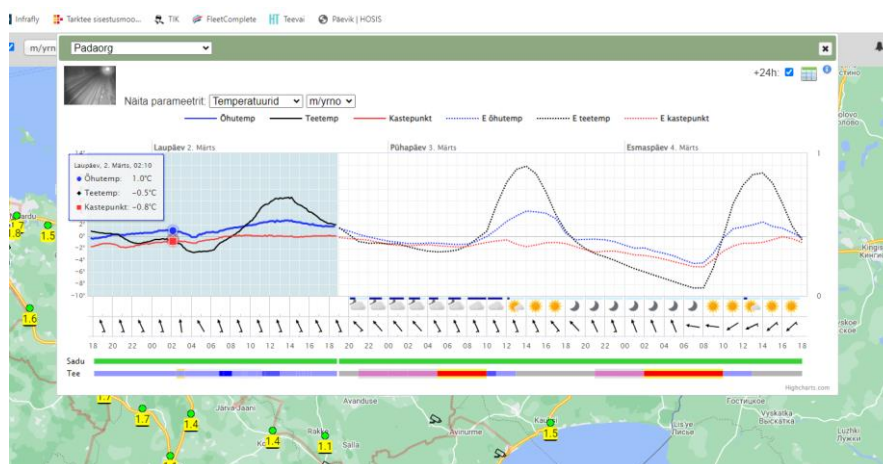
Joonis 8. TIK ilmajaamade koondtabel [18]

TIK on teinfosüsteem, kust on võimalik näha teilmajaamade andmeid ja nendest koostatud prognoose (Joonis 9). Prognoose koostab TIK veel Rootsi, Norra ja Soome ilmteenistuse andmete järgi. Teilmajaamad on enamjaolt paigaldatud kaamerate juurde ning teepinna olukorda on võimalik jälgida ka selle järgi. TIK lehel pärinevate andmete põhjal saab selgeks teha, millal võib libedus tekkida, kuidas töid organiseerida ning vajadusel ka teha ennetavat libedusetõrjet. [21] [22]



Joonis 9. TIK radaripilt [18]

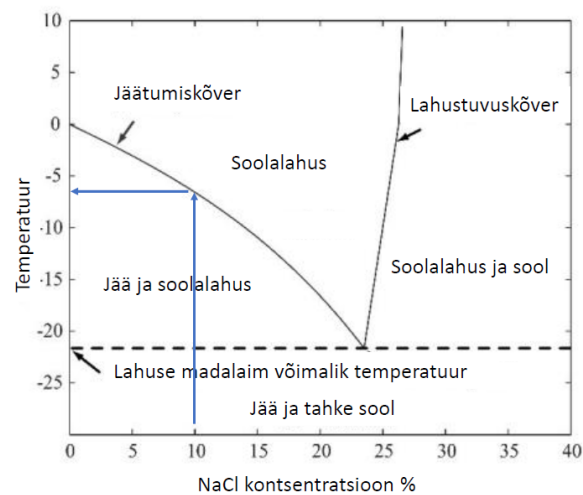
Ennetav libedustõrje on kehtestatud libeduse tekkimise vältimiseks. Ennetavat libedusetõrje kohustus on põhi- ja tugimaanteedel, mis on seisunditasemega 3+. Mõte seisneb selles, et kõrge liiklussagedusega teedel vähendada libedusest tingitud õnnetuste arvu. Seda on muidugi keeruline saavutada erinevate ilmastiku tingimustega nagu näiteks väga madalate miinus kraadidega (alla  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aga enamus ajast on see siiski tehtav. Ennetava libedusetõrje peaks teostama, kui ilmaprognooside tulemus võib tee haardetegur langeda alla nõutava. Hooldusükli ajaks on üks kuni kuus tundi enne prognoosi kohast libedusetekke võimalust. Esmakordselt lisati ennetav libedusetõrje seaduse tasandile 2011. aastal. Koheselt seda lepingutesse viia ei õnnestunud rahaliste vahendite puudumise tõttu ja hoolduslepingute muutmise keerukuse tõttu. Nüüdseks on enamikesse lepingutesse see nõue sisse viidud ja teehooldajad peavad sellega oma töös arvestama. Ennetav libeduse tõrje on eraldi tasustatud ning peab olema tõendatud prognoosi välja võttega pildi kujul ja tase 3+ aktiga (Joonis 10). Prognoosil peab olema peal prognoositavad tee temperatuurid ja teeseis koos kellaaegadega. [23]



Joonis 10. TIK prognoosi väljavõte. Joonisel kujutatud prognoositavate temperatuuride langust ja härmatist teepinnale [18]

## 2.3 Libedustõrje meetodid

Libeduse tõrje puhul on kaks meetodit, ennetav libedusetõrje ja juba tekkinud libedusetõrje. Erinevad ilmastiku olud nõuavad eri lähenemist. Ennetav libedusetõrje teostatakse, kui prognoos lubab järske temperatuuri langusi ja tee on niiske, kui on härmatise võimalus või tuleb lumesadu, mis on märg ja võib liikluse tagajärjel kinni jääda teele. See ei lase jääl tekkida nii lihtsalt tekkida. Isegi, kui peaks tekkima teepinnale mingi jääkiht, jääb sool jääkristallide vahele ja muudab järelejäänud lahuse veel kangemaks ning selle jäätumine peatub, kui temperatuur rohkem ei lange ja miski lahust ei lahjenda (Joonis 11). Selle tulemusena jääb teepinnale nõrgem jääkiht, mis liikluse mõjul laguneb. Samuti ei lase see märjal lumel ennast tee külge kleepida ja sahad saavad selle lihtsamalt tee pealt ära lükata, see väldib kinni sõidetud lund ja libeduse tekkimist. [24]



Joonis 11. Jäätumistemperatuuri graafik [24]

Juba tekkinud libeduse puhul on vaja jääd teekattelt eemaldada keemiliste vahenditega. Selle protsessi käigus tuleb jää sundida sulama null kraadi juures ja alla selle. Kemikaalid alandavad vee külmumistemperatuuri. Molekulid lähevad protsessi käigus tahkest olekust vedelasse. Sulamise käigus lahjeneb keemiline aine, kuni saavutatakse uus tasakaal. Eduka libedust ennetava strateegia korral ei ole vaja jääd hakata keemiliste ühenditega sulatama. Kui jää siiski tekib, kasutatakse kemikaale õhukese jääkihi sulatamiseks ja teeolude taastamiseks. [24]

Kui jääkihi paksus teepinnal küündib juba mõne sentimeetri paksuseks tuleks kasutada alusteradega masinaid libedusetõrje teostamiseks. Alusteraga kraabitakse teepinna kohal olevat jääkihti ning samaaegselt toimub ka soola puistamine. [24]

## 2.4 Vajaliku soolakoguse leidmine

Optimaalse soolakoguse valimisel tuleks lähtuda mitmetest teguritest, et vältida soola üle doseerimist, mille tulemusena teed liigselt märjaks lähaksid või liiga väikse kogusega puistamist, mis tekitab olukorra, kus ühe puistamise asemel tuleb mitu korda masinatel väljas libedusetõrjet teostamas. See tingib suuremad kulutused nii soola, kui ka kütuse pealt. Erinevad ilmastiku tingimused nõuavad erinevat lähenemist soolakoguse valimisel ja kvaliteetse libedusetõrje toimimisel.

Vajaliku soolakoguse leidmiseks peaks arvestama järgmiste teguritega [16]:

- õhu-, tee- ja kastepunkti temperatuuri jälgimine peaks olema esimene tegevus soolakoguse valimisel. Tuleb jälgida, kas temperatuurid on tõusuteel, languses või jäävad ühtlaseks. Kas teedel toimub kuivamine või kondenseerumine. Selle järgi hinnatakse, kas soolakogus, mis autojuhtidele anda on suurem või väiksem või kas on vajalik üldse puisteringi teostada. Samuti aitab temperatuuride jälgimine ajastada soola panekut nii, et see saaks võimalikult efektiivselt toimida ja soola kulu oleks minimaalne;
- pidevast libedusetõrjest võib teedele jääda jääksoola. Soola jääk tekib teele, kui sool lahustub lume ja jää pealispinnal. See seguneb veega ja moodustab soolalahuse. Kui temperatuur muutub, võib osa veest külmuda, kuid sool jääb vedelaks ja jääb tee pinnale. Korduva külmumise ja sulamise tagajärjel tekib soolajääk. Samuti mõjutab seda liikluskõrgus, kui tihedalt autod liiklevad ning kas selle tagajärjel sool teelt eemale kandub. Näide: Kui algselt on plaanis välja saata puisturid  $7 \text{ g/m}^2$  doseeringuga puistama ja teedel on ilmajaama andmetel soolajääk  $1,8 \text{ g}$ , võiks kaaluda hoopis puistamist  $5 \text{ g/m}^2$ , sest teedel on juba väike kogus soola, mis on viinud külmumise temperatuuri alla poole ja  $7 \text{ g/m}^2$  tekitaks jääksoola teepinnale juurde;
- sademete puhul optimaalse soolakoguse leidmine tuleneb sajusummast ja saju intensiivsusest. Soola kogus peaks olema selline, et ära hoida libedus ning samas mitte laskma lumel ennast teekülge kleepida. Sellisel puhul tuleb ka arvestada, et suuretenäosusega tuleb väljas käia mitmeid kordi ja teostama nii sahkamist, kui ka puistamist samaaegselt.

## 2.5 Libedustõrje ja keskkond

Libeduse tõrje eesmärk on tagada teede ohutus talvistes tingimustes. See hõlmab erinevate kemikaalide ja materjalide kasutamist, nagu sool, liiv ja muud jääsulatusvahendid. Kuigi see on oluline liiklusõnnetuste ennetamiseks ja liiklejate turvalisuse tagamiseks, võib libeduse tõrjel olla märkimisväärne mõju keskkonnale.

Teeäärne taimestik, nagu puud, põõsad ja rohi, omab kõrget esteetilist väärtust ja täidab mitmeid olulisi funktsioone, sealhulgas pinnase kaitse erosiooni eest ning liiklusheite ja müra summutamine. Sool mõjutab märgatavalt lähimale sõiduteele paigutatud üksikpuid, kuna sool ladestub lokaalselt. Sool muudab pinnase tihedamaks, vähendab selle läbilaskvust ja suurendab veemahutavust, viies pH taseme aluselisemaks. See takistab juurtele vee ja hapniku juurdepääsu, aeglustades taimede kasvuprotsessi ja põhjustades kloori imendumist rakkudes. Pidev kloori kuhjumine võib viia mürgiste tasemeteni, mis kahjustab lehti ja põhjustab enneaegset lehtede langemist. Selle tagajärjel väheneb puude külmakindlus ja immuunsus, mis koos teiste agressiivsete teguritega põhjustab teeäärsete puude aeglasema kasvu ja lühema eluea. Talvel on taimestik uinunud olekus ja neelab minimaalselt vett ja saasteaineid. Kasvuprotsess algab märtsis/aprillis, mistõttu kloori sisaldus pinnases mõjutab peamiselt rohelist kevadel. Seetõttu tuleb soola laotamisega libedustõrje hooaja lõpus olla võimalikult ettevaatlik. [25]

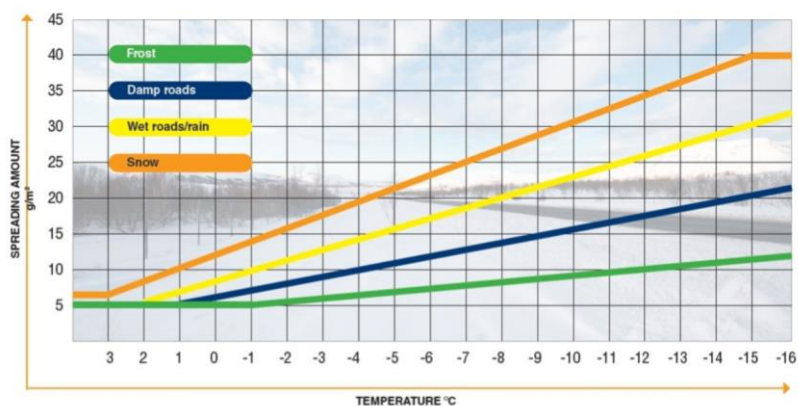
Libedustõrje soolad, mis on maanteed ja teede peale laotatud, võivad vihma ja lume sulamise tulemusena leostuda pinnasest ning liikuda põhjavette. See võib suurendada põhjavee soolasust, mis võib omakorda mõjutada põhjavee kvaliteeti ja muuta seda inimestele ja loomadele vähem sobivaks tarbimisel. Lisaks orgaaniliste libedustõrjevahendite lagunemisel tekib süsinikdioksiidi, mida nimetatakse kasvuhooonegaasiks, millel on globaalne mõju keskkonnale, eriti linnapiirkondades, kus see võib olla probleemiks inimeste tervisele. [25]

## 3 LIBEDUSTÕRJE TEMPERatuurIPÕHISE PUISTAMISE SÜSTEEM.

### 3.1 Libedustõrje süsteemid

Põhiliselt toimub libedustõrje mehaaniliselt ehk soolakogused määratakse autojuhtide või valvemeistrite poolt. Kogused valitakse kogemuslikult tee olukorda ja temperatuure hinnates. Ise soolakoguseid määrates, tuleb olukorra muutudes neid ka ise muuta. Üldjuhul pannakse soolapuistur kindla normi peale ning sõidetakse oma marsruut sellega läbi. Koguseid suurendatakse ainult ohtlikes kohtades, nagu näiteks ristmikel või järsumatel tõusudel/langustel. Samuti peavad autojuhid paika panema ise soolapuisturil puistamis laiuse ning vajadusel seda muutma. Kuna tee temperatuurid võivad mõne kilomeetri peale palju kõikuda, oleks hea kasutada uuenduslikumaid süsteeme.

Temperatuuri põhised libedustõrje süsteemid on libedustõrjes väga kasulikud. Need lihtsustavad autojuhtide tööd, valides ise soolakogused vastavalt temperatuuridele. Selle tulemusena on võimalik vältida üksikuid kohtasid, kus teekate võib temperatuuri erinevuse tõttu libedaks minna. Eestis on kasutusel põhiliselt kahe tootja soolapuisturid, Epoke ja Schmidt. Mõlemal on olemas ka temperatuuri põhised libedustõrje süsteemid. Epoke on varustatud Epotherm seadmega ja Schmidt Thermologic seadmega (Joonis 12). [26] [27]



Joonis 12. Epotherm puistamishormide graafik. Graafikul on kujutatud soolanormide kõverad erinevatel temperatuuridel [28]

GPS põhise puistamis süsteemi abil on võimalik töid lihtsustada marsruudi salvestamisega puisturipulti. Marsruut tuleb läbida ühe korra ning puisturi pult jätab meelde soolapuiste laiused ning kohad, kus olid vaja puistelaiust muuta.

## 3.2 Katseplaan

Katset teostatakse Verston OÜ hooldepiirkonnas. Verston OÜ on võtnud eesmärgiks vähendada enda keskkonna mõju teedehitus ja hooldus-ettevõttena. Katse eesmärk on näha, kas temperatuuri põhine libedusetõrje süsteemi abil on võimalik teostada kvaliteetset libedusetõrjet, tänu millele oleks võimalik keskkonna jalajälge vähendada ning püsida jätkusuutliku ettevõttena. Kvaliteetne libedusetõrje väljenduks soola kasutamises võimalikult optimaalselt ehk, et seda poleks teedel liigselt ja samuti, et seda ei oleks liiga vähe. Lisaks võiks katse tulemusena selguda, kas automaatsed süsteemid aitavad lihtsustada autojuhtide ja valvemeistrite tööd.

Verston OÜ on teehooldajaks kuues maakonnas. Katsete piirkondadeks on Lääne-Virumaa. Lääne-Virumaal on teehooldajaks Verston (Joonis 13).

### Talihoolde kilomeetrid

	SAARE	<u>L-VIRU</u>	TARTU	L-HARJU	VÕRU	PÄRNU	KOKKU
ST-3+	0	115	232	237	32	100	716
ST 3	147	185	114	130	132	74	782
ST 2	340	482	425	215	280	194	1936
ST 1	605	432	619	145	806	348	2955
KOKKU	1092	1214	1390	727	1250	716	6389 38,4%
EESTI							16605

Joonis 13. Verston OÜ poolt hooldatavad maakonnad ja nende kilomeetrid. Punasega alla joonitud on katsealune piirkond

Lääne-Virumaa katselõigud:

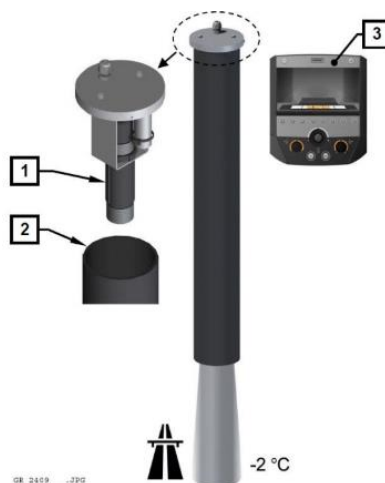
- nr 1 Tallinn - Narva kaherealine osa, 63,68 – 90,29 km, tase 3+ tee ja kaherealine;
- nr 17120 Sämi - Sonda - Kiviõli, 0 – 14,266 km, tase 3 tee;
- nr 5 Pärnu – Rakvere - Sõmeru, 171,479 – 184,457 km, tase 3+ tee;
- nr 23 Rakvere - Haljala, 0,00 – 8,97 km, tase 3+ tee;
- nr 20 Põdruse – Kunda - Pada, 0,00 – 13,382 km, tase 3 tee.

Katses kasutatav libedusetõrje süsteem on Schmidt soolapuisturitel kasutatav temperatuuripõhine soola puistamissüsteem Thermologic. Esimesed katsetused teostatakse kõrvalteedel, et vältida ebaõnnestumise korral tekkivaid liiklusohtlike olukordasi. Thermologicuga on varustatud kõik katses osalevad sõidukid ning need on hooldelepingute nõutele vastavad talihooldemasinad. Masinaid kokku on 4 tükki. Esimestel katsetel võiks selguda, millised on Thermologicu tugevad küljed, millised on nõrgad küljed,

kas Thermologicuga on võimalik Eesti tingimustes libedusetõrjet teostada ning kuidas oleks võimalik Thermologic seadistada vastavalt, et sellega oleks võimalik kvaliteetselt libedusetõrjet teha. Thermologic seadme kirjeldus ja tööpõhimõtte kirjas järgmises peatükis.

### 3.3 Thermologic seadme tööpõhimõtte

Thermologic on teepinna temperatuuri jälgiv ning selle järgi automaatselt soola puiste normi muutev seade. Ühendatud on Thermologic Schmidti poolt toodetud Stratos puisturiga. Teepinna temperatuuri registreeritakse pidevalt infrapuna anduri abil, edaspidi IR-andur. IR-andur on torukujulises ümbrises ning suunatud teepinnale (Joonis 14). Paigaldusel ei ole kõrgus tähtis, kuid madalale paigaldamine suurendab selle määrdumise ohtu. Kui IR-andur määrdub, võib see häirida selle tööd ning temperatuuri andmed võivad valed olla, mille tulemusena soolapuistur hakkab kas rohkem või vähem soola puistama. IR-andur mõõdab temperatuuri vahemikus  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Puistehulkasid reguleeritakse selles temperatuurivahemikus. Kui teepinna temperatuur ületab kõrgeimat mõõdetavat väärtust, siis registreeritakse automaatselt  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kui teepinna temperatuur on madalam väiksemast registreeritavast väärtusest, siis puistehulk jääb samaks, mis on temperatuuril  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mõlemal juhul ei kuvata ekraanil tegelik teepinna temperatuur, vaid vastavalt  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  või  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mõõdetavate temperatuuride piirväärtused võivad veidi erineda väärtustest  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [29]



Joonis 14. Joonisel kujutatud (1) infrapuna andur, (2) anduri hoidetoru ja (3) Thermologic pult [29]

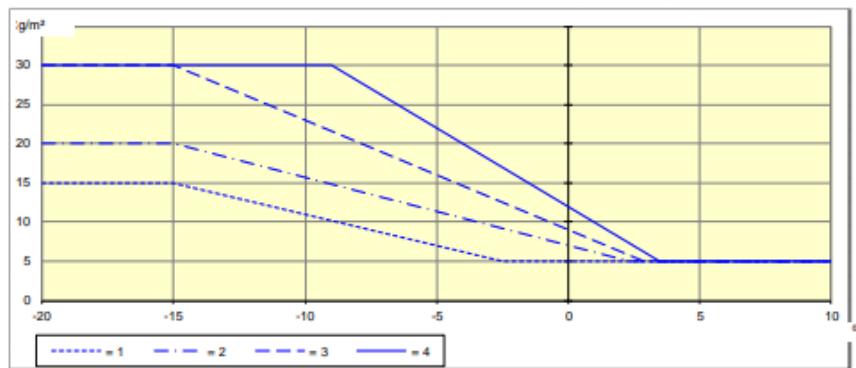
Teeseis, enne Thermologic puldist valiku tegemist, tuleks visuaalselt hinnata, kas autojuhil või valvemeistril. Thermologic süsteemis eristatakse nelja teepinna olukorda [29]:

1. kaste – kasutusel libeduskihi paksusel kuni 0,10 mm, kasutatakse härmatise või ennetava libedustõrje puhul;

2. niiske – kasutusel libeduskihi paksusel 0,10 - 0,15 mm, kasutatakse niiske teepinna külmumise puhul;
3. märg – kasutusel libeduskihi paksusel 0,15 – 0,20 mm, kasutatakse märja teepinna külmumisel või juba tekkinud jää korral;
4. lumi – kasutusel libeduskihi paksusel 0,20 – 0,25 mm, kasutatakse jäite või lume korral.

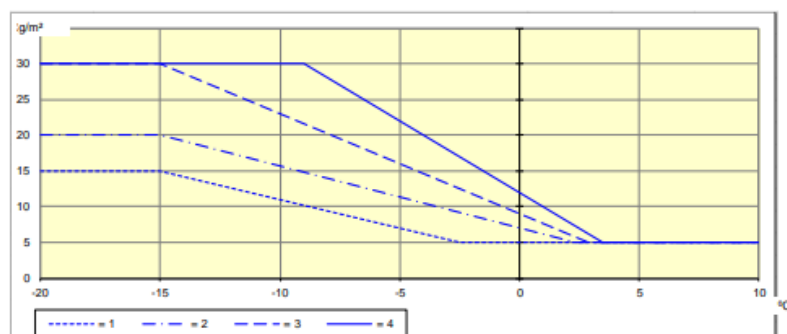
Veekihi paksus üle 0,25 mm tuleks Thermologic välja lülitada ning ümber minna manuaalse juhtimise peale.

Thermologic seadmest on võimalik valida kuiva sooladoseeringut ja eelniisutatud sooladoseeringut. Teepinna temperatuuri ja soolapuiste normide seos on toodud diagrammidel. Igal diagrammil on neli graafikut, üks iga teepinna olukorra kohta (Joonis 15). [29]



Joonis 15. Joonis kuiva soola diagrammi kohta [29]

Diagrammid on tehtud nii niisutatud soola kohta 70/30 ja eelniisutatamata ehk kuiva soolapuistamise kohta (Joonis 16).



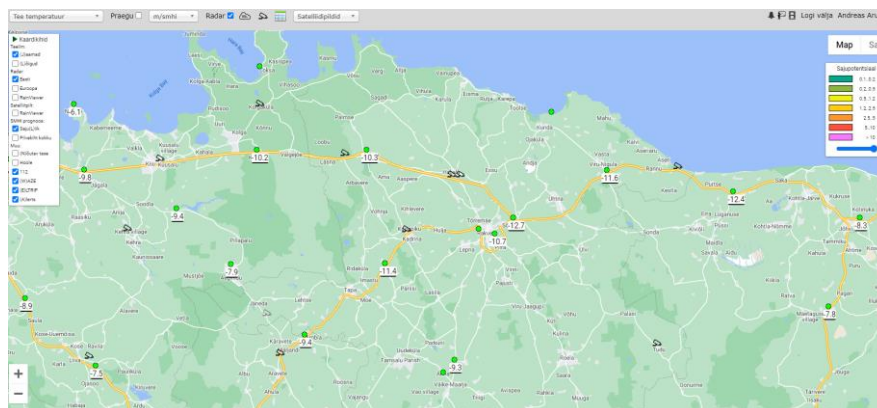
Joonis 16. Joonis eelniisutatud soola diagrammi kohta [29]

Diagrammil on seletused samas numbrilises järjekorras nagu eelpool loetelus teepinna olukorrad on nummerdatud.

Thermologic nihe/offset on temperatuuri kõrvalekalle. Nihet saab muuta manuaalselt puldis ja vahemikus 0 °C kuni -5 °C. See on väga kasulik ennetava libedustõrje planeerimiseks, sest võimalik on temperatuuri muuta prognoosiga sobivaks ning see läbi vajaliku soola puistenormi teepinnale saada. [29]

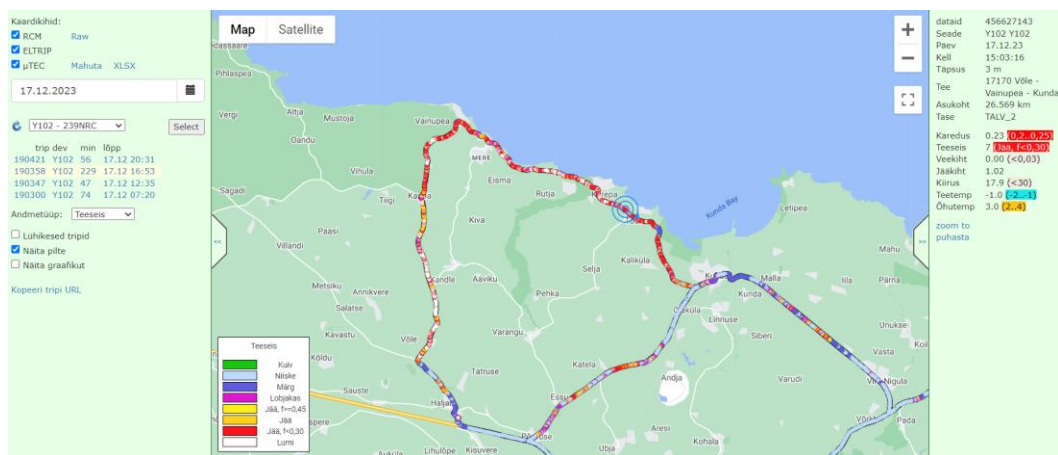
### 3.4 Katsed Thermologic seadmega puistamisel

Dokumenteeritud katseid teostati neljal korral. Esimene katsetus viidi läbi ilma soolapuisturit tööle panemata, ehk libedusetõrjet ei teostatud. Autojuht võttis marsruudi ning selle marsruudi jooksul jälgiti temperatuuride muutust ning, kui palju oleks pannud Thermologic soola. Test toimus Tallinn-Narva ida suunal. Kuna oli test sõit, ei tehtud seda pikalt. Sõit algas Haljalast ning lõppes Sõmeru ristis. Õhu ja tee temperatuurid olid suhtelised madalad, õhk -10 °C ja -14 °C vahel ja tee -11 °C ja -13 °C vahel antud lõigul (joonis 17). Lõigu pikkuseks on 12 km ja selle 12 km pealt näitas Thermologic kolm kraadi erinevust. Haljalast startides olid Thermologic seadme teetemperatuuri näiduks -12 °C. Umbes 92-l km näitas tee temperatuuriks -13 °C ja kuigi ilmajaamad näitasid teeseisus niiske + sool, olid teed pigem kuivad. Puistamis grammiks oli see hetk 17 g/m<sup>2</sup> kuiva soolaga doseering. Umbes 96-ndal kilomeetril oli tee temperatuuriks -15 °C ja doseering 20g/m<sup>2</sup> "niiskes" seades Thermologicu puldist. Sõmeru ristumiseni jõudes oli tee temperatuuri näit -13 °C ja ilmajaama näit -12,7 °C (Joonis 17). Selle testiga oli näha, kui palju võib tee temperatuur väikse lõigu peale muutuda. Samuti oli näha grammide muutust kohe, kui toimus kraadide tõus või langus. -15 °C oli soolakogus puistamiseks Thermologicu järgi 19 g/m<sup>2</sup>. Selline soolakoguse oleks teedele liigniiskust tekitanud ning tulemusena liigne niiskus oleks nii madalate temperatuuridega tee libedaks teinud. Valvemeister oleks sellises olukorras libedusetõrjet teostanud 15 g/m<sup>2</sup> soolaga.



Joonis 17. Teetemperatuurid katse toimumise ajal [18]

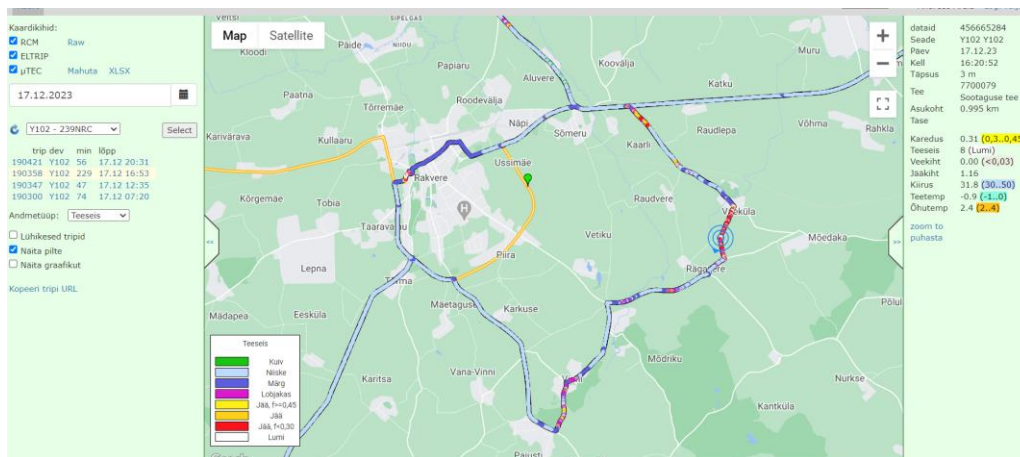
Järgnevalt sai katsetatud libedusetõrjet. Thermologic esmane puistamine viidi läbi 17.12.2023. Katses osales kaks autot ning puistamisi alustati tase 1, tase 2 ja tase 3 teedel. Ühel autol sõitis valvemeister järgi optilise haardeteguri mõõturiga (Joonis 18). Esimene auto, edaspidi auto nr 1, teostas testpuistamise Võle-Vainupea-Kunda ja Põdruse-Kunda-Pada lõikudel. Mõlemal teel on lõiguti erinevad tasemed. Teine töös käsitletud auto, edaspidi auto nr 2, teostas test puistamist Nurkse-Põlula, Rakvere-Rannapungerja ja Sõmeru-Kabala teedel. Optilise haardeteguri mõõtur luges auto nr 1 järgi sõites veekihi paksuseks 0,01 - 0,20 mm. See muutus pideval ning 0,20 mm oli maksimum. Veekihi jälgimine on oluline teepinna olukorra valimiseks Thermologic puldist. Samuti võib see mõjutada libedusetõrje tulemust, kui soolanorm valitakse liiga väike ning see lahustub paksus veekihist liialt, tulemusena libedusetõrje ei toimi. Tee temperatuur kõikus -0,4 °C ja -2 °C vahel. Termologic puldist oli valitud teepinna olukorra seade "niiske". Selles seades oli soola doseering stabiilselt 8 g/m<sup>2</sup>. Teepinna olukorra seades kuiv näitas sellel hetkel doseeringuks 5 g/m<sup>2</sup>. Sellises olukorras oleks valvemeister ise valinud soolakoguseks 7 g/m<sup>2</sup>. Esimese testi tulemusena puistas auto nr 1 ainult ühe grammi rohkem.



Joonis 18. Automaatse libedusetõrje süsteemi katse esimese soolapuiste marsruut.

Optilise haardeteguri seadmega maha jäetud jälg mtss.teeilm.ee lehele [13]

Auto nr 2 oli samuti valinud teepinna olukorra seadeks niiske. Tee temperatuur sellel hetkel oli näitade järgi stabiilselt -2 °C. Puiste doseeringuks näitas masin 9 - 12 g/m<sup>2</sup>. Seda on kohati viis grammi rohkem, kui eelnevalt mainitud valvemeistri otsus, ise kogust ette öeldes. Sellega katse lõppes ning masin pani manuaalselt seitsme grammiga soolapuisturi tööle. Peale puistamist teostas valvemeister patrull sõidu ning tee haardetegur vastas nõutele (Joonis 19).



Joonis 19. Joonisel kujutatud patrullisõit optilise haardeteguri mõõturiga libeduse tuvastamiseks peale katset [13]

Järgnevat katsed toimusid kõigi nelja autoga. Kaks autot, edaspidi auto nr 3 ja auto nr 4, näitasid samu probleeme, mis olid auto nr 2. Originaal seades soola puistamis grammid 3 kuni 5 grammi suuremad, võrreldes valvemeistri poolt öelduga. Soolanormide erinevus tuleb eelnevalt mainitud algseadistatud soolanormide graafikutest. Auto nr 1 erines doseering jätkuvalt ainult ühe kuni kahe grammi võrra.

Veebruarikuus muudetudi ära Thermologicu puldis algseades olevad puistatava soolanormide andmed. Sisetatud soolanormide andmed niisutatud soolaga on Verston OÜ-s kasutusel olevad üldised normid. Valvemeistrid kasutavad neid oma igapäevatoos libedusetõrje teostamiseks (Tabel 3). Algseadistuses olev Thermologic graafik on Saksamaa teedel mõeldud ning on Eesti tingimustes üledimensioneeritud, nagu oli näha kolme masina näitel.

Tabel 3. Verston OÜ niisutatud soola kulunormide tabel.

Niisutatud sool 70/30						
	+2	0	-2	-4	-6	-8
Kaste (V)	5	5	5	6	7	8
niiske (V)	5	5	7	9	11	13
märg (V)	5	7	9	11	13	15
lumi (V)	5	9	13	17	21	25

Muutused tehti ka kuiva soola andmetega. Kuiva soola andmed pärinevad Lääne-Virumaa hoolde piirkonnast. Tabel on tehtud teemeistri pikaajalise kogemuse põhjal. Soola kulunormid on välja toodud (Tabel 4).

Tabel 4. Verston OÜ Lääne-Viru piirkonnas kasutatav kuiva soola kulunormide tabel

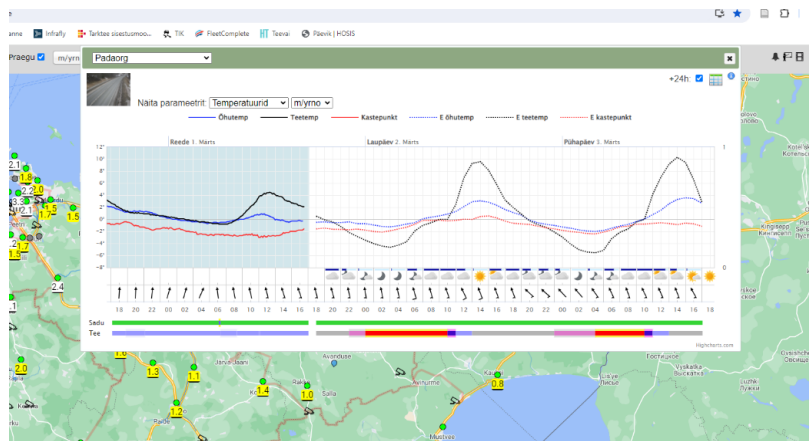
Kuiv sool					
	0	-8	-10	-12	-14
Kaste	5	10	10	15	15
Niiske	7	10	12	15	15
Märg	9	15	15	18	18
Lumi	12	15	18	20	20

Muudetud soola puistamisnormidega toimus esimene katsetus 12.02.2023. Kuna oli tuisune ilm ja tuul puhanguti üle 10 m/s, tehti libedusetõrjet ainult varjulistes kohtades. Tee temperatuurid olid -5 °C ja -6 °C vahel. Auto nr 1 ja auto nr 2 puistasid seades "niiske". "Niiske" doseering oli 11-12 g/m<sup>2</sup>. Auto nr 3 ja auto nr 4 puistasid "märjas" seades, sest ning nende näidud olid 13-14 g/m<sup>2</sup>. Tee temperatuurid selleks hetkeks olid -5 °C ja -6 °C vahel (Joonis 20). Kuna prognoos ei lubanud tõusu ja näitas stabiilselt tee temperatuuri, olid tulemuseks märjad teekatted ja soola üledimensioneerimine. Libedustõrje tulemuseks oleks võinud olla niisked teed. Sama päeva õhtuks oli tuul vaibunud ja pidi käima üle tegemas libedad kohad. Tee temperatuurid oli siis -4 °C ümber ja testitavad masinad kõik näitasid 8 g/m<sup>2</sup> soolakoguseks "niiskes" seades. Valvemeistri patrullisõidu ja TIK teeinfo põhjal oleks soolakoguseks algselt määratud 12-12,5 g/m<sup>2</sup>. Sellejärgi esmapilgul võiks öelda, et 13-14 g/m<sup>2</sup> puistamine kahe masina puhul oli liiga palju. Kuna nendel lõikudel puuduvad tee ilmajaamad ja oli ka kerge lumesadu võis see olla tegelikkuses sobilik. Seadistused olid valitud lähtudes prognoosist.



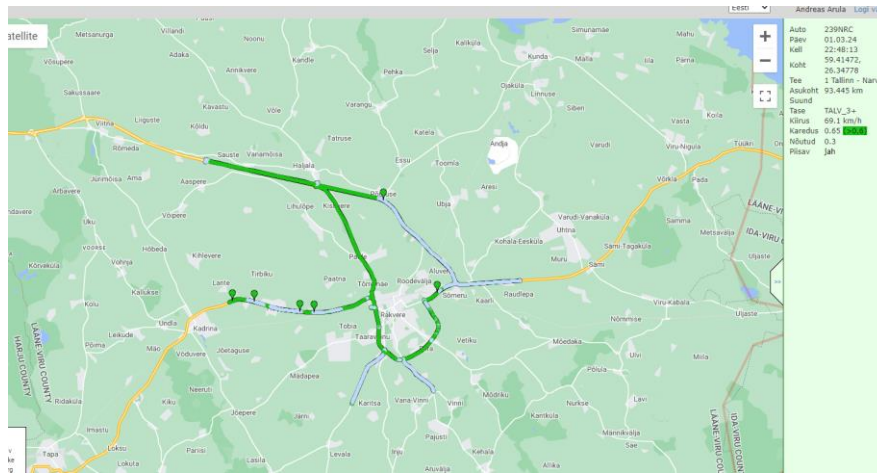
Joonis 20. Joonisel A kujutatud tuulepuhangud, joonisel B kujutatud tee temperatuurid [18]

Esimest korda tekkis võimalus testida ennetavat libedusetõrjet Thermologicuga 01.03.2024. Teeilmajaamade järgi prognoositi härmatist ning kuna siamaani oli katsetatud ainult libedusetõrjet, prooviti automaatseadet ennetaval libedusetõrjel (Joonis 21).



Joonis 21. TIK väljavõtte härmatise ja teepinna jäätumise prognoosist. Temperatuuri graafik näitab tee temperatuuri langust alla kastepunkti temperatuuri. Alumisel real teeseisu härmatist ning mõne tunni pärast jääd [18]

Seadistus oli valitud masinatel "kaste" ning kõik masinad puistasid soola miinimum kogusega ehk 5 g/m<sup>2</sup>. Sellistes tingimustes annab valvemeister sama koguse ette. Puiste toimus paar tundi enne ning hiljem kontrollis valvemeister patrullides optilise haardeteguri mõõturiga tee seis. Teedel libedust ei tekkinud (Joonis 22).

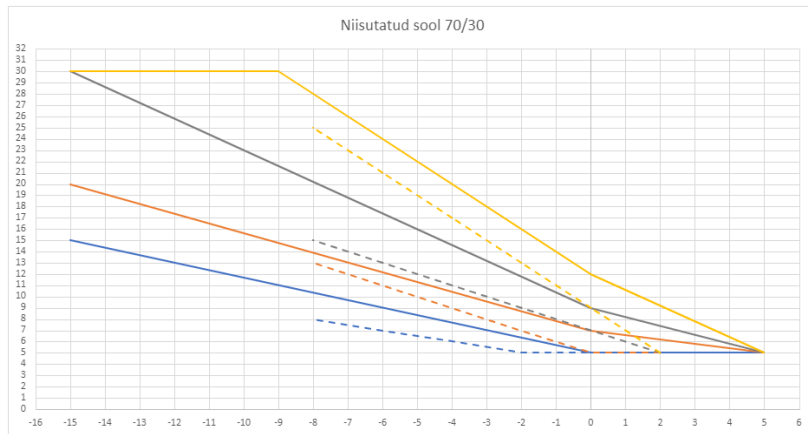


Joonis 22. Patrull sõidu marsruut optilise haardeteguri mõõturiga. Teepinnad kuivad (rohelised) või niisked (sinised). Libedust ei tekkinud [13]

### 3.5 Analüüs

Algseadistatud soola puistenormidega ei ole katsete põhjal Thermologic automaatne süsteem kuigi optimaalne. Auto nr 1 näitas soola puistamis koguseid kõige ligilähedasemalt valvemeistri valitud kogustele, kuid seegi erines kohati ühe kuni kahe grammi võrra. Teised masinad olid kõik soola puistamis koguste puhul kolm kuni neli grammi suuremad. Optimaalse libedusetõrje üheks näitajaks võiks olla soola puistamise tagajärjel libeduse vaba niiske tee. Selliste soola kogustega, nagu auto nr 2, 3 ja 4 puistasid, oleks teed olnud liigselt märjad, mis oleks liikluse ja tuule tagajärjel kandunud keskkonda.

Uute soola kulunormide sisestamine andis tulemusi koheselt. Autodel temperatuuri andureid testides näitas see palju lubavamaid soolakoguseid, kui seda tegid algseadistatud soola kulunormid. Kõige suurem erinevus on sees „märjas“ seadistuses. Kõige väiksem erinevus teepinna oleku seades „niiske“ (Joonis 23).



Joonis 23. Verston OÜ soola kulunormide graafik võrdluses Thermologic algseadistatud kulunormidega niisutatud soolal 70/30. Uued soolanormid kujutatud punktiirjoonena

Ühe grammine mööda panek soola puiste koguse valikul toob läbitud marsruudi lõpuks märgatava ülekulu. Näiteks, kui puistatakse Rakvere-Haljala maanteed, mille pikkus on 8,3 km ja soola puistamise laius on 5 m siis on puiste kuluks on 5 g/m<sup>2</sup>, tuleb kogu kuluks 207,5 kg. Arvutus järgnevalt.

$$(8300 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ g/m}^2) / 1000 = 207,5 \text{ kg}$$

Kui aga soola kulunormiks valida valida 6 g/m<sup>2</sup>, tuleb kogukuluks 249 kg. Arvutus järgnevalt.

$$(8300 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 6 \text{ g/m}^2) / 1000 = 249 \text{ kg}$$

Ühe grammise erinevuse 8,3 km peale toob lisakuluks arvutuse põhjal 41,5 kg. Lääne-Virumaa hooldepiirkonnas 2023/2024 talve hooajal kulus soola 2211 tonni, mis on väga suur kogus. Thermologicu automaatset seadet kasutati tase 3+ teedel ja tase 3 teedel ja nende kogupikkuseks on 300 km. Samadel tingimustel puistates on kulu 7500 kg. Arvutus järgnevalt

$$(300000 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ g/m}^2) / 1000 = 7500 \text{ kg}$$

Ühe grammi võrra üledimensioneerides tuleb kulu mõlema taseme teedele kokku 9000 kg. Arvutus järgnevalt.

$$(300000 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 6 \text{ g/m}^2) / 1000 = 9000 \text{ kg}$$

Selle arvutuse tulemusena teeb see juba 1500 kg erinevust ühe libedusetõrje ringi peale. Muidugi oleneb see ka palju ilmastiku tingimustest ja milliseks talve hooaeg kujuneb aga soolanormide graafikuid võrreldes on tehase seadistustes ilmselge vahe sees. Kui teste oleks jätkatud tehase poolse seadistusega, oleks hooaja kulu olnud mitme saja tonni võrra suurem. Soola kulude kasvades valedes puistamis normide kasutamisega katse eesmäärke täita võimalik ei ole.

Katseid sai teostatud hooajal oodatust vähem. Põhi probleemiks sai andmete muutmine, mida sai teostada ainult edasimüüja. Andmed said sisestatud veebruarikuuks ja peale seda ei tekkinud enam piisavalt sobivaid ilmasid, mille tõttu ka katsete arv väikseks jäi. Katsetada sai ainult "niiske" ja "kuiv" seadistus Thermologicu automaat süsteemis. Katsetamata jäi "märg" ja "lumi" teepinna oleku seaded. Katsetamata jäi ka Thermologic temperatuuri nihe.

Katsete tulemusena libedusetõrjet teostades ei tekkinud kuskil teepinnal libedust, kuid välja ei tulnud ka see, kas tee temperatuuri muutudes soola puistamiskoguse tõus libedusetõrjele kaasa aitab. Lisaks soola kulunormide optimeerimisele peaks tee temperatuuri põhine automaatne süsteem ära hoidma üksikute libedate kohtade tekked. See väldiks soolapuisturite mitmeid ringe tegemast ning aitaks kokku hoida kütuse ja soola kuludega.

Murekohana võiks välja tuua esimesena liiga suurte soola kulunormidega tehase seaded. Järgmisena Thermologic infrapuna temperatuurianduri asukoht. Temperatuuriandur asub soolapuisturi tagaosas. Teetemperatuuri langedes võtab puisturil aega soolakoguse muutmisega, ning selle tõttu võib tekkida libedaid kohti. Võiks kaaluda anduri liigutamist soolapuisturit vedava veoki nina juurde. Temperatuuri andurite puhul on murekohaks ka nende vastupidavus. Paaril autol tuli ilmsiks, et andur oli läbi läinud ilma igasuguse märguandeta. Selle tulemusena ei ole tee temperatuuri andmed enam õiged ning võivad

erineda kuni kuue kraadi võrra. Veel võiks välja tuua, et Thermologicu automaatne libedusetõrje süsteem ei registreeri ise teepinna olukorda.

Katse autor arvab, et automaatse libedusetõrje süsteemi katsetamist tuleks kindlasti jätkata ja edasi arendada. Üle jäänud Verston OÜ teehoolde piirkonnad peaksid enne uue talihooaja algust kõikides Thermologic seadmega varustatud puisturites ära muutma soolanormide andmed ja kasutusele võtma samad soolakogused, millega katsetati automaatset libedusetõrje süsteemi Lääne-Virumaal. Libedusetõrje automaat süsteemide arendamisel võiks arvestada välja toodud murekohtadega. Temperatuuri anduri paigaldamiseks libedusetõrje masinale võiks leida paremaid asukohtasid. Teepinna automaatset registreerimist saaks edasi arendada optilise haardeteguri seadme näitel, mis on võimeline teepinna seisuga registreerima.

## KOKKUVÕTE

Talihooaeg Eestis toob kaasa väljakutseid teede libedusetõrjega, kuna madalad temperatuurid ja niisked ilmastikutingimused soodustavad jää ja lume teket. Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli automaatse libedusetõrje süsteemi katsetamine ja analüüs ning selle tulemusena parandada libedusetõrje kvaliteeti soola optimaalsete koguste puistamisega, vähendada keskkonna mõju ja aidata kaasa ettevõtete jätkusuutlikkusele.

Üleliigne sool võib vihmaveega või lume sulamisega leostuda pinnasesse ja jõuda veekogudesse, sealhulgas jõgedesse, järvedesse ja põhjaveekihtidesse. See võib suurendada vee soolsust, kahjustades veekvaliteeti ja ohustades vee-elustikku ning veekogude ökosüsteeme. Sool võib kiirendada metallist ja betoonist infrastruktuuride, nagu sillad, teepiirded ja teekatted, korrosiooni. See suurendab hoolduskulusid ja vähendab infrastruktuuri eluea pikkust.

Libeduse tekke põhjuste tundmine ja libedusetõrje optimaalsete meetodite kasutamine aitab liigse soola teele tekkimist ning vähendab keskkonnale tekkivat mõju. Vajalikud soolakogused valitakse kas kogemuslikult või lõputöös käsitletud meetodite abil. Automaatsete libedusetõrje süsteemide kasutamine pakub võimalust teepinna temperatuuri ja seisukorra pidevaks jälgimiseks ning vastavalt saadud andmetele soola puistenormide efektiivsemaks juhtimiseks. Need süsteemid aitavad vähendada inimese sekkumise vajadust ja optimeerida soolakulu, samas tõstes liiklusohutust.

Töö käigus testiti Thermologic automaatsüsteemi, mille tulemusel leiti mitmeid parenduskohti, nagu andurite asukohta ja tehase poolt sisestatud normide. Katse tulemused ei olnud autori jaoks rahuldavad ning tulevasel hooajal jätkub automaatse libedusetõrje süsteemide katsed. Lõputöö autor kasutas oma kogumust Verston OÜ talihooldes valvemeistrina töötades ja kõrgkoolist omandatud teadmisi lõputöö koostamisel.

# SUMMARY

## *Analysis of Anti-Icing Systems*

The winter season in Estonia brings challenges with the deicing of roads, as low temperatures and humid weather conditions speed up the formation of ice and snow. The aim of this thesis has been the testing and analysis of an automatic road deicing system and, as a result, the improvement of the quality of deicing measures by sprinkling optimal amounts of salt, reduction of the impact on the environment and the contribution of to the sustainability of companies.

The thesis consists of three parts. In the first part, the has written about the Estonian road network, the requirements to the road condition and cycle times of road maintenance that apply to Estonian national roads. The author has also described the coefficient of adhesion and why it is necessary and what equipment is used to measure the coefficient of adhesion in Estonia. In addition, the author has provided an overview of who carries out supervision on Estonian national roads and what are the tasks. It also describes the materials that are used for deicing and their strengths and weaknesses.

The second part of the thesis gives an overview of the development of slippery conditions in Estonia. The author also describes the causes of slippery conditions in winter and how they can be predicted by observing road weather forecasts. The author describes about different deicing methods and how to find the amount of salt needed for this. At the end of the second part of the thesis, the effects of deicing on the environment, the impact of salt on vegetation and how it can affect the climate are described.

The final part of the thesis describes a test with an automatic deicing system. The automatic device's salt quantity options were compared with the selection by the road maintenance operator. In the test Schmidt Stratos sprinklers and a Thermologic temperature-based device were used. Four machines took part in the test which were conducted in Lääne-Viru County . The performance of the tests was checked by carrying out patrols with the optical adhesion coefficient device and keeping exact diary about the work done . Initial tests showed that the automatic device sprinkles few grams per square metre more than the road maintenance operator would have done. Changing the NaCl norms on the automatic device made the implementation of more effective deicing promising, but it took too long and when it was completed weather conditions were not suitable for the test anymore. Although collected data were insufficient to give a direct result, testing of the Thermologic deicing system should be continued.

## VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „Eesti kliima - Eesti Entsüklopeedia“. Vaadatud: 7. juuni 2024. [Online]. Available at: [http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti\\_kliima](http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti_kliima)
- [2] „Eesti teedevõrk | Transpordiamet“. Vaadatud: 7. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.transpordiamet.ee/eesti-teedevork>
- [3] „Tee seisundinõuded–Riigi Teataja“. Vaadatud: 8. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/115072015013>
- [4] „Talvine teehoole | Transpordiamet“. Vaadatud: 8. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.transpordiamet.ee/talvine-teehoole>
- [5] „MKM\_m92\_lisa9.pdf“. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: [https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1150/7201/5013/MKM\\_m92\\_lisa9.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/1150/7201/5013/MKM_m92_lisa9.pdf#)
- [6] T. Metsvahi ja K. Rosin, „KOHALIKE TEEDE TEESEISUNDI NÕUETE TÄITMINE JA JÄRELEVALVE“.
- [7] „Teehoole | Transpordiamet“. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.transpordiamet.ee/teehoole>
- [8] „Millal on tee libe? | Transpordiamet“. Vaadatud: 8. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.transpordiamet.ee/uudised/millal-tee-libe>
- [9] „aruanne\_haardetegur (1).pdf“. Vaadatud: 8. juuni 2024. [Online]. Available at: [https://transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2021-11/aruanne\\_haardetegur%20%281%29.pdf](https://transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2021-11/aruanne_haardetegur%20%281%29.pdf)
- [10] „1\_TeconerRCM411.pdf“. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: [https://www.teconer.fi/wp-content/uploads/1\\_TeconerRCM411.pdf](https://www.teconer.fi/wp-content/uploads/1_TeconerRCM411.pdf)
- [11] „Road-Condition-Monitor-RCM511-data-sheet\_en.pdf“. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: [https://www.teconer.fi/wp-content/uploads/Road-Condition-Monitor-RCM511-data-sheet\\_en.pdf](https://www.teconer.fi/wp-content/uploads/Road-Condition-Monitor-RCM511-data-sheet_en.pdf)
- [12] „korrashoiu\_jarelevalve\_juhend\_riigiteedel.pdf“. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: [https://www.transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2021-10/korrashoiu\\_jarelevalve\\_juhend\\_riigiteedel.pdf](https://www.transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2021-10/korrashoiu_jarelevalve_juhend_riigiteedel.pdf)
- [13] „MTSS“. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://mtss.teeilm.ee/>
- [14] M. Melts, „ENNETAV LIBEDUSETÕRJE RIIGITEEDEL“, Tallinna Tehnikakõrgkool, Tallinn, 2023.
- [15] K. O. E, „kloriidide\_katsetamine\_lopparuanne.pdf“. Vaadatud: 21. aprill 2024. [Online]. Available at: [https://transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2021-11/kloriidide\\_katsetamine\\_lopparuanne.pdf](https://transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2021-11/kloriidide_katsetamine_lopparuanne.pdf)
- [16] S. Sillamäe, „Ekspertarvamus riigitee nr /.../ nõutava haardeteguri tagamise võimalikkuse kohta“, 2023.
- [17] R. Kuusela, „Talvihoitoa 2018“. 2018.

- [18] „TIK”. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://tik.teeilm.ee/>
- [19] teeilm, „Salakaval libedus teepeal – TEEILMAKESKUS”. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://teeilmakeskus.eu/libedus/salakaval-libedus-teepeal/>
- [20] „Road Icing: The Weather Culprits :: Icy Road Safety”. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://icyroadsafety.com/weather.shtml>
- [21] „Teeilmajaamad ja -kaamerad | Transpordiamet”. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.transpordiamet.ee/teeilmajaamad-ja-kaamerad>
- [22] „» TIK road weather information system”. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://teed.ee/teenused/teedeinfokeskus/tik/infosusteem/>
- [23] ERR, „Maanteeamet tunnistab, et ennetav libedusetõrje on alles muutumas reaalsuseks”, ERR. Vaadatud: 9. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.err.ee/554078/maanteeamet-tunnistab-et-ennetav-libedusetorje-on-alles-muutumas-reaalsuseks>
- [24] A. Klein-Paste ja R. Dalen, „The Fundamentals of Plowing, Anti-icing, De-icing and Sanding”, Sustainable Winter Road Operations, 2018, lk 82–100. [Online]. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119185161.ch6>
- [25] B. Jelisejevs ja V. Urbanovichs, „Environmental aspects of road de-icing technologies”.
- [26] „Epoke A/S - EPOTHERM”. Vaadatud: 10. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://epoke.dk/home/products/technology/epotherm/>
- [27] „Service products | ThermoLogic | Temperature-dependent dosing”, Aebi Schmidt. Vaadatud: 10. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.aebi-schmidt.com/en/products/aebi-schmidt/service-products/thermologic/>
- [28] „EpoTherm\_GB”. Vaadatud: 10. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://brochure.epoke.dk/epotherm/epothermgb/?page=2>
- [29] „Spreaders | Stratos 4.0 - 12.0 m3 | Schmidt”, Aebi Schmidt. Vaadatud: 10. juuni 2024. [Online]. Available at: <https://www.aebi-schmidt.com/en/products/schmidt/spreaders/stratos-4-0-12-0/>