



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

KELIŲ KATEDRA

Adrianas Konovalovas

**NATRIO CHLORIDO IR ALTERNATYVIŲ SLIDUMĄ MAŽINANČIŲ
MEDŽIAGŲ, NAUDOJAMŲ KELIŲ PRIEŽIŪRAI, EFEKTYVUMO
VERTINIMAS**

**EVALUATING OF THE EFFECTIVENESS OF ALTERNATIVE ANTI-SKID
MATERIALS AND SODIUM CHLORIDE FOR ROAD MAINTENANCE**

Baigiamasis magistro darbas

Kelių inžinerijos ir valdymo studijų programa, valstybinis kodas 6211EX039

Kelių inžinerijos specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Adrianas Konovalovas

NATRIO CHLORIDO IR ALTERNATYVIŲ SLIDUMĄ MAŽINANČIŲ
MEDŽIAGŲ, NAUDOJAMŲ KELIŲ PRIEŽIŪRAI, EFEKTYVUMO
VERTINIMAS

EVALUATING OF THE EFFECTIVENESS OF ALTERNATIVE ANTI-SKID
MATERIALS AND SODIUM CHLORIDE FOR ROAD MAINTENANCE

Baigiamasis magistro darbas

Kelių inžinerijos ir valdymo studijų programa, valstybinis kodas 6211EX039

Kelių inžinerijos specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovė

doc. dr. Laura Žalimienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

doc. dr. Lina Juknevičiūtė-Žilinskienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas Vitalija Karaciejūtė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
KELIŲ KATEDRA

Studijų kryptis: Statybos inžinerija

Studijų programa: Kelių inžinerija ir valdymas, valstybinis kodas 6211EX039

Specializacija: Kelių inžinerija ir valdymas

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Viktoras Vorobjovas

2024-05-28

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. Kfm-22-8402

Vilnius

Studentas (-ė): Adrianas Konovalovas

Baigiamojo darbo tema: Natrio chlorido ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų, naudojamų kelių priežiūrai, efektyvumo vertinimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Aiškinamasis raštas:

Tikslas - laboratorinėmis sąlygomis nustatyti NaCl ir alternatyvių slidumą mažinančių cheminių medžiagų ledo tirpymo efektyvumą, gautus duomenis ir palyginti tarpusavyje.

Uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros, susijusios su tradicinių ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų panaudojimu, analizę.
2. Atlikti slidumą mažinančių medžiagų barstymo kiekių rekomendacijų skirtingomis sąlygomis analizę.
3. Atlikti kelių priežiūrai žiemą naudojamų slidumą mažinančių cheminių medžiagų efektyvumo eksperimentinius tyrimus.
4. Laboratorinėmis sąlygomis ištirti 10 slidumą mažinančių medžiagų (birių ir tirpalų).
5. Apibendrinti gautų tyrimų rezultatus, pateikti išvadas ir siūlymus.

Vadovas docentas Laura Žalimienė

<table><tr><td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td></tr><tr><td>Aplinkos inžinerijos fakultetas</td></tr><tr><td>Kelių katedra</td></tr></table>	Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Aplinkos inžinerijos fakultetas	Kelių katedra	<table><tr><td>ISBN</td><td>ISSN</td></tr><tr><td>Egz. sk.</td><td></td></tr><tr><td>Data-.....-.....</td><td></td></tr></table>	ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas										
Aplinkos inžinerijos fakultetas										
Kelių katedra										
ISBN	ISSN									
Egz. sk.										
Data-.....-.....										
<table><tr><td colspan="2">Antrosios pakopos studijų Kelių inžinerijos ir valdymo programos magistro baigiamasis darbas</td></tr><tr><td>Pavadinimas</td><td>Natrio chlorido ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų, naudojamų kelių priežiūrai, efektyvumo vertinimas</td></tr><tr><td>Autorius</td><td>Adrianas Konovalovas</td></tr><tr><td>Vadovas</td><td>Laura Žalimienė</td></tr></table>		Antrosios pakopos studijų Kelių inžinerijos ir valdymo programos magistro baigiamasis darbas		Pavadinimas	Natrio chlorido ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų, naudojamų kelių priežiūrai, efektyvumo vertinimas	Autorius	Adrianas Konovalovas	Vadovas	Laura Žalimienė	
Antrosios pakopos studijų Kelių inžinerijos ir valdymo programos magistro baigiamasis darbas										
Pavadinimas	Natrio chlorido ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų, naudojamų kelių priežiūrai, efektyvumo vertinimas									
Autorius	Adrianas Konovalovas									
Vadovas	Laura Žalimienė									
<table><tr><td></td><td>Kalba: lietuvių</td></tr></table>			Kalba: lietuvių							
	Kalba: lietuvių									
<table><tr><td>Anotacija</td></tr><tr><td> Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas tradicinių ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų keliuose efektyvumas, įvertinamas medžiagų naudingumas, privalumai ir trūkumai, panaudojimo galimybės Lietuvos keliuose. Šio tyrimo poreikis kilo dėl cheminių medžiagų neigiamo poveikio aplinkai ir kitiems aspektams, nes ilgą laiką kelių priežiūrai naudojamos tos pačios medžiagos ir nėra plačiai arba visiškai nenaudojamos alternatyvos, turinčios mažesnią įtaką aplinkai. Tyrimo metu buvo ištirta 10 slidumą mažinančių medžiagų, jų vertinimui pasinaudojant ledo tirpdymo ir įsiskverbimo į ledą metodikomis. Taip pat buvo įvertinti Lietuvos bei užsienio šalių kelių priežiūros žiemą patirtis, medžiagų barstymo kiekiai ant kelio dangos, kitų tyrėjų daryti tyrimai, atlikti jų rezultatų analizė bei palyginimas. Išnagrinėjus teorinius ir praktinius slidumą mažinančių cheminių medžiagų vertinimo aspektus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir siūlymai. Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, slidumą mažinančių medžiagų keliuose analizė, kelių priežiūros žiemą cheminių medžiagų efektyvumo nustatymo eksperimentinis tyrimas, slidumą mažinančių medžiagų efektyvumo nustatymo rezultatų analizė, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 92 p. teksto be priedų, 35 iliustr., 32 lent., 46 bibliografiniai šaltiniai. </td></tr></table>		Anotacija	Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas tradicinių ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų keliuose efektyvumas, įvertinamas medžiagų naudingumas, privalumai ir trūkumai, panaudojimo galimybės Lietuvos keliuose. Šio tyrimo poreikis kilo dėl cheminių medžiagų neigiamo poveikio aplinkai ir kitiems aspektams, nes ilgą laiką kelių priežiūrai naudojamos tos pačios medžiagos ir nėra plačiai arba visiškai nenaudojamos alternatyvos, turinčios mažesnią įtaką aplinkai. Tyrimo metu buvo ištirta 10 slidumą mažinančių medžiagų, jų vertinimui pasinaudojant ledo tirpdymo ir įsiskverbimo į ledą metodikomis. Taip pat buvo įvertinti Lietuvos bei užsienio šalių kelių priežiūros žiemą patirtis, medžiagų barstymo kiekiai ant kelio dangos, kitų tyrėjų daryti tyrimai, atlikti jų rezultatų analizė bei palyginimas. Išnagrinėjus teorinius ir praktinius slidumą mažinančių cheminių medžiagų vertinimo aspektus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir siūlymai. Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, slidumą mažinančių medžiagų keliuose analizė, kelių priežiūros žiemą cheminių medžiagų efektyvumo nustatymo eksperimentinis tyrimas, slidumą mažinančių medžiagų efektyvumo nustatymo rezultatų analizė, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 92 p. teksto be priedų, 35 iliustr., 32 lent., 46 bibliografiniai šaltiniai.							
Anotacija										
Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas tradicinių ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų keliuose efektyvumas, įvertinamas medžiagų naudingumas, privalumai ir trūkumai, panaudojimo galimybės Lietuvos keliuose. Šio tyrimo poreikis kilo dėl cheminių medžiagų neigiamo poveikio aplinkai ir kitiems aspektams, nes ilgą laiką kelių priežiūrai naudojamos tos pačios medžiagos ir nėra plačiai arba visiškai nenaudojamos alternatyvos, turinčios mažesnią įtaką aplinkai. Tyrimo metu buvo ištirta 10 slidumą mažinančių medžiagų, jų vertinimui pasinaudojant ledo tirpdymo ir įsiskverbimo į ledą metodikomis. Taip pat buvo įvertinti Lietuvos bei užsienio šalių kelių priežiūros žiemą patirtis, medžiagų barstymo kiekiai ant kelio dangos, kitų tyrėjų daryti tyrimai, atlikti jų rezultatų analizė bei palyginimas. Išnagrinėjus teorinius ir praktinius slidumą mažinančių cheminių medžiagų vertinimo aspektus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir siūlymai. Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, slidumą mažinančių medžiagų keliuose analizė, kelių priežiūros žiemą cheminių medžiagų efektyvumo nustatymo eksperimentinis tyrimas, slidumą mažinančių medžiagų efektyvumo nustatymo rezultatų analizė, išvados, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 92 p. teksto be priedų, 35 iliustr., 32 lent., 46 bibliografiniai šaltiniai.										
<table><tr><td>Prasminiai žodžiai: tradicinės ir alternatyvios slidumą mažinančios medžiagos, natrio chloridas, kelių priežiūra žiemą, ledo tirpdymas, įsiskverbimas į ledą, ledą šalinančių medžiagų barstymo kiekiai, ledas ant kelio dangos, juodasis ledas.</td></tr></table>		Prasminiai žodžiai: tradicinės ir alternatyvios slidumą mažinančios medžiagos, natrio chloridas, kelių priežiūra žiemą, ledo tirpdymas, įsiskverbimas į ledą, ledą šalinančių medžiagų barstymo kiekiai, ledas ant kelio dangos, juodasis ledas.								
Prasminiai žodžiai: tradicinės ir alternatyvios slidumą mažinančios medžiagos, natrio chloridas, kelių priežiūra žiemą, ledo tirpdymas, įsiskverbimas į ledą, ledą šalinančių medžiagų barstymo kiekiai, ledas ant kelio dangos, juodasis ledas.										

<table border="1"> <tr><td>Vilnius Gediminas Technical University</td></tr> <tr><td>Faculty of Environmental Engineering</td></tr> <tr><td>Department of Roads</td></tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Environmental Engineering	Department of Roads	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....								
Vilnius Gediminas Technical University																			
Faculty of Environmental Engineering																			
Department of Roads																			
ISBN	ISSN																		
Copies No.																			
Date-.....-.....																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Master Degree Studies Road Engineering and Management study programme Master Thesis</td> </tr> <tr> <td>Title</td> <td colspan="3">Evaluation of the Effectiveness of Alternative Anti-skid Materials and Sodium Chloride for Road Maintenance</td> </tr> <tr> <td>Author</td> <td colspan="3">Adrianas Konovalovas</td> </tr> <tr> <td>Academic supervisor</td> <td colspan="3">Laura Žalimienė</td> </tr> </table>				Master Degree Studies Road Engineering and Management study programme Master Thesis				Title	Evaluation of the Effectiveness of Alternative Anti-skid Materials and Sodium Chloride for Road Maintenance			Author	Adrianas Konovalovas			Academic supervisor	Laura Žalimienė		
Master Degree Studies Road Engineering and Management study programme Master Thesis																			
Title	Evaluation of the Effectiveness of Alternative Anti-skid Materials and Sodium Chloride for Road Maintenance																		
Author	Adrianas Konovalovas																		
Academic supervisor	Laura Žalimienė																		
			<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Thesis language: Lithuanian</td> </tr> </table>		Thesis language: Lithuanian														
	Thesis language: Lithuanian																		
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Annotation</td> </tr> <tr> <td colspan="4"> The final master's thesis examines the effectiveness of traditional and alternative anti-skid materials on roads, evaluates the usefulness, advantages and disadvantages of the materials, and the possibilities of their use on Lithuanian roads. The need for this research arose due to the negative impact of chemicals on the environment and other aspects, as the same materials have been used for long periods of time in road maintenance and alternatives with lower environmental impact are not widely or completely used. During the research, 10 anti-skid materials were investigated, using ice melting and ice penetration methods for their evaluation. Also, the experience of road maintenance in Lithuania and foreign countries in winter, the application rates of material spread on the road surface and the research done by other researchers were evaluated, and their results were analyzed and compared. After examining the theoretical and practical aspects of the evaluation of anti-skid materials, the conclusions and suggestions of the thesis are presented. The work consists of 6 parts: introduction, analysis of anti-skid materials on roads, experimental research of determining the effectiveness of deicing chemicals using for road maintenance in winter, analysis of the results of determining the effectiveness of anti-skid materials, conclusions, bibliographical entries. Thesis consists of: 92 p. text without attachments, 35 pictures, 32 tables, 46 bibliographical entries. </td> </tr> </table>				Annotation				The final master's thesis examines the effectiveness of traditional and alternative anti-skid materials on roads, evaluates the usefulness, advantages and disadvantages of the materials, and the possibilities of their use on Lithuanian roads. The need for this research arose due to the negative impact of chemicals on the environment and other aspects, as the same materials have been used for long periods of time in road maintenance and alternatives with lower environmental impact are not widely or completely used. During the research, 10 anti-skid materials were investigated, using ice melting and ice penetration methods for their evaluation. Also, the experience of road maintenance in Lithuania and foreign countries in winter, the application rates of material spread on the road surface and the research done by other researchers were evaluated, and their results were analyzed and compared. After examining the theoretical and practical aspects of the evaluation of anti-skid materials, the conclusions and suggestions of the thesis are presented. The work consists of 6 parts: introduction, analysis of anti-skid materials on roads, experimental research of determining the effectiveness of deicing chemicals using for road maintenance in winter, analysis of the results of determining the effectiveness of anti-skid materials, conclusions, bibliographical entries. Thesis consists of: 92 p. text without attachments, 35 pictures, 32 tables, 46 bibliographical entries.											
Annotation																			
The final master's thesis examines the effectiveness of traditional and alternative anti-skid materials on roads, evaluates the usefulness, advantages and disadvantages of the materials, and the possibilities of their use on Lithuanian roads. The need for this research arose due to the negative impact of chemicals on the environment and other aspects, as the same materials have been used for long periods of time in road maintenance and alternatives with lower environmental impact are not widely or completely used. During the research, 10 anti-skid materials were investigated, using ice melting and ice penetration methods for their evaluation. Also, the experience of road maintenance in Lithuania and foreign countries in winter, the application rates of material spread on the road surface and the research done by other researchers were evaluated, and their results were analyzed and compared. After examining the theoretical and practical aspects of the evaluation of anti-skid materials, the conclusions and suggestions of the thesis are presented. The work consists of 6 parts: introduction, analysis of anti-skid materials on roads, experimental research of determining the effectiveness of deicing chemicals using for road maintenance in winter, analysis of the results of determining the effectiveness of anti-skid materials, conclusions, bibliographical entries. Thesis consists of: 92 p. text without attachments, 35 pictures, 32 tables, 46 bibliographical entries.																			
<table border="1"> <tr> <td colspan="4">Keywords: traditional and alternative anti-skid materials, sodium chloride, winter road maintenance, ice melting, ice penetration, de-icers application rates, ice on road surfaces, black ice.</td> </tr> </table>				Keywords: traditional and alternative anti-skid materials, sodium chloride, winter road maintenance, ice melting, ice penetration, de-icers application rates, ice on road surfaces, black ice.															
Keywords: traditional and alternative anti-skid materials, sodium chloride, winter road maintenance, ice melting, ice penetration, de-icers application rates, ice on road surfaces, black ice.																			

TURINYS

ĮVADAS	11
1. SLIDUMĄ MAŽINANČIŲ MEDŽIAGŲ KELIUOSE ANALIZĖ	13
1.1. Tradicinės slidumą mažinančios medžiagos ir jų savybės	13
1.2. Alternatyvios slidumą mažinančios medžiagos ir jų savybės	21
1.3. Slidumą mažinančių medžiagų barstymo kiekių rekomendacijos skirtingomis sąlygomis	25
1.4. Skyriaus išvados	42
2. KELIŲ PRIEŽIŪROS ŽIEMĄ CHEMINIŲ MEDŽIAGŲ EFEKTYVUMO NUSTATYMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	44
2.1. Tyrimo objektas	44
2.2. Tyrimo metodai. Laboratoriniai bandymai: ištirpdyto ledo kiekis ir įsiskverbimas į ledą	54
2.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai ir jų analizė	59
2.4. Skyriaus išvados	65
3. SLIDUMĄ MAŽINANČIŲ MEDŽIAGŲ EFEKTYVUMO NUSTATYMO REZULTATŲ ANALIZĖ	69
3.1. Eksperimentinių tyrimų metu gautų rezultatų interpretacija, lyginant su kitų mokslininkų atliktų tyrimų išvadomis	69
3.2. Kelių priežiūros žiemą medžiagų reikalavimų atnaujinimo pasiūlymai	82
3.3. Skyriaus išvados	83
BENDROSIOS IŠVADOS	86
SIŪLYMAI	88
LITERATŪROS SĄRAŠAS	89

SANTRUMPOS

angl. – angliškai / anglų kalba.

CaCl_2 – calico chloridas.

CHKO_2 – kalio formiatas.

$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – natrio formiatas.

CMA, $\text{CaMg}_2(\text{CH}_3\text{COO})_6$ – kalcio magnio acetatas.

ES – Europos Sąjunga.

ĮG – įsiskverbimo gylis.

JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos.

KCl – kalio chloridas.

lenk. – lenkiškai / lenkų kalba.

LTE – ledo tirpimo efektyvumas.

MgCl_2 – magnio chloridas.

$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – bišofitas.

NaCl – natrio chloridas.

SMM – slidumą mažinančios medžiagos.

SMMt – slidumą mažinančių medžiagų tirpalas.

vok. – vokiškai / vokiečių kalba.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. NaCl granulimetrinės sudėties reikalavimai (Čygas ir kt., 2016).....	15
1.2 lentelė. Naudojamos cheminės SMM Austrijos keliuose (Arbeitspapier Nr. 11., 2012) ...	19
1.3 lentelė. Minesotos kelių priežiūrai žiemą rekomendacijos („Winter Sanding...“, 2012) ...	28
1.4 lentelė. Toronto ir Vaughano kelių priežiūrai žiemą rekomendacijos („Winter Sanding...“, 2012).....	28
1.5 lentelė. Ledo šalinimui reikalingi NaCl kiekiai esant skirtingoms oro sąlygoms, kai kelio plotis 7 metrai, pagal Švedijos normatyvinius dokumentus („Winter maintenance ...“, 2002)	29
1.6 lentelė. Prevenciniam apibarstymui ir plonų ledo ir sniego sluoksnių pašalinimui skirtų SMM kiekiai Lenkijos keliuose (Bieńka ir kt., 2006)	31
1.7 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai šarmai (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).....	32
1.8 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai plikledžiui, užšalant drėgmei (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).....	33
1.9 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai plikledžiui, užšalant vandeniui (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).....	34
1.10 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai lijudarai (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).....	34
1.11 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai supluktam sniegui (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).....	35
1.12 lentelė. NaCl, CaCl ₂ ir jų mišinio paskleidimo normos 1 m ² mažinant kelio dangos slidumą (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015)	36
1.13 lentelė. NaCl druskos naudojimas barstymui, mažinant slidumus (DMMS-KP 06, 2006)	37
1.14 lentelė. CaCl ₂ druskos naudojimas barstymui, mažinant slidumus (DMMS-KP 06, 2006)	37
1.15 lentelė. CMA naudojimo kiekiai JAV ir Kanados teritorijoje (Chang et al., 1994).....	41
2.1 lentelė. Tiriamos slidumą mažinančios medžiagos	45
2.2 lentelė. SMM tirpalų gamyba	49
2.3 lentelė. SMMt temperatūros kitimas gaminant laboratorijoje	53
2.4 lentelė. Kietosios būsenos NaCl ledo tirpdyimo efektyvumo nustatymo žiniaraštis.....	56
2.5 lentelė. NaCl tirpalo ledo tirpdyimo efektyvumo nustatymo žiniaraštis	57
2.6 lentelė. Ledo tirpdyimo efektyvumo SMM ir SMMt rezultatai	60
2.7 lentelė. SMM įsiskverbimo į 7,5 mm storio ledą rezultatai (pateikti gylio vidurkiai), kai temperatūra –3, –6 ir –10 °C.....	62
2.8 lentelė. SMM svorinių koeficientų ir rangų nustatymas	65
3.1 lentelė. Palyginimas ledo tirpdyimo kietosios būsenos NaCl ir CaCl ₂ , 26,3 % NaCl ir 37,3 % CaCl ₂ tirpalų, etilenglikolio bandymo laboratorinių rezultatų su SHRP H-205.1 (1992) ir SHRP H-205.2 (1992) standartų rezultatais.....	70
3.2 lentelė. Palyginimas įsiskverbimo į ledą kietosios būsenos NaCl ir CaCl ₂ druskų bandymo rezultatų, gautų laboratorijoje, su SHRP H-205.3 (1992) standarto rezultatais	71
3.3 lentelė. Palyginimas ledo tirpdyimo kietosios būsenos NaCl, CaCl ₂ ir MgCl ₂ bei 23 % NaCl tirpalo druskų bandymo laboratorijoje gautų rezultatų su Shi ir Akino (2010) rezultatais	72
3.4 lentelė. Palyginimas įsiskverbimo į ledą kietosios būsenos NaCl, CaCl ₂ ir MgCl ₂ druskų bandymo laboratorijoje gautų rezultatų su Shi ir Akino (2010) rezultatais	73
3.5 lentelė. Palyginimas ledo tirpdyimo kietosios būsenos NaCl, CaCl ₂ , MgCl ₂ , NANF ir NCMC druskų bandymo laboratorijoje gautų rezultatų su Ratkevičius (2016) rezultatais.....	75
3.6 lentelė. Vaitkus ir kt. (2021) sausų SMM rezultatų papildymas su laboratorijoje gautais rezultatais.....	79

3.7 lentelė. Palyginimas Vaitkaus ir kt. (2021) SMMt rezultatų su laboratorijoje gautais rezultatais.....	80
3.8 lentelė. SMM prasiskverbimo 4,5 mm ir 7,5 mm storio ledu vizualinio tyrimo rezultatai, kai temperatūra yra –6 °C (Vaitkus ir kt., 2021)	81
3.9 lentelė. SMM kainos pagal 2024 m.balandžio mėn.....	82

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Natrio chloridas (NaCl)	15
1.2 pav. Kalcio chloridas (CaCl_2).....	17
1.3 pav. Magnio chloridas (MgCl_2).....	18
1.4 pav. Kalcio magnio acetatas (CMA)	22
1.5 pav. Kalio acetatas (CH_3COOK) („Potassium Acetate...“, 2024)	22
1.6 pav. Natrio acetatas (CH_3COONa).....	23
1.7 pav. Įmonės AB „Kelių priežiūra“ interaktyvus Lietuvos žemėlapis su valstybinės reikšmės kelių priežiūros skirstymu į V priežiūros lygius („Kelių priežiūra“ https://keliuprieziura.maps.arcgis.com).....	26
2.1 pav. „MCX-RTU Rooftop“ šaldymo kamera.....	44
2.2 pav. „MCX-RTU Rooftop“ šaldymo kameros valdymo pultas.....	44
2.3 pav. Tiriamos slidumą mažinančios medžiagos	45
2.4 pav. Sietai su 0,5 ir 2 mm akučiais.....	47
2.5 pav. Skaitmeninis lazerinis termometras su rankena.....	47
2.6 pav. Skaitmeninis slankmatis	47
2.7 pav. Skaitmeninės svarstyklės „KERN PNS“	48
2.8 pav. NaCl tirpalas	50
2.9 pav. „Bionord Universal“ (mėlynas) tirpalas	50
2.10 pav. „Bionord Step“ (oranžinis) tirpalas	51
2.11 pav. „Nordway KF“ (skystas) tirpalas	51
2.12 pav. „Nordway KN“ (granulės) tirpalas	51
2.13 pav. Natrio acetato tirpalas	52
2.14 pav. CMA tirpalas	52
2.15 pav. CaCl_2 tirpalas	52
2.16 pav. „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ tirpalas.....	53
2.17 pav. MgCl_2 tirpalas	53
2.18 pav. Kietosios būsenos CaCl_2 ledo tirpdymo bandymas esant $-3\text{ }^\circ\text{C}$ (a) – ką tik paskleidus, b) – 5 min po paskleidimo, c) – po sausinimo)	57
2.19 pav. „Nordway KF“ tirpalo ledo tirpdymo efektyvumo bandymas prie $-10\text{ }^\circ\text{C}$ (a) – ką tik paskleidus, b) – 60 min po paskleidimo, c) – po sausinimo)	57
2.20 pav. „Plexiglas“ plokštė (Chappelow, C.C., 1992)	58
2.21 pav. CMA granulių įsiskverbimo į ledą gylio nustatymo bandymas esant $-3\text{ }^\circ\text{C}$ (a) – ką tik uždėjus granules, b) – 60 min po paskleidimo).....	58
2.22 pav. Natrio acetate tirpalas esant $-10\text{ }^\circ\text{C}$ po 60 min, kuriame pasireiškė užšalimas	61
2.23 pav. Kietosios būsenos SMM įsiskverbimo gylio rezultatai esant $-3\text{ }^\circ\text{C}$ tempepratūrai	63
2.24 pav. Kietosios būsenos SMM įsiskverbimo gylio rezultatai esant $-6\text{ }^\circ\text{C}$ tempepratūrai	63
2.25 pav. Kietosios būsenos SMM įsiskverbimo gylio rezultatai esant $-10\text{ }^\circ\text{C}$ tempepratūrai ..	64
3.1 pav. NaCl , CaCl_2 ir MgCl_2 ledo tirpdymo grafikas per 5 ir 60 min esant $-3\text{ }^\circ\text{C}$, $-6\text{ }^\circ\text{C}$ bei $-9\text{ }^\circ\text{C}$	77
3.2 pav. Ledo masės nuostolis ir paviršiaus temperatūros pokytis ($t = -3\text{ }^\circ\text{C}$) (Bulevičius, 2013; Laurinavičius, 2014).....	77
3.3 pav. Ledo masės nuostolis ir paviršiaus temperatūros pokytis ($t = -9\text{ }^\circ\text{C}$) (Bulevičius, 2013; Laurinavičius, 2014).....	78

IVADAS

Šiuolaikiniai automobilių keliai labai sudėtingi inžineriniai statiniai, sudarantys palankias sąlygas intensyviai automobilių eismui, greitai ir patogiai pervežti keleivius ir krovinius, sutaupant kelionės laiką. Keliai yra svarbus tranzito, sujungimo bei privažiavimo objektas, kuris apsupa beveik visą pasaulį. Vien tik Lietuvoje kelių ir gatvių yra daugiau nei 84 tūkst. km (Apie sektorių ..., 2023), kuriais naudojasi vairuotojai kasdien. Be to, šiais laikais yra labai aktualus aplinkos ir ekologiškumo klausimas, todėl kelių statyba, priežiūra ir naudojimas turi būti nekenksmingi aplinkai.

Šiame darbe atliekama Lietuvoje ir kitose šalyse darytų tyrimų su įvairiomis slidumą mažinančiomis medžiagomis (SMM) keliuose analizė. Darbe analizuotas medžiagų naudingumas, efektyvumas, privalumai ir trūkumai, panaudojimo galimybės Lietuvos keliuose. Taip pat analizuota Lietuvos bei kitų šalių SMM panaudojimo patirtis. Formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, siekiant įvertinti alternatyvių SMM efektyvumą ir palyginti jas su įprastai keliuose naudojamu natrio chloridu (NaCl) žiemos metu. Darbo tikslui pasiekti pagal parengtą eksperimento planą atlikti ledo tirpymo efektyvumo bandymai su atrinktomis medžiagomis.

Tyrimo aktualumas. Lietuvos teritorijai yra būdinga 4 sezonų klimato kaita. Žiemą iškrenta vidutiniškai apie 120 mm kritulių (lietus, sniegas) (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2024), kurie padengia kelių dangos paviršius. Taip pat pasikartojantys užšalimo ir atšilimo ciklai ardo kelio dangos konstrukciją, mažina jos eksploatacines charakteristikas, o esant krituliams arba drėgmei daro poveikį pėsčiųjų, dviračių, automobilių ir kitų eismo dalyvių eismui. Žiemos metu iškritęs sniegas ir susiformavęs ledas apsunkina eismo dalyvių judėjimą ir kelia pavojų jų saugumui, kadangi kelio dangos paviršiuje susidaro ledo sluoksnis, kuris vėliau atšyla ir virsta tirpstančio ledo, sniego (tuo atveju, kai sninga) ir purvo mišiniu, kuris kelia nepatogumų ir pavojų eismo dalyviams. Todėl labai svarbu stebėti ir iš anksto tinkamai paruošti kelius pavojingoms žiemos oro sąlygoms (audra, sniego pūga, plikledis).

Hipotezė – alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų efektyvumas tirpdant ledą yra panašus arba atitinkamomis sąlygomis geresnis nei NaCl.

Tyrimo problema – slidumui mažinti keliuose žiemos sąlygomis Lietuvoje vis dar plačiai naudojama NaCl druska. Tačiau yra ir alternatyvių priemonių, kurios naudojamos užsienyje ir lygiagrečiai gali būti panaudotos Lietuvoje. Mažai atlikta tyrimų, kurie leistų vertinti alternatyvių slidumą mažinančių priemonių panaudojimą esant skirtingoms aplinkos sąlygoms Lietuvoje.

Tyrimo objektas – slidumą mažinančios cheminės medžiagos.

Tyrimo tikslas – laboratorinėmis sąlygomis nustatyti NaCl ir alternatyvių slidumą mažinančių cheminių medžiagų ledo tirpdymo efektyvumą ir palyginti gautus duomenis.

Uždaviniai tikslui pasiekti:

1. Atlikti mokslinės literatūros, susijusios su tradicinių ir alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų panaudojimu, analizę.
2. Atlikti slidumą mažinančių medžiagų barstymo kiekių rekomendacijų skirtingomis sąlygomis analizę.
3. Atlikti kelių priežiūrai žiemą naudojamų slidumą kelyje mažinančių cheminių medžiagų efektyvumo eksperimentinius tyrimus.
4. Laboratorinėmis sąlygomis ištirti 10 SMM ir jų tirpalų.
5. Apibendrinti gautų tyrimų rezultatus, pateikti siūlymus.

Tyrimo metodai

Darbe taikyti šie tyrimų metodai: mokslinės teorinės analizės, laboratoriniai, statistinės analizės, duomenų lyginimo ir grupavimo metodai.

1. SLIDUMĄ MAŽINANČIŲ MEDŽIAGŲ KELIUOSE ANALIZĖ

Lietuvos teritorija yra vidutinėse platumose Europos viduryje. Šiam regionui yra būdingas lygumų reljefas ir 4 sezonų klimato kaita. Per metus Lietuvos teritorijoje iškrenta vidutiniškai apie 674 mm kritulių („Visuotinė lietuvių ...“, 2024), iš kurių apie 17 % tenka žiemos periodui, per kurį sniego dangos storis gali būti daugiau nei 30 cm bei jo žemės paviršiaus dengimo trukmė pačiose šalčiausiose vietovėse iki 105 dienų ir daugiau, tačiau saulėtų dienų vidutiniškai yra apie 59 dienas (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2024). Be to, žiemos gali būti permainingos su dažniais atodrėkiais, o tai reiškia, kad dažnai pasikartoja atšilimo ir užšalimo ciklai: ateinant atšilimui būna šlapdriba, lyja, o užšalant krituliams atsiranda ledas ant paviršių ir plikledis. Remiantis KPT SDK 19 (2019) 1 priedu esant neigiamoms temperatūroms žemės įšalo gylis gali siekti net iki 160 cm. Kadangi Lietuvos teritorijoje pasireiškia neigiamos temperatūros, galima teigti, kad klimato sąlygos ir poveikis keliams yra panašus tokiose valstybėse kaip: Islandija, Norvegija, Jungtinė Karalystė, Rusija, JAV, Kanada, daugelis kitų Europos Sąjungos (ES) šalių ir kt. Todėl galima pasinaudoti jų žiemos kelių priežiūros patirtimi šio magistro baigiamajame darbe ir pritaikyti tai Lietuvoje.

1.1. Tradicinės slidumą mažinančios medžiagos ir jų savybės

Pagrindinis kelių, gatvių, pėsčiųjų ir dviračių takų bei šaligatvių priežiūros uždavinys žiemą – užtikrinti nuolatinį nenutrūkstamą eismą valant sniegą ir ledą nuo dangų paviršių. Tam naudojamos skirtingos priemonės: sniego, ledo valymo įranga ir mašinos bei barstomosios medžiagos. Tokie priežiūros darbai vadinami nuolatine kelio elementų priežiūra žiemą. Pagal Kelių priežiūros vadovo II dalies KPV DT-15 (2015), išskiriamos dvi pagrindinės rūšys medžiagų, kurios naudojamos mažinant dangų paviršiaus slidumą: frikcinės ir cheminės medžiagos bei jų mišiniai. Remiantis TRA KPŽM 23 (2023), frikcinės barstomosios medžiagos – tai birios, skaldytos arba natūralios mineralinės medžiagos (pavyzdžiui, smėlis, smulkus žvyras, žvirgždas) ar smulkintos statybinės medžiagos (dirbtinio akmens, plytų ir kt.). Cheminės mažinančios slidumą medžiagos – tai įvairios druskos, jų mišiniai arba tirpalai, stabdantys kelių dangų apledėjimą bei mažinantys arba šalinantys slidumą keliuose. Cheminėms medžiagoms priskiriamas: natrio chloridas (valgomoji, techninė, pašarinė druska), silvinitinė druska, kalcio chloridas, fosfatinis kalcio chloridas, bišofitas (magnio chloridas), nesusigulintis mišinys, sudarytas iš 85–88 % natrio chlorido (arba silvinitinės druskos) ir 12–15 % kalcio chlorido, fosfatinio kalcio chlorido bei kalcio chlorido ir bišofito mišinys, karbamidas, kalcio, magnio, kalio, natrio acetatai ir kitos medžiagos. Be to, naudojami ir

inhibitoriai – tai medžiagos, lėtinančios arba stabdančios tam tikras chemines reakcijas, tarp kurių yra: natrio hidrofosfatas, natrio dihidrofosfatas, paprastas superfosfatas, dihidrofosfatas, natrio heksametafosfatas ir kt. (TRA KPŽM 23, 2023). Toliau, šiame darbe bus tiriamos ir analizuojamos tik tradicinės ir alternatyvios slidumą mažinančios cheminės medžiagos.

Anot Rimkaus (2004), visos žiemos metu naudojamos SMM privalo būti saugomos specialiosiose iš anksto paruoštose patalpose (bunkeriuose). Medžiagas būtina laikyti užtikrinant šias sąlygas: saugojimo vieta turi būti visiškai sausa, izoliuota nuo aplinkos drėgnio bei jų sandėliavimą geriausiai vykdyti vasaros metu, sausuoju laikotapiu. Sandėliuotų medžiagų kiekis turi būti numatytas iš anksto tam, kad jo užtektų vienai žiemai.

Druskų sandėliavimo drėgnis bunkeriuose negali viršyti 0,6 % masės, angaruose 2 % masės, o didžiausias leidžiamasis drėgnis yra 4 % masės. Jeigu ribos bus viršytos, tai sumažės druskos birumo savybė ir medžiagos dalelės susilipdys tarpusavyje. Pagal druskos išgavimo būdą priklauso savas drėgmės kiekis: akmens druskai tai iki 0,3 % masės, neišdžiovintai išgarintai druskai – iki 2–3 % masės, neišdžiovintai akmens druskai – iki 3–4 % masės. Laikui bėgant, NaCl druska patiria daug mechaninio poveikio, dėl ko susidaro druskos dulkės, todėl rekomenduojama palikti mažą drėgmės kiekį druskoje 0,1–0,3 % (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

Natrio chloridas NaCl

Techninis natrio chloridas (NaCl), dar žinomas kaip akmens druska, yra plačiai naudojama medžiaga kelių barstymui žiemą. Ji nėra toksiška ir gali būti saugoma sausose patalpose. Tačiau NaCl turi ir neigiamų savybių: jis gali sukelti metalo koroziją. Kaip ir visoms birioms medžiagoms, NaCl taikomi granulimetrinės sudėties reikalavimai, kadangi nuo to priklauso jo poveikis ledui (žr. 1 lentelę). Smulkioji dalis, kurios dydis yra iki 1 mm, greičiau sąveikauja su viršutiniais ledo sluoksniais, tačiau ją gali nupūsti vėjas, o naudojant iki 0,16 mm druskos daleles, padidėja dulketumas keliuose. Stambiagrūdės frakcijos dalelės tirpsta lėčiau, tačiau efektyviai prasiskverbia į ledo gylį ir sunaikina visą ledo sluoksnį. NaCl druskos tirpale gali būti ir sulfatų, tačiau jų kiekis ribojamas iki 0,6 masės procento 10 % NaCl tirpale. Mišinio sudėtyje su priemaišomis turi būti mažiausiai 96 % NaCl. NaCl efektyvus iki –10 °C temperatūros, o toliau efektyvumas tirpinti ledą mažėja ir pasiekia minimalų tašką –21,2 °C temperatūroje, kai 22,4 % NaCl tirpalo koncentracijos pats tirpalas sustingsta (Čygas ir kt., 2016; „Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių priežiūros žiemą vadovas“, 2015 (toliau – KPV, 2015)).



1.1 pav. Natrio chloridas (NaCl)

1.1 lentelė. NaCl granuliometrinės sudėties reikalavimai (Čygas ir kt., 2016)

Eil. Nr.	Reikalavimai	Kiekis, masė %
1.	>5 mm	≤2
2.	<0,16 mm	≤5
3.	2–5 mm	32–70
4.	0,71–2 mm	30–60
5.	0,16–0,71 mm	5–25
6.	<0,063 mm	≤3
7.	Dalelių, didesnių kaip 5 mm ir mažesnių kaip 0,16 mm, kartu paėmus turi būti	≤5

Bieńka et al. (2006) savo dokumente „Kelių priežiūros žiemą gairės“ (lenk. Wytyczne zimowego utrzymania dróg), kuris skirtas naudoti priežiūrai žiemą Lenkijos keliuose, parodo, kad NaCl turi daug pranašumų kitų medžiagų atžvilgiu, o neigiamas jo poveikis gali būti sumažintas dėl sukurtų technologijų, leidžiančių sumažinti sunaudojimą išlaikant efektyvumą: 1) pabarstyti druska, sudrėkinta 20–25 % NaCl tirpalu, 2) atitinkamo dydžio druskos grūdelių pabarstymas naudojant kompiuterines valdymo sistemas, kurias tolygiai paskirsto druską ant paviršiaus ir suteikia ilgesnį lydymosi efektą, 3) paskleidžiamas NaCl tirpalas, kurio koncentracija 23–25 %. NaCl galima naudoti sausoje, sudrėkintoje arba tirpalo formoje. Lyginant KPV (2015) ir kaimyninės valstybės, Lenkijos, kelių priežiūros žiemą gaires, abu dokumentai teigia, kad koncentruotas NaCl tirpalas užšąla esant –21,2 °C temperatūrai, tačiau „Kelių priežiūros žiemą gairės“ (2006) nurodo, kad efektyvus šios druskos naudojimas yra iki –6 °C. Neigiamos NaCl savybės apima jo ardomąjį poveikį betoniniams paviršiams, plieninių konstrukcijų ir transporto priemonių elementams, taip pat neigiamą poveikį aplinkai, daugiausia miesto želdiniams ir gruntiniam vandeniui. Augalų audiniuose aptinkamas ištirpęs NaCl, sudarytas iš natrio ir chloro jonų. Nepalankus chloro jonų poveikis pasireiškia tuo, kad jų dideli kiekiai susikaupia augalų audiniuose, sukeldami chlorozę (lapų pageltimą), dėl kurios augalai iš dalies arba visiškai žūsta (Bieńka et al., 2006). Anot Chango ir kt. (1994) druskos sudėtyje esantis natrio keičia dirvožemio struktūrą ir dirvožemis tampa mažiau pralaidus, nes natrio adsorbuoja molis arba organinės medžiagos, tai sumažina dirvožemio aeraciją, padidina

šarmingumą ir pH. Be to, anijonų mainų procese natris išstumia molio kalcį. Besikaupiant druskai ir didėjant dirvožemio druskingumui, didėja dirvožemio šarmingumas ir pH (Chang et al., 1994). Biraus natrio chlorido naudojimas duoda neigiamą poveikį, kadangi, gali būti nupūstas vėjo, o tai sumažina jo poveikį ir užteršia gretimas teritorijas (Bieńka et al., 2006).

Šarminio silicio dioksido reakcija – tai žalingas procesas, kylantis iš cheminės reakcijos tarp šarmų iš cemento ir reaktyvaus silicio dioksido portlandcemečio užpildo. Šios reakcijos metu hidroksilo jonai (OH^-), susieti su natrio (Na^+) ir kalio (K^+) jonais, reaguoja su reaktyviomis silicio dioksido formomis, sudarydami gelį, kuris, esant pakankamai drėgmės, plečiasi ir gali sukelti didelį vidinį įtempį, kuris savo ruožtu gali sukelti įtrūkimus betone ir užpilduose. Reakcija pasireiškia įtrūkimais, iššokimais ir išsiplėtimu bei charakteringomis baltomis dėmėmis. Išsamūs tyrimai rodo, kad NaCl gali inicijuoti arba pagreitinti šią cheminę reakciją, taip sumažindamas betono ilgaamžiškumą ir eksploatavimo laiką. Palyginus betonines ir asfalto dangas tarpusavyje, antra yra atsparesnė cheminėms reakcijoms su leda tirpinančiomis cheminėmis medžiagomis (Shi et al. 2009).

Kalcio chloridas CaCl_2

Kalcio chloridas (CaCl_2) – tai yra labai higroskopiška medžiaga, kuri gerai sugeria drėgmę iš aplinkos susijungiant į kristalohidratą (pvz., dihidro kalcio chloridas $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Tirpstant vandenyje kalcio chloridas išskiria šilumą, kuri nežymiai šildo aplink esančias medžiagas. CaCl_2 druska gali pažeminti ledo lydymosi temperatūra iki $-32\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros, o toliau efektyvumas mažėja, pasiekiant maksimalų minimumą $-54,9\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros, kai esant 42,5 % CaCl_2 tirpalo koncentracijai pats tirpalas sustingsta. Kalcio chloridas granulimetrinės sudėties reikalavimai yra tokie: mažesnių kaip 2 mm dalelių dalis gali būti iki 25 % masės, o 10–20 mm didžiausia dalis – iki 5 % masės. CaCl_2 druskos tirpale gali pasitaikyti ir sulfatų kiekis, kuris ribojamas iki 0,6 masės procento 10 % CaCl_2 tirpale. Mišinio sudėtyje su priemaišomis turi būti mažiausiai 77 % CaCl_2 . Jeigu kalcio chloridas naudojamas mišinyje kartu su natrio chloridu, tai mišiniui taikomi natrio chlorido granulimetrinės sudėties reikalavimai (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015). CaCl_2 kaina yra apie 360 Eur/t (Ratkevičius, 2016).

Bieńka ir kt. (2006) nurodo, kad CaCl_2 efektyviai tirpdo ledą esant iki $-20\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai, o sotaus CaCl_2 tirpalo užšalimo temperatūra yra $-51,6\text{ }^\circ\text{C}$, temperatūros yra aukštesnės, nei nurodyta KPV (2015). Jis yra efektyvesnis nei NaCl , tačiau jį reikia laikyti sandariai uždarytuose induose, kadangi yra stipriai higroskopiškas ir gali labai greitai sugerti drėgmę iš aplinkos. Jo kaina yra kelis kartus didesnė nei NaCl . Užsienyje atlikti laboratoriniai tyrimai parodė, kad esant $-7\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai po 30 minučių paskleistas granulių pavidalu CaCl_2

ištirpdo 35 % daugiau ledo nei NaCl. Tačiau aukštesnėje temperatūroje NaCl yra veiksmingesnis. CaCl_2 turi tokias pačias korozines ir destruktines savybes kaip NaCl.



1.2 pav. Kalcio chloridas (CaCl_2)

Magnio chloridas (MgCl_2)

Magnio chloridas (MgCl_2) – tai yra labai higroskopiška medžiaga, gerai sugerianti drėgmę iš aplinkos ir sudaranti kristalohidratus (pvz., pentahidro magnio chloridas $\text{MgCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Jis gerai tirpsta vandenyje. Mišinyje su priemaisomis turi būti mažiausiai 47 % MgCl_2 , kad jis efektyviai veiktų (Čygas ir kt., 2016). Bišofitu vadinamas techninis magnio chloridas su kitų druskų priemaisomis, kurio sudėtyje yra 48 % MgCl_2 ir 52 % vandens (iki kristalizacijos). 2013 m. Strėlkutė ir Bradulienė išleido straipsnį, kuriame tyrė bišofito poveikį augalų (pievinės miglės, daugiametės svidrės, baltieji dobilai) daigumui ir antžeminės dalies augimui. Natūralus bišofitas susidaro kaip mineralinės kilmės druska ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ir išgaunamas dideliais kiekiais išgarinus jūrų sūrimus. Tyrimui panaudotas 47 % MgCl_2 mišinys su 0,3 % CaCl_2 , 0,6 % NaCl, 0,3 % KCl bei 51,8 % vandens. Dirvožemis buvo drėkinamas su 9, 12 bei 46 ml šio mišinio kiekiu. Gauti rezultatai parodė, kad didėjant bišofito kiekiui dirvožemyje, daigumas ir augalų augimas mažėjo, o esant didžiausiam kiekiui (46 ml), nei vienas augalas neužaugo. Šis tyrimas pabrėžia neigiamą chloridinių druskų poveikį aplinkai, net jei jos naudojamos nedideliais kiekiais slidumui mažinti. Bišofitas efektyvus iki $-28\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros, o jo kaina yra 1 Eur/kg („Ledo tirpiklis...“, 2024) arba vienos tonos kaina viršija 200 Eur/t (Ratkevičius, 2016).

MgCl_2 granuliometrinės sudėties reikalavimai panašūs į kalcio chlorido ir yra tokie: mažesnių kaip 2 mm dalelių dalis gali būti iki 25 % masės, o 10–20 mm didžiausia dalis - iki 5 % masės. Tačiau, jeigu kalcio chloridas naudojamas mišinyje kartu su natrio chloridu, tai mišiniui taikomi natrio chlorido granuliometrinės sudėties reikalavimai. MgCl_2 palyginus su NaCl ir CaCl_2 yra švelnesnis korozijos atžvilgiu bei jis padidina sausos kelio dangos slidumą sumažinus sukibimo koeficientą iki 60 %, todėl jį nerekomenduojama barstyti prieš plikledį ir naudoti ten, kur kelyje yra dideli išilginio profilio nuolydžiai, mažo spindulio horizontaliosios kreivės ir intensyvesnės stabdymo vietos. Tačiau pagal Rimkaus (2003) atliktus tyrimus

bišoftas sukelia didžiausia metalo korozija lyginant su NaCl ir CaCl₂. MgCl₂ druska gali pažeminti ledo lydymosi temperatūra mažiausiai iki –33,6 °C temperatūros, o jo tirpalą geriausiai naudoti iki –15,0 °C temperatūros (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).



1.3 pav. Magnio chloridas (MgCl₂)

Druskų mišiniai tai yra tos pačios druskos sumaišytos viena su kita skirtingomis proporcijomis, tam kad pasiekti geresnį efektyvumą ledui tirpinti. Druskų mišiniai gali būti gaminami iš pramonės chloridinių atliekų, kurie dažniausiai naudojami keliuose, tačiau dėl galimos netinkamos žaliavų kokybės mišiniuose gali atsirasti šalutinės priemonės, bloginančios mišinių savybes. Pavyzdžiui, mišinio naudojimo metu pasireiškia putojimu arba nebūdingu, skleidžiamu priemaišomis kvapu, kadangi grynieji NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂ neturi kvapo.

NaCl ir CaCl₂ mišinys yra labai veiksmingas higroskopiškas medžiagų mišinys, kuris net sausu žiemos oru gali sugerti didelį kiekį drėgmės iš aplinkos. Be to, pasireiškianti CaCl₂ šiluma, sugiariant jam drėgmę, padidina mišinio efektyvumą. Tačiau, mišinį rekomenduojama pakeisti į gryną CaCl₂, jeigu oro temperatūra žemesnė nei –17,8 °C (Čygas ir kt., 2016). Mišinyje esantis CaCl₂ greitai sugeria drėgmę, todėl NaCl lengviau pradeda tirpinimo procesą, kuriam pradėti reikia tam tikro šilumos ir drėgmės kiekio. Šis mišinys suvienija abiejų ingredientų privalumus ir yra pigesnis, nes naudojant tokį mišinį galima sutaupyti iki 40% išlaidų, palyginant su grynomis druskomis atskirai. Taip yra dėl didelio mišinio efektyvumo žemoje temperatūroje ir mažesnių nuostolių, atsirandančių dėl SMM išpūtimo. Esant temperatūrai iki –15 °C, žiemos slidumui mažinti dažnai naudojamas NaCl ir CaCl₂ mišinys santykiu 4:1 arba 2:1. Geri rezultatai taip pat pasiekiami naudojant mišinį santykiu 19:1. Mišinio trūkumas yra tai, kad jis greitai tampa drėgnas dėl CaCl₂, kuris apsunkina grūdelių pasiskirstymą. Mišinys taip pat turi korozinių ir destruktivių savybių, kurias sustiprina CaCl₂. Mišinys NaCl ir MgCl₂ veikia panašiai NaCl ir CaCl₂ mišinio bei turi tuos pačius trūkumus (Bieńka et al., 2006). NaCl barstomos druskos slidumui mažinti keliuose aplinkos reikalavimai aprašyti LST EN 16811-1 (2016). CaCl₂ ir MgCl₂ barstomų druskų aplinkos reikalavimai aprašyti LST EN 16811-2 (2016).

Austrijos kelių, geležinkelių ir susisiekimo tyrimų bendrovės standarte Kelių barstymo medžiagos (vok. Streumittel) RVS 12.04.16 (2017) išskiriamos slidumą neutralizuojančios barstymo medžiagos – tai medžiagos didinančios slidžių kelių sukibimą žiemą, kurie atitinka frikciniams medžiagoms pagal TRA KPŽM 23 (2023) dokumento nurodytą terminologiją, ir tirpdančios barstymo medžiagos (tirpdančios, saugančios nuo apledėjimo medžiagos) – tai kietos arba skystos medžiagos, skirtos išvengti kelio slidumo žiemą ar jį sumažinti (prie jų priskiriami NaCl, MgCl₂, CaCl₂ ir jų mišiniai), kurie atitinka cheminėms medžiagoms pagal TRA KPŽM 23 (2023) dokumento nurodytą terminologiją. Dokumente aprašyti, kad MgCl₂, CaCl₂ tirpalai su vandeniu sukelia papildomą, temperatūrą padidinančią reakciją. Drėgna druska, didėjant druskos tirpalo procentiniai daliai, priešingai nei sausa druska, daug geriau sukimba su keliu, dėl šios priežasties jos naudojimui yra teikiamas pirmumas. Norint išvengti kelių slidumo, profilaktiniais tikslais ypač tinka purkšti gryną druskos tirpalą. 1.2 lentelėje pateikti cheminės SMM sudėtis ir savybės naudojamos Austrijos keliuose remiantis Darbo dokumentu Nr. 11. Be tradicinių SMM, Austrijos keliuose taip pat naudojami karbamidas, kalcio magnio acetatas, kalio karbonatas.

1.2 lentelė. Naudojamos cheminės SMM Austrijos keliuose (Arbeitspapier Nr. 11., 2012)

	Natrio chloridas	Drėgna druska 30 %	Kalcio chloridas	Magnio chloridas	Karbamidas	Kalcio magnio acetatas (CMA) 25 % tirpalas	Kalio karbonatas
Chem. formulė	NaCl	70 % sausas NaCl ir 30 % tirpalu NaCl	CaCl ₂	MgCl ₂	CO(NH ₂) ₂	Ca(CH ₃ COO) ₂ x2H ₂ O Mg(CH ₃ COO) ₂ x4H ₂ O	K ₂ CO ₃
Išlaidų palyginimas % 2005 m.	100	100	300–350	200–230	250–400	400	700–800
Sudėtis	39,3 % Na; 60,7 % Cl	70 % NaCl; 6 % CaCl ₂ ; 24 % H ₂ O (0,7 kg NaCl + 0,3 kg 20 % CaCl ₂ -o. MgCl ₂ tirpalas)	Ca 18,3 % Cl 32,4 % H ₂ O 49,3 %	12 % Mg; 34,9 % Cl; 53,1 % H ₂ O	46,6 % N	Maišymo santykis 1:1–3:7	Pagal 2006 m. konkurso sąlygas 10 % tirpalas Maks. leidžiama s: 0,05 mg/l Hg 0,2 mg/l Cd 0,25 mg/l As kiekviena m 0,5 mg/l Pb. Cr.

	Natrio chloridas	Drėgna druska 30 %	Kalcio chloridas	Magnio chloridas	Karbamidas	Kalcio magnio acetatas (CMA) 25 % tirpalas	Kalio karbonatas
Higroskopiškumas	Silpnai higroskopiškas	Silpnai higroskopiškas	Stipriai higroskopiškas	Stipriai higroskopiškas	Silpnai higroskopiškas	Stipriai higroskopiškas	Stipriai higroskopiškas
Tirpumas vandenyje (100 g H ₂ O, esant 20°C)	35,9 g	–	74,5 g	302 g	100 g	Ca-Ac. (40 °C): 33 g Mg-Ac. (25 °C): 65 g	Grynajai medžiagai 112,0 g
Praktinio naudojimo riba	–10 °C	–15 °C (–20 °C)	–20 °C	–15 °C	–6 °C	–6 °C	–11 °C
Tankis (g/cm ³)	2,16	1,72	1,68	1,57	0,70	1,50	2,43
Medžiagos kiekis, esant –10°C, ištirpinti 1 kg ledo	163 g	200 g	~170 g	309 g	380 g	263 g	(–8 °C) 187 g

Laurinavičius ir kt. (2011) atliko korozijos greičio nustatymo eksperimentą, paskleidus 23 % koncentracijos tirpalus ant plieninių plokščių. Pagal gautus rezultatus nustatyta, kad didžiausias korozijos greitis pasireiškia NaCl tirpalui (0,147404 mm/m), po kurio seka NaCl tirpalas su kalcio nitratu (0,142139 mm/m). NaCl tirpalų korozinis aktyvumas su CaCl₂ ir karbamidu yra mažesnis ir lygus atitinkamai 0,123421 ir 0,123226 mm/m.

Iš visos pateiktos ankščiau informacijos galima padaryti keletas išvadų:

- SMM (druskų, jų tirpalų arba mišinių) pasirinkimas naudoti barstant kelius priklauso nuo aplinkos ir dangos temperatūros, kadangi mažėjant temperatūrai, skirtingų greičių mažėja SMM efektyvumas;
- NaCl praranda efektyvumą mažėjant temperatūrai, todėl rekomenduojama jį pakeisti MgCl₂ arba CaCl₂, o intervale nuo –6 °C iki 0 °C, jo efektyvumas didėja;
- naudojami kelių barstymui NaCl, MgCl₂ ir CaCl₂ druskos turi labai didelį poveikį aplinkos užterštumui, plieninių konstrukcijų ir transporto priemonių elementų korozijai.
- SMM saugojimo patalpos privalo būti sausi, kadangi SMM gali prarasti birumo savybę, tačiau tam kad po kurio laiko SMM nedulkėtų rekomenduojama palaikyti nedidelį drėgnį 0,1–0,3 % patalpoje.

1.2. Alternatyvios slidumą mažinančios medžiagos ir jų savybės

Prie alternatyvių SMM yra priskiriamos cheminės medžiagos, kaip acetatai ir formiatai. Kelių priežiūrai žiemą naudojami acetatai ir formiatai: kalio acetatas (CH_3COOK), natrio acetatas (CH_3COONa), kalcio acetatas ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca}$), magnio acetatas ($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mg}$), kalio formiatas (HCOOK) ir natrio formiatas (HCOONa); kurias yra efektyviau naudoti žemose temperatūrose. Acetatai ir formiatai – tai efektyvios, pasižyminčios silpnu metalo ir betono koroziniu poveikiu ir beveik nekenksmingos aplinkai medžiagos. Jos veikia itin greitai ardydamos, o ne tirpindamos ledą. Pavyzdžiui, 95 % kalio formiato (HCOOK) ir natrio formiato (HCOONa) suyra per 14 parų, nesusidarant kenksmingiems skilimo produktams. Formiato viena iš teigiamų savybių yra silpnas korozinis poveikis betonui ir metalui. Kalcio ir magnio acetatų veikimo temperatūra yra iki $-15\text{ }^\circ\text{C}$ ir iki $-30\text{ }^\circ\text{C}$ atitinkamai. Jie taip pat neagresyvūs aplinkai (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015). Pagal Bieńka ir kt. (2006) formiatai yra skruzdžių rūgšties druskos arba esteriai. Žiemos kelių priežiūros reikmėms dažniausiai naudojamas natrio formiatas NaHCO_2 ir kalcio formiatas $\text{Ca}(\text{CHO}_2)_2$. Jų ledą šalinančios savybės yra žemesnės nei NaCl , o kaina yra kelis kartus didesnė. Šių medžiagų poveikis aplinkai yra panašus į natrio chlorido poveikį. Tačiau jie turi mažesnę korozinį poveikį nei NaCl (Bieńka ir kt., 2006).

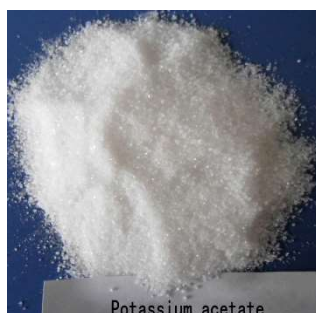
Kalcio magnio acetatas (trumpinis CMA, angl. Calcium Magnesium Acetate) susidaro reaguojant acto rūgščiai su dolomito-kalkakmenio uoliena. Brangus šios cheminės medžiagos komponentas yra acto rūgštis, gaminama iš gamtinių dujų arba žalios naftos. Jo kaina yra daug didesnė nei NaCl kaina ir gali būti brangiau iki 15 kartų. CMA gaminamas granuliu pavidalu. Jis vandenyje tirpsta prasčiau nei natrio chloridas ir kalcio chloridas. Tačiau jis gali būti naudojamas žiemos priežiūrai skystu arba kietu pavidalu. Remiantis JAV Federalinės greitkelių administracijos (FHWA) ir Švedijoje atliktais tyrimais, CMA mažiau reaguoja su plienu, aliuminiu ir ardo cementbetonį nei NaCl (Bieńka et al., 2006). CMA turi įtakos dirvožemio savybėms, atvirkščiai nei NaCl , CMA padidina dirvožemio pralaidumą bei sujudinti dirvožemyje esančius mikroelementus, paveikiant požeminiam vandeniui (Chang et al., 1994). CMA mišinys nedaro įtakos vegetaciniam procesams, tačiau magnio ir kalcio jonai veikia aplinką, kietinant vandenį. Mišinyje nesusidaro dumblių ir suskyla maždaug per 5 dienas $20\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje, per 10 dienų $-10\text{ }^\circ\text{C}$, per 100 dienų $-2\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje. Kadangi kalcis ir magnis yra augalijai būtini mikroelementai, jie gali nežymiai paveikti augalų augimą. CMA mišinys aplinkai nekenksmingas, nes suskyla iki anglies dioksido ir vandens. 32,5 % koncentracijos CMA tirpalo užšalimo temperatūra yra apie $-36\text{ }^\circ\text{C}$. Mišinyje kalcio ir magnio molinis santykis yra atitinkamai 3:7 (Laurinavičius et al., 2011). JAV naudojamas granuliuotas

CMA, kaip aplinkai nekenksminga alternatyva jautrių zonų apsaugai nuo apledėjimo. CMA 25 % koncentracijos tirpalas kaip alternatyvus sprendimas Europoje siūlomas automobilių kelių priežiūrai žiemą. 25 % CMA tirpalas eksperimentiškai taip pat naudojamas dulkėms surišti, taip mažinant pakartotinį kelio dulkėtumą (RVS 12.04.16, 2017).



1.4 pav. Kalcio magnio acetatas (CMA)

Kalio acetatas (CH_3COOK) susidaro reaguojant acto rūgščiai su kalio karbonatu. Tai balta kristalinė medžiaga, kuri greitai ištirpsta veikiamą drėgmės. Jo tirpalai yra šarminiai. Jis naudojamas žiemos kelių priežiūrai kaip sausos druskos drėkinimo priemonė arba tiesioginiam pabarstymui. Jo poveikis aplinkai ir korozinės savybės yra panašios į kalcio magnio acetato (Bieńka et al., 2006). Tirpalo užšalimo temperatūra $-29\text{ }^\circ\text{C}$, tačiau šią SMM efektyviai taikyti iki $-9\text{ }^\circ\text{C}$ (Laurinavičius et al., 2011).



1.5 pav. Kalio acetatas (CH_3COOK) („Potassium Acetate...“, 2024)

Natrio acetatas (CH_3COONa) yra mažiau toksiškas žuvims ir žinduoliams nei karbamidas, gali būti panaudotas mažinant ledo lydymosi temperatūrą. Natrio acetatas aplinkoje skyla iki anglies dioksido ir vandens, nesukeldamas reikšmingo toksinio poveikio aplinkai. CH_3COONa koncentruotas tirpalas užšalo prie $-22\text{ }^\circ\text{C}$. Ši medžiaga patraukli žemesnėmis kainomis, kadangi, pavyzdžiui, 20 t kainuoja tik 500–800 JAV dolerių, todėl gaminama dideliais pramoniniais kiekiais. Natrio acetatas tiekiamas granulių pavidalu, o jo sunaudojama ledui nušalinti net 40 % mažiau kiekio nei karbamido (Laurinavičius et al., 2011).



1.6 pav. Natrio acetatas (CH_3COONa)

Laboratoriniai tyrimai parodė, kad ledo šalinimo priemonės, kurių pagrindą sudaro formiatai arba acetatai, labai sugadino asfalto dangą. Žalos mechanizmas yra cheminių reakcijų, emulsinimo ir distiliavimo derinys bei papildomo įtempio susidarymas asfalto mišinio viduje. Nustatyta, kad asfalto rišikliai, įmirkyti ledo tirpinimo tirpale, turi žemesnę minkštėjimo temperatūrą ir linkę minkštėti net esant $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, o asfalto mišiniai, įmirkyti ledo tirpinimo tirpale, turi mažesnę paviršiaus tempimo stiprumą ir mažesnę adheziją. Siekiant valdyti asfaltui ledą mažinančių medžiagų poveikį, rekomenduojama naudoti didelio klampumo rišiklius arba polimerais modifikuotus rišiklius bei naudoti šarminius užpildus arba aukštos kokybės užpildus. Asfalto mišinio naudojimui rūgščių užpildų skilimo lygis buvo didesnis nei šarminių užpildų, bet vis tiek priimtinas (Shi et al., 2009).

Neorganinės ir organinės kilmės inhibitoriai (grynos ir įvairūs jų deriniai), tirpstant ledui ir snigui, negali daryti neigiamo poveikio šiam procesui. Inhibitoriai naudojami kaip gerinančios medžiagų savybės medžiagos, nekenksmingi aplinkai, kurie įmaišomi tam tikrais atvejais. Jie padėda išlaikyti druskų birumą. Pavyzdžiui, tam, kad NaCl išliktų birus, į druską pridedamas pakankamas kiekis lipnumą mažinančių medžiagų, kurio kiekis yra griežtai ribotas iki 200 mg/kg (skaičiuojant kaip $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ anijoną). Tirpinamųjų druskų sudėtyje negali būti vandenį atstumiančių (hidrofobinių) arba kitokių sudedamųjų dalių, kurios letintų arba stabdytų tirpinimo procesą. Tinkamas mišinių sandėliavimas privalo užtikrinti mažiausiai dvejus metus birumo savybės. Mažinant įtaką aplinkai, į druskas primaišomi antikorozinės medžiagos arba inhibitoriai, todėl ant metalo arba betono gaminių atsiranda apsauginė plėvelė neleidžianti vykti korozijai. Pavyzdžiui, įterpus 2% diamofoso, korozijos poveikis sumažinamas iki 37 %, lignosulfonatai su metalu cinko (Zn), kobalto (Co), kadmiu (Cd), manganu (Mn), stibiu (Sb) jonų priedais turi stiprias antikorozinės savybės, įterpus natrio adipinatą keletą kartų sumažėja metalo oksidavimo reakciją ir padidėja druskos efektyvumas, nes sustingimo temperatūra sumažėjo iki $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Įterpus 1–2 natrio aluminato, sumažėja druskų agresyvumas ir išskiria šilumą, taip pat naudojami natrio, kalcio ir kiti nitratai, antikorozinio tirpalo, kurio cheminių

medžiagų santykis yra 90 % natrio chlorido 23 % tirpalo ir 10 % antikorozinio inhibitoriaus, veiksmingumas gali būti iki -19°C , o jeigu ruošiamas mišinys, tai į 1 t druskos įmaišoma 3,5 % antikorozinio inhibitoriaus, tada jų veiksmingumas sudrėkinus mišinį išauga iki -25°C (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

Vieni iš populiariausių antikorozinių savybių turintis inhibitoriai tai fosfatai, kurie randasi fosforo trąšų sudėtyje. Korozijos poveikį dar mažina fosfatinio kalcio chloridas (FCaCl_2), kur į CaCl_2 įmaišoma 4–6 % fosfato inhibitorius. Kaip inhibitorius naudojamas ir karbamidas $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, kuris yra nerūdijanti alternatyva akmens druskai ledo šalinimui keliuose bei nekenksminga gyvūnams kontaktuojančiams su juo, tačiau yra mažiau veiksmingas nei tradicinės SMM. SMM inhibitorių mišinys gali turėti sudėtyje: 0,6 % polifoso, 1 % natrio acetato ir 1 % natrio nitrito. Pagrindinių fosfatų rūšių naudojami inhibitoriai yra: natrio dihidrofosfatas – $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dinatrio hidrofosfatas – $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, paprastasis superfosfatas – $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$; natrio heksametanfosfatas – $\text{Na}_6[(\text{PO}_3)_6]$; dvigubasis superfosfatas – $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_2)_2 + \text{P}_2\text{O}_5$. Be to, slidumui mažinti keliuose naudojami inhibitoriai ne chloridų pagrindu: amofosas (amonio divandenilio fosfatas $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), kurio sudėtyje yra 12,3 % azoto ir 61,7 % fosforo, diamofosas $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, kurio sudėtyje yra 21,9 % azoto ir 53,7 % fosforo, metanolis CH_3OH . Šios medžiagos yra pakankamai aktyvios, o jų užšalimo temperatūra yra žema. Pavyzdžiui, metanolio užšalimo temperatūra yra -125°C (Rimkus, 2004) ir jis veikia daug greičiau nei NaCl bei visiškai nesukelia metalo korozijos, tačiau jis yra lakioji medžiaga dėl ko didina šiltnamio efekto poveikį aplinkai (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

Karbamidas $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ gaminamas pramoniniu mastu, kai iš amoniako ir anglies dioksido gaminamas amonio karbamatas, o po to karbamatas dehidratuojamas iki karbamido ir atskiriamas nuo tirpalo. Karbamidas yra bespalvė medžiaga, tirpi vandenyje ir alkoholyje. Karbamido ledą šalinančios savybės priklauso nuo temperatūros ir jo santykio vandens arba ledo atžvilgiu, pvz., 10 % karbamido tirpalas vandenyje apsaugo nuo apledėjimo iki maždaug -3°C temperatūros, o 25 % – iki maždaug -7°C temperatūros. Žemesnėje temperatūroje karbamidas turi mažesnę poveikį ir nustoja tirpdyti ledą esant $-11,5^{\circ}\text{C}$. Didžiausias jo efektyvumas, panašus į natrio chlorido, pasiekiamas esant nuo -4°C iki -3°C temperatūrai. Karbamidas turi mažiau ėsdinančių savybių nei NaCl , o kaina yra kelis kartus didesnė. Esant vidutinei koncentracijai, jis nekenksmingas žmonėms ir gyvūnams (Bieńka et al., 2006).

Spiritai (alkoholis) – tai cheminių organinių medžiagų junginiai, kurių sudėtyje yra hidroksilo grupę ($-\text{OH}$) susijungusią su alkilo arba alkilinės grupės anglies atomu. JAV teritorijoje buvo išbandyti skirtingi spiritų rūšys, tarp kurių buvo ir metanolis CH_3OH . Rezultatai parodė, kad metanolį galima naudoti žemesnėje temperatūroje nei NaCl . Jis nėra degus ir nesusimaišo su vandeniu bei nesukelia metalo korozijos. Jo trukūmas yra veikimo

trukmė, kuri yra trumpesnė nei kitų SMM, tačiau jis parodo greitesnį efektą kontaktuojant su ledu arba sniegu, bei medžiaga turi neigiamą poveikį aplinkai (Bieńka ir kt., 2006). Remiantis RVS 12.04.16 (2017) standartu, Austrijos teritorijoje alkoholiai ir jų mišiniai naudojami oro uostuose orlaivių ir kilimo bei tūpimo takų apsaugai nuo apledėjimo, o organinės druskos (pvz., techniniai karbamidai) – specialiai kelių priežiūrai žiemą. Dėl spiritų brangumo ir jų sudėtyje esančių organinių angliavandenių, jie nenaudojami automobilių kelių priežiūrai žiemą.

Druskų sandėliavimo drėgnis bunkeriuose negali viršyti 0,6 % masės, angaruose 2 % masės, o didžiausias leidžiamasis drėgnis yra 4 % masės. Jeigu ribos bus viršytos, tai sumažės druskos birumo savybė ir medžiagos dalelės susilipdis tarpusavyje. Pagal druskos išgavimo būdo priklauso savas drėgmės kiekis: akmens druskai tai iki 0,3 % masės, neišdžiovintai išgarintai druskai – iki 2–3 % masės, neišdžiovintai akmens druskai – iki 3–4 % masės. Laikui bėgant, NaCl druska patiria daug mechaninio poveikio, dėl ko susidaro druskos dulkės, todėl rekomenduojama palikti maža drėgmės kiekį druskoje 0,1–0,3 % (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

Taigi, inhibitoriai yra geras priedas prie druskų, nes jis sumažina neigiamą poveikį aplinkai ir padidina cheminių medžiagų naudojimo efektyvumą, tačiau jų naudojimas didina SMM kainą. Alternatyvios SMM yra panašaus efektyvumo kaip ir tradicinės SMM esant -6°C ir aukštesnei temperatūrai. Kai kurios medžiagos (acetatai, formiatai, fosfatinio kalcio chloridas FCaCl_2 , karbamidas $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) turi antikoroazines savybes.

1.3. Slidumą mažinančių medžiagų barstymo kiekių rekomendacijos skirtingomis sąlygomis

Kadangi šiame darbe NaCl bus lyginamas kitomis SMM, analizuojami normatyviniuose dokumentuose pateikiamos rekomendacijos dėl NaCl kiekio barstymui ant kelio dangos. Tyrimui bus naudojami tokie patys NaCl kiekiai, kaip ir šiuose dokumentuose. Laboratorinėse sąlygose reikės užtikrinti vienodą žemą temperatūrą, nes ledas, kuriuo tikrinamas SMM efektyvumą, susidaro, kai aplinkos temperatūra yra žemesnė nei 0 °C. Taip pat reikės išanalizuoti, nuo kuo priklauso SMM ir jų kiekių paskleidimas.

Remiantis KPV PN 23 (2023) 2 punktu, yra nustatyti skirtingi nuolatinės priežiūros reikalavimai pagal penkis kelių priežiūros lygius. Prie nuolatinės kelio techninės priežiūros yra priskiriami: stebėjimas ir apžiūros, nuolatinės priežiūros žiemą, apželdintų plotų priežiūros, kelio zonų švarumo darbai, kelio pažaidų šalinimas pagal nuolatinės priežiūros normatyvus. Remiantis KPV PN 23 (2023) 6 punktu, kelių priežiūros lygiai diferencijuojami pagal vidutinį metinį paros eismo intensyvumą, krovininio transporto vidutinį metinį paros eismo

intensyvumą, maksimalų leidžiamą važiavimo greitį, kelio funkcinę paskirtį ir kelio važiuojamosios dalies dangos tipą.

- I priežiūros lygis turi užtikrinti aukštą eismo kokybės lygį, gerą techninę ir estetinę kelio būklę visą parą. Turi būti sudarytos sąlygos transporto priemonėms važiuoti didžiausiu leistinu greičiu. Galimi trumpalaikiai eismo sutrikimai esant ypač sudėtingoms meteorologinėms sąlygoms žiemą.
- II priežiūros lygis turi užtikrinti pakankamai aukštą eismo kokybės lygį, gerą techninę ir estetinę kelio būklę. Galimas trumpalaikis, ne ilgiau kaip iki 4 val. eismo nutrūkimas esant ypač sudėtingoms meteorologinėms sąlygoms žiemą.
- III priežiūros lygis turi užtikrinti vidutinį eismo kokybės lygį, gerą techninę kelio būklę, tačiau mažesnis dėmesys skiriamas jo estetinei būklei. Galimas trumpalaikis, ne ilgiau kaip iki 8 val. eismo nutrūkimas esant ypač sudėtingoms meteorologinėms sąlygoms žiemą.
- IV priežiūros lygis turi užtikrinti pakankamą eismo kokybės lygį. Skiriamas mažas dėmesys kelio estetinei būklei. Galimas neilgesnis kaip iki 10 val. eismo nutrūkimas esant ypač sudėtingoms meteorologinėms sąlygoms žiemą.
- V priežiūros lygis turi užtikrinti minimalų eismo kokybės lygį ir kelio tinkamumą naudoti. Galimas neilgesnis kaip iki 24 val. eismo nutrūkimas esant ypač sudėtingoms meteorologinėms sąlygoms žiemą.

Lietuvoje yra 21 tūkst. km valstybinės reikšmės kelių, kuriuos prižiūri įmonė AB „Kelių priežiūra“. AB „Kelių priežiūra“, vadovaudamasi KPV PN 23 (2023) ir kitais normatyviniais dokumentais, klasifikuoja valstybinės reikšmės kelių priežiūrą į penkis priežiūros lygius (1.7 pav.). SMM ir jos barstymo kiekiai nepriklauso nuo priežiūros lygio.



1.7 pav. Įmonės AB „Kelių priežiūra“ interaktyvus Lietuvos žemėlapis su valstybinės reikšmės kelių priežiūros skirstymu į V priežiūros lygius („Kelių priežiūra“ <https://keliaprieziura.maps.arcgis.com>)

Cheminės ir frikcinės medžiagos Lietuvoje yra naudojamos profilaktiškai iš anksto paruošti kelius žiemos oro sąlygoms, kaip prevencija dangos apledėjimui, ir barstant kelius nuvalus sniegą. Gatvėse sniegą reikia valyti tik prasidėjus jam arba pūstymui, nes negalima

leisti, kad sniegas susikauotų dideliais sluoksniais. A ir B klasės gatvėse priežiūra žiemą vykdoma dviem pamainoms, o C ir D klasės gatvėse, kuriose eismo intensyvumas yra mažesnis nei 240 aut./h ir nevažiuoja viešasis transportas, gali būti valoma ir barstomas slydimą mažinančiomis medžiagomis pavojinguose gatvės ruožuose, o atlikus pirmaelius darbus magistralinėse arba greito eismo gatvėse (Burinskienė ir kt., 2011; Rimkus, 2004). Prasidėjus plikledžiui ledą pirmiausiai reikia šalinti pavojinguose ruožuose, prie kurių priskiriami ruožai su blogu matomumu, staigiais posūkiais, stačiomis nuokalnėmis, vieno lygio sankryžos, nuo tiltų, viadukų ir privažiavimai prie jų, viešojo transporto sustojimo vietos ir tos vietos, kur ypač dažnai tenka stabdyti. Frikcinių ir cheminių medžiagų mišinį, kurį sudaro 8% techninis natrio chloridas (NaCl), kalcio chloridas (CaCl₂) arba jų mišiniai, rekomenduojama:

- tiesiuose ruožuose, kuriuose išilginis nuolydis iki 2 %, paskleisti:
 - sningant – nuo 0,1 iki 0,2 m³/1000 m²;
 - dangai apledėjus – nuo 0,2 iki 0,4 m³/1000 m² (kai eismas neintensyvus);
- posūkiuose, didesnėse kaip 2 % nuokalnėse ir staigaus stabdymo vietose:
 - sningant – nuo 0,2 iki 0,4 m³/1000 m²;
 - dangai apledėjus – nuo 0,3 iki 0,5 m³/1000 m² (kai eismas intensyvus);
- sningant 2–4 mm/val. ir didesnių intensyvumų mišinį reikia pradėti barstyti po 15–20 min. prasidėjus sniegui;
- sningant 0,5–2 mm/val. ir mažesnių intensyvumų mišinį reikia pradėti barstyti po 30–45 min. prasidėjus sniegui (Burinskienė ir kt., 2011; Rimkus, 2004).

Anot Chango ir kt. (1994) apsauga nuo ledo – tai praskiestų koncentracijų skystų ledą šalinančių chemikalų naudojimas, kurie naudojami prieš žiemos audrą arba jos pradžioje. Tai leidžia ledą šalinančią cheminę medžiagą laikyti ant dangos paviršiaus ir neleidžia sniegui sulipti su danga. Sniegas nesudaro kieto sluoksnio, todėl arimas ir vėlesnis sniego valymas yra lengvesnis ir efektyvesnis (Chang et al., 1994).

JAV kiekviena valstija naudoja savo normatyvinius dokumentus kelių priežiūrai žiemą, todėl skiriasi ir kelių priežiūros lygiai. Pagrindinis rodiklis, į kurį žiūri valstijos – tai kelio ir rato sankabumas ir ledo sluoksnio tirpinimo greitis („Winter Sanding...“, 2012). Be to, naudojimas keliuose cheminių SMM turi prioritetą prieš frikcinės medžiagas dėl jų mažų išlaidų ir prieinamumo. Frikcinės medžiagas, tokie kaip smėlis, žvyras, skalda, naudojami tik tais atvejais, jeigu nusimato labai staigus oro temperatūros kritimas arba nusimato žemos oro temperatūros ilgas laikotarpis. Daugmetinė patirtis parodė, kad dangos apledėjimo prevencijai sunaudojama trigubai mažiau lėšų nei susiformavusio ledo šalinimui. Kaip pavyzdys, Otavoje, Kanados sostinėje, išankstinis NaCl tirpalo paskleidimas sumažina net 20 % medžiagos

naudojimą, lyginant su priežiūra be išankstinio paskleidimo. JAV „žiemės šlifavimo gairėse“ taip pat rekomenduojama naudoti sudrėkinta druska dėl jos efektyvumo lyginant su sausa SMM. Keliuose, kurių dangos temperatūra yra aukštesnė nei -2°C , nerekomenduojama naudoti kalcio ar magnio chlorido, nes jie sugers drėgmę ir taps slidūs. 1.3 lentelėje pateikti reikalavimai Minestos valstijos tirpalo paskleidimo ant kelio dangos. Įdomu tai, kad šioje valstijoje plačiai naudojamas MgCl_2 tirpalas prevencijai. 1.4 lentelėje pateikti slidumą mažinančių priemonių naudojimo kiekiai kai kuriuose Kanados miestuose. 2006–2007 metų žiemai Vaughano miestas sunaudavo 21014,59 t akmens druskos ir 465 t smėlio (smėlis naudojamas tik ant šaligatvių ir žvyro keliuose), o vidurkis penkerių metų (2002–2007 m.) yra 21929 t akmens druskos ir 1525 t smėlio („Winter Sanding...“, 2012).

1.3 lentelė. Minesotos kelių priežiūrai žiemą rekomendacijos („Winter Sanding...“, 2012)

Sąlygos	Litrai/km vienai juostai	
	MgCl_2	Druskos sūrymas
Reguliariai suplanuotos programos	35–59	47–94
Prieš šarmą ar juodą ledą	35–59	47–94
Prieš nestiprų ar vidutinį sniegą	35–59	47–118

1.4 lentelė. Toronto ir Vaughano kelių priežiūrai žiemą rekomendacijos („Winter Sanding...“, 2012)

Kelio klasė	Priežiūros tipas	Tirpiklis	Naudojimo norma (kg/km vienos juostos)	Terminas ledo šalinimo darbams atlikti
Torontas				
Greitkelis	Plika danga	Akmens druska	70 / 140 / 180	2-3 cm sniego ir sningant per 1–2 val.
Paskirstomieji keliai	Plika danga	Akmens druska	70 / 140/ 180	5 cm sniego per 2–3 val.
Privažiojamieji keliai	Viduryje plika danga	Akmens druska	70 / 90	8 cm sniego ir sustojus snigti per 4–6 val
Vietiniai	Saugi ir pravažiuojama danga	Akmens druska	70 / 90	8 cm sniego ir sustojus snigti per 8–12 val
Vienos siauros juostos keliai	Saugi ir pravažiuojama danga	Akmens druska	180	Per 24 val
Vaughanas				
Pagrindiniai keliai	Plika danga	100 % akmens druska	170	5 cm sniego ir per 4 valandas po snigimo pabaigos
Pagrindiniai keliai	Plika danga	100 % akmens druska	130	2-4 cm sniego ir per 4 valandas po snigimo pabaigos
Pagrindiniai keliai	Plika danga	100 % akmens druska	85	<2 cm sniego ir per 4 valandas po snigimo pabaigos

Kelio klasė	Priežiūros tipas	Tirpiklis	Naudojimo norma (kg/km vienos juostos)	Terminas ledo šalinimo darbams atlikti
Antriniai keliai	Dalinai plika danga	100 % akmens druska	170	5 cm sniego ir per 12 valandas po snigimo pabaigos
Antriniai keliai	Dalinai plika danga	100 % akmens druska	130	2–4 cm sniego ir per 12 valandas po snigimo pabaigos
Antriniai keliai	Dalinai plika danga	100 % akmens druska	85	<2 cm sniego ir per 12 valandas po snigimo pabaigos
Vienos siauros juostos keliai	Saugi ir pravažiuojama danga	100 % akmens druska	130	2 ir daugiau cm sniego ir sustojus snigti per 24 val

Švedijoje vienintelė ledo šalinimui naudojama cheminė medžiaga yra NaCl (akmens druska). CaCl_2 anksčiau buvo naudojamas ribotai, daugiausia NaCl sudrėkinimui, tačiau šiuo metu jis visai nenaudojamas. Pagrindinė to priežastis yra neigiamas poveikis betonui, kurį parodė kai kurie tyrimai. Anksčiau dar buvo vykdomi bandymai su CMA, tačiau dėl jos kainos buvo atsisakyta naudoti keliuose. Naudojamas keliams barstyti NaCl turi būti 98 % grynumo ir ne daugiau kaip 100 g kalio arba natrio ferocianido tonoje NaCl. NaCl grūdelių dydis nurodomas granulimetrinė sudėtis, kur didžiausias leistinas grūdelių dydis yra apie 3–4 mm („Winter maintenance ...“, 2002). 1.3 lentelėje yra pateikti 7 m pločio keliui naudojamas paskleidžiamų SMM kiekiai Švedijoje. Didžiausias naudojamas NaCl kiekis ledo šalinimui yra 40 g/m² sudrėkintos druskos arba tirpalo (sūrymo) nuo –10°C iki –5°C temperatūros intervale, kai lyja lijundra ir kai susidaro plonas „juodo“ ledo sluoksnis esant sausam orui.

1.5 lentelė. Ledo šalinimui reikalingi NaCl kiekiai esant skirtingoms oro sąlygoms, kai kelio plotis 7 metrai, pagal Švedijos normatyvinius dokumentus („Winter maintenance ...“, 2002)

Kelio sąlygos	Numatoma paviršiaus temperatūra, °C	Barstytuvo reguliavimas				Druskos suvartojimas 10 km		Sūrymo sąnaudos m3/10 km
		Iš anksto sudrėkinta druska		Sūrymas (20 % tirpalas)		Iš anksto sudrėkinta druska, kg	Sūrymas (20 % tirpalas), kg	
		Plotis, m	g/m ²	Plotis, m	g/m ²			
Iš anksto sudrėkinta druska paskleisti prieš temperatūros kritimą								
Sausas arba drėgnas	±0 / –5	4	6	7	14	240	225	0,8
	–5 / –10		11		23	440	370	1,4
Šlapias	±0 / –5	4	8	7	19	320	306	1,1
	–5 / –10		13		28	520	451	1,7
Šlapias prieš sniegą	±0 / –5	4	21			840		
	–5 / –10		25			1000		
Priemonės, kurių reikia imtis sningant. Kombinuotos operacijos. Paviršiaus užšalimo pavojus.								

Kelio sąlygos	Numatoma paviršiaus temperatūra, °C	Barstytuvo reguliavimas				Druskos suvartojimas 10 km		Sūrymo sąnaudos m3/10 km
		Iš anksto sudrėkinta druska		Sūrymas (20 % tirpalas)		Iš anksto sudrėkinta druska, kg	Sūrymas (20 % tirpalas), kg	
		Plotis, m	g/m ²	Plotis, m	g/m ²			
Sniegas 1–5 cm	±0 / –5 –5 / -10	2 x 3	12 18			720 1080		
Sniegas > 5 cm	±0 / –5 –5 / –10	2 x 3	18 24			1080 1440		
Priemonės, kurių reikia imtis ant „juodo“ ledo esant sausam orui.								
Ledo susidarymas	±0 / –5 –5 / –10	4	11 15	7	23 33	440 600	370 531	1,4 2,0
Plonas ledas	±0 / –5 –5 / –10	4	21 25	7	25 40	840 1000	563 644	2,1 2,4
Storas ledas	±0 / –5 –5 / -10	4	25 25			1000 1000		
Priemonės, kurių reikia imtis lijanč liundrai								
Ledo susidarymas	±0 / –5 –5 / –10	4	32 40			1280 1600		

Austrijos keliuose dažniausiai naudojamas NaCl. Be to, kaip apsauga nuo apledėjimo automobilinių kelių priežiūrai naudojamas CaCl₂ ir MgCl₂ bei jų mišiniai. NaCl naudojamas esant temperatūrai iki –10 °C, o esant žemesnei temperatūrai yra tinkamesni MgCl₂ ir CaCl₂. Atsižvelgiant į oro sąlygas, išberiamas grynos druskos kiekis yra 5–40 g/m² (Arbeitspapier Nr. 11., 2012). Darbo dokumentas Nr. 11 (2012) nurodo, kad drėgnos druskos mišinys, sudarytas iš kietos NaCl druskos su NaCl, CaCl₂ arba MgCl₂ tirpalais, priešingai nei sausa NaCl druska geriau sukimba su keliu ir greičiau tirpdo sniegą arba ledą, todėl yra efektyvesnė esant plikledžiui. Drėgnos druskos mišinys mažiau išpustomas vėju nuo kelio, todėl naudojant jį sutaupoma iki 30 % jos kiekio ir mažiau druskos patenka į dirvožemį, ant augalų ir ant korozijai jautrių konstrukcinių (tiltų, motorinių transporto priemonių) elementų. Paprastai barstoma drėgna druska FS 30 ar didesnės koncentracijos, t. y. druskos tirpalo dalis šiame mišinyje sudaro 30 % masės, sausos druskos dalis – 70 % masės. Naudojami ir didesnės koncentracijos druskos tirpalai FS 50 arba FS 70 (RVS 12.04.16, 2017).

Lenkijos keliams žiemos slidumui pašalinti ir sušvelninti naudojamos cheminės ir šiurkštinimo (frikinės) medžiagos. Pagal „Kelių priežiūros žiemą gairės“ naudojami tokios cheminės medžiagos: sausa akmens druska NaCl, sūrymas – tai NaCl arba CaCl₂ tirpalas, kurio koncentracija 20–25 %, šlapia (sodrėkinta) druska – 30% sūrymo (NaCl arba CaCl₂ tirpalas, kurio koncentracija 20–25 %) su 70 % sausos NaCl druskos, techninis CaCl₂, kurio mišinyje

grynos medžiagos yra 77–80 %, magnio chloridas $MgCl_2$. Taip pat naudojami NaCl ir $CaCl_2$ arba $MgCl_2$ mišiniai masių santykiu:

- 4:1 – 80 % NaCl+20 % $CaCl_2$,
- 3:1 – 75 % NaCl+25 % $CaCl_2$,
- 2:1 – 67 % NaCl+33 % $CaCl_2$ (Bieńka ir kt., 2006).

1.4 lentelėje yra pateikti prevenciniam apibarstymui ir plonų ledo ir sniego sluoksnių pašalinimui skirtų medžiagų kiekiai. Didžiausias naudojamas SMM kiekis yra iki 30 g/m^2 : prevencijai grynos sausos arba sudrėkintos NaCl druskos nuo -10°C iki -7°C temperatūros intervale, likvidavimui grynos sausos arba sudrėkintos NaCl druskos nuo -10°C iki -7°C temperatūros intervale, likvidavimui NaCl ir $CaCl_2$ druskų mišinio žemiau -10°C .

1.6 lentelė. Prevenciniam apibarstymui ir plonų ledo ir sniego sluoksnių pašalinimui skirtų SMM kiekiai Lenkijos keliuose (Bieńka ir kt., 2006)

Nr.	Veiklos tipas ir paviršiaus būklė	Temperatūra, $^\circ\text{C}$	NaCl druska (sausas arba šlapia), g/m^2	NaCl ir $CaCl_2$ mišiniai santykiu nuo 4:1 iki 3:1, g/m^2	NaCl ir $CaCl_2$ mišiniai santykiu 2:1, g/m^2	Šiurkštinimo medžiagos, g/m^2
1	Prevencija: - juodas ledas - ledas - šarma	Iki -2	Iki 15	-	-	-
		$-7 \dots -10$	20–30	Iki 15	-	
		< -10	-	15–20	-	
2	Apsauga nuo sniego užšalimo ant dangos	Iki -2	Iki 10	-	-	-
		$-3 \dots -6$	10–15	-	-	
		$-7 \dots -10$	15–20	Iki 15	-	
		< -10	-	15–20	-	
3	Likvidavimas: - juodas ledas - šarma - ploni suspausto arba ledinio sniego sluoksniai - šviežio sniego likučiai po greiderio pravažiavimo	Iki -2	Iki 20	-	-	60–150
		$-3 \dots -6$	20–25	-	-	
		$-7 \dots -10$	25–30	Iki 20	-	
		< -10	-	20–30	Apie 25	

Vieni iš pagrindinių Lietuvoje naudojamų normatyvinių dokumentų, kuriame yra nurodyti slidumą mažinančių medžiagų barstymo kiekių rekomendacijos yra „Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių priežiūros žiemą vadovas“ (KPV, 2015) ir „Darbo, mechanizmų ir medžiagų sąnaudų kelių priežiūros darbams normatyvų rinkinys DMMS-KP 06“ (2006). Šių dokumentų rekomendacijos yra paremtos užsienio gerosios praktinės patirtimi, įvairiais teoriniais apskaičiavimais ir mokslinių tyrimo rezultatais. Pagal KPV (2015)

dokumentą yra išskiriamos 4 kelio dangos būklės (susiformavusio užšalusio vandens ant dangos paviršiaus): šarma, plikledis, lijundra ir supluktas sniegas. Rekomendacijose nurodyta medžiagų panaudojimo kiekiai, esant skirtingai oro temperatūrai, atliekant kelio dangos užšalimo prevencija arba likviduojant slidumą po atsiradimo, kai nepadėjo prevencijos veiksmai. Deja, KPV (2015) dokumente yra plačiai aprašytas tik NaCl panaudojimo rekomendacijos, nors aprašytos ir kitų medžiagų savybės, o DMMS-KP 06 (2006) dokumente aprašytas panaudojimas CaCl_2 bei NaCl, tačiau alternatyvių SMM taip pat nepateikta.

Šarma apibrėžiama pagal KPV (2015) normatyvinį dokumentą yra „plonas, panašus į sniegą ledo pavidalo sluoksnis“. Šarma ant kelio dangos atsiranda, kai oro temperatūra nusileidžia žemiau nei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, o oro drėgnis yra daugiau nei 85 %. Kaip pavyzdys, pateikiamas dokumento NaCl naudojimas prevencijos metu, kuris, priklausomai nuo kelio priežiūros lygio, iš anksto ant kelio dangos paskleidžiamas tirpalo pavidalu arba sudekintos druskos pavidalu. T.y jei kelio dangos temperatūra $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai paskleidžiama 10 ml druskos tirpalo arba 5 g sudrėkintos druskos 1 m^2 , jei $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai paskleidžiama 13 ml druskos tirpalo arba 8 g sudrėkintos druskos 1 m^2 , jei $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai paskleidžiama 15 ml druskos tirpalo arba 10 g sudrėkintos druskos 1 m^2 , jei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai paskleidžiama 15 g sudrėkintos druskos 1 m^2 , o jei kelio dangos temperatūra žemesnė nei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai toks gamtos reiškinys nėra tikėtinas. Druskos tirpalas naudojamas iki $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Slidumo šalinimui rekomenduojamos tokie kiekiai: esant $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 15 ml druskos tirpalo arba 10 g sudrėkintos druskos 1 m^2 , esant $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, paskleidžiama 23 ml druskos tirpalo arba 15 g sudrėkintos druskos 1 m^2 , esant $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, paskleidžiama 30 ml druskos tirpalo arba 20 g sudrėkintos druskos 1 m^2 , esant $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, paskleidžiama 30 g sudrėkintos druskos 1 m^2 , esant žemesnei nei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ kelio dangos temperatūrai, nėra tikėtinas toks gamtos reiškinys (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

1.7 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai šarmai (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015)

Rekomenduojama priemonė šarmai	Medžiagų panaudojimo norma taikoma m^2 , esant prognozuojamai kelio dangos temperatūrai				
	Iki $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$	Iki $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	Iki $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	Iki $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Žemiau $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$
I. Prevencija:					
– druskos tirpalo išpurškimas	10 ml	13 ml	15 ml	–*	Nėra tikėtina
– sudrėkintos druskos mišinio barstymas	5 g	8 g	10 g	15 g	Nėra tikėtina
II. Slidumo šalinimas (jei prevencija nepadėjo likviduoti slidumo):					
– druskos tirpalo išpurškimas	15 ml	23 ml	30 ml	–*	Nėra tikėtina
– sudrėkintos druskos mišinio barstymas	10 g	15 g	20 g	30 g	Nėra tikėtina
* Druskos tirpalas naudojamas iki $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, esant žemesnei temperatūrai barstyti sudrėkintomis druskomis. Druskos tirpalo purškimui naudoti NaCl tirpalą (mažiausiai 20 %).					

Plikledis išskiriamas į du susidarimo būdus – užšalant drėgmei arba vandeniui. Plikledis užšalant drėgmei apibrėžiamas pagal normatyvinį dokumentą kaip susidaręs plonas, skaidrus ledo sluoksnis, kitaip dar vadinamas „juodu ledu“. Ant kelio dangos atsiranda, kai oro temperatūra nusileidžia žemiau nei 0 °C, o oro drėgnis yra daugiau nei 90–100 %, galimai atsiranda rūko arba dulksnos metų kai danga aprasuota. Kaip pavyzdys, pateikiamos tokios rekomendacijos prevencijai: esant –1 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 10 ml druskos tirpalo arba 5 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –3 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 15 ml druskos tirpalo arba 10 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –6 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 22,5 ml druskos tirpalo arba 15 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –10 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 25 g sudrėkintos druskos 1 m², esant žemesnei nei –10 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 30 g sudrėkintos druskos 1 m². Druskos tirpalas naudojamas iki –6 °C. Slidumo šalinimui rekomenduojamos tik sudrėkintos druskos mišinio barstymas: esant –1 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 10 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –3 °C temperatūrai, paskleidžiama 20 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –6 °C temperatūrai, paskleidžiama 30 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –10 °C ir žemesnei temperatūrai, paskleidžiama 40 g sudrėkintos druskos 1 m² (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

1.8 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai plikledžiui, užšalant drėgmei (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015)

Rekomenduojama priemonė plikledžiui, užšalant drėgmei	Medžiagų panaudojimo norma taikoma m ² , esant prognozuojamai kelio dangos temperatūrai				
	Iki –1 °C	Iki –3 °C	Iki –6 °C	Iki –10 °C	Žemiau –10 °C
I. Prevencija:					
– druskos tirpalo išpurškimas	10 ml	15 ml	22,5 ml	–*	–*
– sudrėkintos druskos mišinio barstymas	5 g	10 g	15 g	25 g	30 g
II. Slidumo šalinimas (jei prevencija nepadėjo likviduoti slidumo):					
– sudrėkintos druskos mišinio barstymas	10 g	20 g	30 g	40 g	40 g
* Druskos tirpalas naudojamas iki –6 °C, esant žemesnei temperatūrai barstyti sudrėkintomis druskomis. Druskos tirpalo purškimui naudoti NaCl tirpalą (mažiausiai 20 %).					

Plikledis užšalant vandeniui apibrėžiamas pagal normatyvinį dokumentą kaip ant kelio dangos susidaręs vanduo užšalant suformuoja ledo sluoksnį. Plikledis ant kelio dangos atsiranda, kai oro temperatūra teigiama, artima 0 °C, aplinkoje vyrauja šlapdriba, lietus, rūkas arba tirpstantis sniegas, dėl ko vanduo užsilieka ant dangos. Kaip pavyzdys, pateikiamos tokios rekomendacijos prevencijai: esant –1 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 23 ml druskos tirpalo arba 15 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –3 °C temperatūrai, paskleidžiama 30 ml druskos tirpalo arba 20 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –6 °C temperatūrai,

paskleidžiama 45 ml druskos tirpalo arba 30 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –10 °C ir žemesnei temperatūrai, paskleidžiama 40 g sudrėkintos druskos 1 m². Slidumo šalinimui rekomenduojamos tik sudrėkintos druskos mišinio barstymas: kai kelio dangos temperatūra yra –1 °C, paskleidžiama 30 g sudrėkintos druskos 1 m², kai –3 °C ir žemesnė – paskleidžiama 40 g sudrėkintos druskos 1 m² (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

1.9 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai plikledžiui, užšalant vandeniui (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015)

Rekomenduojama priemonė plikledžiui, užšalant vandeniui	Medžiagų panaudojimo norma taikoma m ² , esant prognozuojamai kelio dangos temperatūrai				
	Iki –1 °C	Iki –3 °C	Iki –6 °C	Iki –10 °C	Žemiau –10 °C
I. Prevencija:					
– druskos tirpalo išpurškimas	10 ml	15 ml	22,5 ml	–*	–*
– sudrėkintos druskos mišinio barstymas	5 g	10 g	15 g	25 g	30 g
II. Slidumo šalinimas (jei prevencija nepadėjo likviduoti slidumo):					
– sudrėkintos druskos mišinio barstymas	10 g	20 g	30 g	40 g	40 g
* Druskos tirpalas naudojamas iki –6 °C, esant žemesnei temperatūrai barstyti sudrėkintomis druskomis. Druskos tirpalo purškimui naudoti NaCl tirpalą (mažiausiai 20 %).					

Lijundra atsiranda kai skysti krituliai patekę ant įšalusio paviršiaus sudaro skaidrų ledo sluoksnį. Sąlygos susidarymui yra tokie: prieš lietų, dulksną arba kitus kritulius kelio danga yra sausa ir jos temperatūra kartu su sankasa žemesnė nei 0 °C. Kaip pavyzdys, prevencijai naudojamos ir druskos tirpalas, ir sudrėkinta druska: esant –1 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 45 ml druskos tirpalo arba 30 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –3 °C ir žemesnei kelio dangos temperatūrai paskleidžiama 60 ml druskos tirpalo arba 40 g sudrėkintos druskos 1 m², tačiau tirpalas naudojamas tik iki –6 °C. Slidumo šalinimui rekomenduojama naudoti iki 40 g sudrėkintos druskos mišinio barstymą, tačiau nerekomenduojama vykdyti šią priemonę dėl kelių priežasčių: reikalingi per dideli medžiagų kiekiai barstymui, laikui bėgant susiformavęs ledas ištirps dėl šilto oro ir lietaus. Išskirti galima daryti jeigu labai menki kritulių kiekiai, t.y. nedidelis purškiantis lietus arba dulksna (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

1.10 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai lijundrai (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015)

Rekomenduojama priemonė lijundrai	Medžiagų panaudojimo norma taikoma m ² , esant prognozuojamai kelio dangos temperatūrai				
	Iki –1 °C	Iki –3 °C	Iki –6 °C	Iki –10 °C	Žemiau –10 °C
I. Prevencija					
– druskos tirpalo išpurškimas	45 ml	60 ml	60 ml	–*	Nėra tikėtina

– sudrėkintos druskos mišinio barstymas	30 g	40 g	40 g	40 g	Nėra tikėtina
II. Slidumo šalinimas					
Papildomas slidumo šalinimas druskomis nėra tikslingas, nes reikalingi per dideli medžiagų kiekiai. Ledas laikui bėgant ištirpsta dėl šilto oro ir lietaus. Ledo tirpdytas tik esant labai menkiems kritulių kiekiams (nedidelis purškiantis lietus, dulksna).	30 g	40 g	40 g	40 g	Nėra tikėtina
* Druskos tirpalas naudojamas iki –6 °C, esant žemesnei temperatūrai barstyti sudrėkintomis druskomis. Druskos tirpalo purškimui naudoti NaCl tirpalą (mažiausiai 20 %).					

Supluktas sniegas tai iškritęs sniegas, kuris lieka ant kelio dangos ir važiuojant transporto priemonėms jis prispaudžiamas ir sutankinamas. Supluktas sniegas susidaro kai kelio danga yra sausa, vėjas iki 6 m/s, pradeda tik snigti ir oro temperatūra yra žemiau 0 °C. Kaip pavyzdys, prevencijos metų rekomenduojami tokie paskleidimo kiekiai: esant –1 °C kelio dangos temperatūrai, paskleidžiama 15 ml druskos tirpalo arba 10 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –3 °C temperatūrai, paskleidžiama 23 ml druskos tirpalo arba 15 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –6 °C temperatūrai, paskleidžiama 30 ml druskos tirpalo arba 20 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –10 °C ir žemesnei temperatūrai, paskleidžiama 20 g sudrėkintos druskos 1 m². Šiuo atveju reikalinga vykdyti slidimo šalinimą kartu su sniego valymu. Jeigu tęsiasi intensyvus snygis, rekomenduojama kartu su sniego valymu paskleisti 10 g sudrėkintos druskos iki –3 °C ir 15 g žemiau nei –3 °C 1 m². Jeigu snigti nustojo, tai rekomenduojama kartu su sniego valymu paskleisti: esant –1 °C kelio dangos temperatūrai 20 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –3 °C temperatūrai, paskleidžiama 25 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –6 °C temperatūrai, paskleidžiama 30 g sudrėkintos druskos 1 m², esant –10 °C ir žemesnei paskleidžiama 40 g sudrėkintos druskos 1 m² (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015).

1.11 lentelė. Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų panaudojimo normatyvai supluktam sniegui (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015)

Rekomenduojama priemonė supluktam sniegui	Medžiagų panaudojimo norma taikoma m ² , esant prognozuojamai kelio dangos temperatūrai				
	Iki –1 °C	Iki –3 °C	Iki –6 °C	Iki –10 °C	Žemiau –10 °C
I. Prevencija (rekomenduotina prieš snygį)					
– gryno druskos tirpalo išpurškimas	15 ml	23 ml	30 ml	–*	–*
– sudrėkintos druskos mišinio barstymas	10 g	15 g	20 g	20 g	20 g
II. Sniego valymas ir slidumo šalinimas (tęsiantis intensyviu snygiu)					
– sniego valymas ir sudrėkintos druskos mišinio barstymas	10 g	10 g	15 g	15 g	15 g
III. Sniego valymas ir slidumo šalinimas (nustojus snigti)					
– sudrėkintos druskos mišinio barstymas Barstomasis kiekis priklauso nuo po valymo likusio sniego ir prieš tai taikytų priemonių.	20 g	25 g	30 g	40 g	40 g

Rekomenduojama priemonė supluktam snigui	Medžiagų panaudojimo norma taikoma m ² , esant prognozuojamai kelio dangos temperatūrai				
	Iki –1 °C	Iki –3 °C	Iki –6 °C	Iki –10 °C	Žemiau –10 °C
* Druskos tirpalas naudojamas iki –6 °C, esant žemesnei temperatūrai barstyti sudrėkintomis druskomis. Druskos tirpalo purškimui naudoti NaCl tirpalą (mažiausiai 20 %).					

Taigi, kaip matoma iš KPV (2015) dokumento, mažėjant temperatūrai, paskleidžiamas druskos kiekis didėja. Druskos tirpalą rekomenduojama taikyti tik iki –6 °C. Susidariusiam slidumui šalinti dažniausiai naudojama daugiau druskos mišinio kiekius nei prevencijai.

1.12 lentelė. NaCl, CaCl₂ ir jų mišinio paskleidimo normos 1 m² mažinant kelio dangos slidumą (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015)

Cheminės medžiagos	Naudotinos iki °C	Ledas (storis 1 mm)				Prispaustas sniegas (storis 1 mm)				Purus sniegas (storis 1 mm)			
		Paskleidimo normos g/m², kai oro temperatūra °C											
		0 ~ -5	-5 ~ - 10	-10 ~ - 15	-15 ~ - 20	0 ~ -5	-5 ~ - 10	-10 ~ - 15	-15 ~ - 20	0~ -5	-5 ~ - 10	-10 ~ - 15	-15 ~ - 20
Druskos tirpalu sudrėkintos arba sausos medžiagos													
Techninė druska NaCl	-15	20	40	–	–	15	30	–	–	10	20	–	–
Kalcio chloridas (CaCl₂)	-35	30	60	80	100	25	40	60	80	20	30	40	50
Natrio ir kalcio chloridų mišinys (88:12)	-20	25	50	75	–	20	40	60	–	15	25	40	–

1.10 lentelėje pateiktos normos sudarytos 1 mm storio ledo ar prispausto sniego sluoksniui šalinti. Kai storis didesnis, chloridai skleidžiami papildomai. Ledo šalinimui sunaudojama daugiausiai druskos kiekio lyginant su prispaustu arba purų sniegu, tačiau visais atvejais NaCl naudojamas tik iki –10 °C. Temperatūros intervale nuo –5 iki 0 °C ledo šalinimui išbarstoma 20 g/m², o nuo –10 iki 5 °C – išbarstoma 40 g/m². CaCl₂ barstomas iki –20 °C, tačiau jų kiekiai yra didesni lyginant su NaCl arba jų mišinių 88:12 (NaCl:CaCl₂): prie –5 °C ledo šalinimui naudojama 30 g/m² CaCl₂, 20 g/m² NaCl, 25 g/m² mišinio, prie –10 °C ledo šalinimui naudojama 60 g/m² CaCl₂, 40 g/m² NaCl, 50 g/m² mišinio, prie –15 °C ledo šalinimui naudojama 80 g/m² CaCl₂, NaCl nenaudojamas, 75 g/m² mišinio, prie –20 °C ledo šalinimui naudojama tik 100 g/m² CaCl₂, o NaCl ir mišinys nenaudojami (Čygas ir kt., 2016; KPV, 2015). Lyginant su Švedijos ir Lenkijos rekomendacijomis slidumui mažinti, Lietuvos

rekomendacijose yra pateikti panašūs SMM kiekiai prie panašių kelio dangos ir aplinkos sąlygų ir didesni kiekiai.

DMMS-KP 06 (2006) dokumente aprašytas CaCl_2 bei NaCl druskų panaudojimas keliuose. Dokumentas nurodo 3 dangos slidumo atvejus (purus sniegas, prispaustas sniegas, ledas), kuriems mažinti naudojama sausa arba sudrėkinta tirpalų (3:1 sausos druskos prie tirpalo) medžiagos. Sudrėkinti sausą NaCl druską naudojamas 21 % koncentracijos NaCl tirpalas (1.11 lentelė), CaCl_2 – 27 % koncentracijos CaCl_2 tirpalas (1.12 lentelė). NaCl druska taip pat nenaudojama žemesnėse temperatūrose nei -10°C . 1 mm storiui prie -10°C NaCl naudojama 40 g/m^2 , 3 mm storiui prie -5°C NaCl naudojama 60 g/m^2 . 1 mm storiui prie -10°C CaCl_2 naudojama 40 g/m^2 , 1 mm storiui prie -15°C CaCl_2 naudojama 70 g/m^2 , 3 mm storiui prie -5°C CaCl_2 naudojama 60 g/m^2 . Sudrėkintų NaCl ir CaCl_2 druskų 1 mm storiui prie -10°C naudojama 40 g/m^2 .

1.13 lentelė. NaCl druskos naudojimas barstymui, mažinant slidumus (DMMS-KP 06, 2006)

Sluoksnių pavadinimai ir storiai		Sausa druska ($\text{kg}/1000\text{ m}^2$)				Šlapia druska, iš viso (sausas + tirpalas) ($\text{kg}/1000\text{ m}^2$)		
						Sausa druska, iš viso ($\text{kg}/1000\text{ m}^2$)		
						drėkinant (3:1) 21 % NaCl tirpalu		
						0 °C	-5 °C	-10 °C
Purus sniegas	1 cm	10	10	20	–	<u>10,00(7,50+2,50)</u> 8,01	<u>10,00(7,50+2,50)</u> 8,01	<u>20,00(15,00+5,00)</u> 16,03
	2 cm	10	20	40	–	<u>10,00(7,50+2,50)</u> 8,01	<u>20,00(15,00+5,00)</u> 16,03	<u>40,00(30,00+10,00)</u> 32,06
	3 cm	15	30	60	–	<u>15,00(11,25+3,75)</u> 12,02	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,05	<u>60,00(45,00+15,00)</u> 48,09
Prispaustas sniegas	3 mm	10	15	30	–	<u>10,00(7,50+2,50)</u> 8,01	<u>15,00(11,25+3,75)</u> 12,02	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,05
	6 mm	20	30	60	–	<u>20,00(15,00+5,00)</u> 16,03	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,05	<u>60,00(45,00+15,00)</u> 48,09
	10 mm	30	45	–	–	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,05	<u>45,00(33,75+11,25)</u> 36,07	— —
Ledas	1 mm	15	20	40	–	<u>15,00(11,25+3,75)</u> 12,02	<u>20,00(15,00+5,00)</u> 16,03	<u>40,00(30,00+10,00)</u> 32,06
	2 mm	30	40	–	–	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,05	<u>40,00(30,00+10,00)</u> 32,06	— —
	3 mm	45	60	–	–	<u>45,00(33,75+11,25)</u> 36,07	<u>60,00(45,00+15,00)</u> 48,09	— —

* Esant temperatūrai, žemesnei kaip minus 10°C , šlapios druskos paskleidimo norma, atsižvelgiant į efektyvumą, gali būti padidinta ir neatitikti nurodytos

1.14 lentelė. CaCl_2 druskos naudojimas barstymui, mažinant slidumus (DMMS-KP 06, 2006)

Sluoksnių pavadinimai ir storiai		Sausa druska ($\text{kg}/1000\text{ m}^2$)				Šlapia druska, iš viso (sausas + tirpalas) ($\text{kg}/1000\text{ m}^2$)			
						Sausa druska, iš viso ($\text{kg}/1000\text{ m}^2$)			
						drėkinant (3:1) 27% CaCl_2 tirpalu			
						0 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C*
Purus sniegas	1 cm	10	10	20	30	<u>10,00(7,50+2,50)</u> 8,18	<u>10,00(7,50+2,50)</u> 8,18	<u>20,00(15,00+5,00)</u> 16,35	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,53

Sluoksnių pavadinimai ir storiai	Sausa druska (kg/1000 m ²)	Šlapią druska, iš viso (sausą + tirpalas) (kg/1000 m ²)							
		Sausą druska, iš viso (kg/1000 m ²)							
		drėkinant (3:1) 27% CaCl ₂ tirpalu							
		0 °C	–5 °C	–10 °C	–15 °C	0 °C	–5 °C	–10 °C	–15 °C*
	2 cm	10	20	40	60	<u>10,00(7,50+2,50)</u> 12,26	<u>20,00(15,00+5,00)</u> 16,35	<u>40,00(30,00+10,00)</u> 32,71	<u>60,00(45,00+15,00)</u> 49,06
	3 cm	15	30	60	90	<u>15,00(11,25+3,75)</u> 12,26	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,53	<u>60,00(45,00+15,00)</u> 49,06	<u>90,00(67,50+22,50)</u> 73,59
Prispaustas sniegas	3 mm	10	15	30	50	<u>10,00(7,50+2,50)</u> 12,26	<u>15,00(11,25+3,75)</u> 12,26	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,53	<u>50,00(37,50+12,50)</u> 40,88
	6 mm	20	30	60	–	<u>20,00(15,00+5,00)</u> 16,35	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,53	<u>60,00(45,00+15,00)</u> 49,06	—
	10 mm	30	45	–	–	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,53	<u>45,00(33,75+11,25)</u> 36,79	—	—
Ledas	1 mm	15	20	40	70	<u>15,00(11,25+3,75)</u> 12,26	<u>20,00(15,00+5,00)</u> 16,35	<u>40,00(30,00+10,00)</u> 32,71	<u>70,00(52,50+17,50)</u> 57,24
	2 mm	30	40	–	–	<u>30,00(22,50+7,50)</u> 24,53	<u>40,00(30,00+10,00)</u> 32,71	—	—
	3 mm	45	60	–	–	<u>45,00(33,75+11,25)</u> 36,79	<u>60,00(45,00+15,00)</u> 49,06	—	—

* esant oro temperatūrai, žemesnei kaip minus 15 C, šlapios druskos paskleidimo norma, atsižvelgiant į efektyvumą, gali būti padidinta ir neatitikti nurodytos

Pagal KPV-DT 15 (2015) dokumento rekomendacijas, pradėjus snigti pirmasis barstytuvas važiuojant 40 km/h kuo arčiau skiriamosios juostos arba dangos ašies pagal eismo kryptį, 6 m kelio pločiui paskleidžia 1000 m² nuo 0,02 t iki 0,03 t druskų, kai mažas eismo intensyvumas, nuo 0,03 t iki 0,05 t, kai didelis eismo intensyvumas.

Vilniaus miesto savivaldybės teritorijoje galioja „Vilniaus miesto gatvių, pėsčiųjų ir dviračių takų priežiūros reikalavimų“ dokumentas, kuriame aprašyti naudojami gatvėse SMM ir jų panaudojimo zonos. NaCl, natrio ir kalcio chloridų mišinys, CaCl₂, MgCl₂, natrio arba kalio acetatai ir formiatai, CMA, chloridų mišiniai su inhibitoriais yra naudojami tokiose zonose: gatvės važiuojamoji dalis reprezentatyvioje miesto zonoje (druskų poveikiui jautriose zonose), gatvės važiuojamoji dalis su asfalto, betono, grindinio danga, šaligatvis, pėsčiųjų takas, laiptai (tiltų ir viadukų), pėsčiųjų aikštės ir skverai, dviračių eismo juosta, dviračių takas. Visiems zonų elementams priskiriami priežiūros lygiai.

Pagal išanalizuotus noramtyvinius dokumentus, galima teigti, kad SMM rūšys ir jų barstymo kiekiai priklauso tik nuo kelio dangos ir aplinkos sąlygų.

Daugeliuose mokslinių straipsniuose atliekant eksperimentus su ledo tirpdymu, yra nuorodą į Amerikos valstijų greitkelių ir transporto pareigūnų asociacijos SHRP H-332 (1992)

„Cheminių ledo tirpiklių vertinimo metodų vadovą“. Jame yra aprašytos mus dominančio eksperimentų metodikos: ledo tirpdymo efektyvumas ir įsiskverbimo gylis į ledą. Eksperimento metodai plačiau aprašyti vadovo B priede, kuriame aprašyti pagrindiniai cheminių ledo tirpiklių vertinimo metodai. Eksperimentui atlikti bus pasinaudojama: SHRP H-205.1 (1992) standartu, kuriame aprašytas kietųjų ledą tirpdančių cheminių medžiagų ledo tirpinimo bandymo metodas, SHRP H-205.2 (1992) standartu, kuriame aprašytas skystųjų ledą tirpdančių cheminių medžiagų ledo tirpinimo bandymo metodas, ir SHRP H-205.3 (1992) standartu, kuriame aprašytas kietų ledą tirpdančių cheminių medžiagų ledo įsiskverbimo bandymo metodas. Amerikos valstybinių kelių ir transporto pareigūnų asociacija rekomenduoja cheminių ledo tirpiklių (t.y. SMM) tyrimams vadovautis standarte pateiktomis metodikomis (AASHTO, 2022)

Shi ir Akinas (2010) savo darbe, pasinaudodami SHRP H-332 (1992) vadove aprašytais metodais, atliko 4 testus: diferencialinės skenuojančios kalorimetrijos (DSC) termogramos testas skystiems ledo šalintuvams, modifikuotas SHRP ledo tirpimo testas, skirtas kietiems ir skystiems ledo šalintuvams, modifikuotas SHRP ledo įsiskverbimo testas kietiems ir skystiems ledo šalintuvams, modifikuotas ledo sumažinimo testas, skirtas kietiems ir skystiems ledo šalintuvams. Anot jų, ledo tirpdymui skystieji CaCl_2 ir MgCl_2 yra veiksmingesni tirpikliai nei NaCl . Skystas, 30 % koncentracijos MgCl_2 tirpalas šiek tiek geresnis tirpinant ledą nei CaCl_2 , tačiau modifikuotas SHRP H-332 (1992) vadove aprašytas ledo tirpinimo testas parodė, kad kietas CaCl_2 veikia geriau nei MgCl_2 . Tuo pat metu, kietas NaCl aukštesnėse temperatūrose yra efektyvesnis ledo tirpinimui ir įsiskverbimui nei CaCl_2 ir MgCl_2 . Taip Shi ir Akinas teigia, kad SHRP H-205.1 (1992) standarto ledo tirpinimo pajėgumo bandymas gali būti netikslus, kai naudojamos standarte nurodytos eksperimentinės sąlygos. Jų gauti rezultatai bus palyginami su laboratorijoje gautais rezultatais 3 skyriuje. Tikslumą galima žymiai pagerinti, naudojant didesnę ledą tirpinančių cheminių medžiagų paskleidimo kiekius ir ilgesnį matavimo laiką, nei yra pasiūlyta SHRP H-205.1 (1992) standarte (Ružinskas et al., 2015). Ant ledo paskleidus NaCl druską, reikia skirti pakankamai laiko (pavyzdžiui, 60 min.), kad būtų išnaudotas visas jos potencialas (Shi et al., 2009). Pritariant šiam teiginiui, galima jį papildyti: bet kokiai SMM paskleidžiant ant ledo paviršiaus reikia skirti pakankamai laiko, kad būtų išnaudotas visas jos potencialas, nes tirpdant ledą, SMM praranda tirpinimo greitį dėl susidarančio sūrymo, kurio koncentracija mažėjimo tirpstant vis didesniam ledo kiekiui, kol tirpinimas visiškai nesustos.

Muthumani ir kt. (2014) rekomenduoja laboratoriniams tyrimams, jei įmanoma, naudoti aplinkos kamerą ir įtraukti eismo ir ledo šalinimo mechanizmų poveikį, siekiant didesnio realistiškumo. Išanalizavus SHRP H-332 (1992) vadovą ir kitų tyrėjų atliktus ledo šalinimo eksperimentus, gauta informacija galėtų padėti tyrėjams kurti naują metodiką, kuri leistų geriau

susieti laboratorinių ir lauko bandymų metodus, siekiant įvertinti ledo šalinimo ir apledėjimo prevencijos cheminių medžiagų veikimą (Muthumani et al., 2014).

Nixonas ir kt. (2005) atliko tyrimą su septyniais skystais ledo tirpikliais, išmatuotą pagal ledo įsiskverbimą, ledo tirpimo pajėgumą ir ledo sumažinimo potencialą kontroliuojamoje aplinkoje, siekdamas įvertinti įvairių sniegą tirpdančių cheminių medžiagų ledo šalinimo efektyvumą. Tyrimas buvo atliktas SHRP H-332 (1992) metodikos pagrindu su tam tikrais nukrypimais: 80 ml vandens, kad susidarytų ledas vietoj 130 ml, užpilama 5 ml skysto ledo tirpiklio vietoj 3,8 ml, o išlydytai daliai dekantuoti buvo naudojamas pipetė ir graduotas cilindras vietoj švirkšto. Tyrimo metu nustatyta, kad temperatūra turi tiesioginę ryšį su medžiagu ledo tirpimo pajėgumu ir išbarstytų medžiagų veikimas skiriasi. Tyrimą nerekomenduojama naudoti šio testo kokybės kontrolės tikslais, kadangi faktiniai ledo įsiskverbimo procesai pilnai neištirti. Eismo metu paskleistos ant dangos ledą mažinančios cheminės medžiagos gali būti įspaudžiami į ledą arba išsklaidyti nuo kelio dangos, todėl pagrindinė priežastis, kodėl nerekomenduojama atlikti bandymo, yra nesugebėjimas tiksliai imituoti lauko sąlygų.

Anot Shi ir kt. (2009) nors SHRP H-332 (1992) ledo tirpinimo efektyvumo bandymo metodo rezultatai suteikia našumo duomenis, kuriuos gali lengvai suprasti ir naudoti lauko specialistai, tačiau buvo susidurta su eksperimento atkuriamumo problemomis, o metodas buvo modifikuotas daugelyje tyrimų, siekiant gauti nuoseklesnius rezultatus. Kietųjų ledo tirpiklių tirpimo greitis galėjo būti veiksnys, turintis įtakos atkuriamumui, kuris priklauso nuo dalelių dydžio ir sūrymo kiekio, reikalingo pakankamai tiksliai matavimams atlikti. Shi ir kt. remdamiesi Chappelow ir kt. (1992) rekomendacijomis, sumažino ledo paviršiaus plotą, kad būtų apribotos absorbcijos klaidos, tačiau tai labai apribojo susidarančio sūrymo kiekį, ypač esant žemesnei temperatūrai.

Lauko sąlygomis Chang ir kt. (1994) darytas įsiskverbimo į ledą tyrimas, nustatė, kad NaCl linkęs migruoti horizontaliai per ledo sluoksnius, o CaCl_2 daugiausia juda vertikalčiai. CaCl_2 buvo efektyvesnis nei NaCl įsiskverbimo į ledą bandyme, o CMA, karbamidas ir KCl prasiskverbė minimaliais atstumais visais laiko intervalais ir temperatūra. Ledo tirpdymo tyrime CaCl_2 taip pat veikė dvigubai greičiau nei NaCl trumpesniais laiko intervalais (15–20 minučių) ir žemesnėje temperatūroje nei $-9,4\text{ }^\circ\text{C}$. NaCl druska ištirpina tuos pačius ledo tūrius ilgesniais laiko intervalais (45–60 minučių) ir esant aukštesnei nei $-9,4\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai. CMA, karbamidas ir KCl neištirpino reikšmingus tūrius esant žemesnei nei $-9,4\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai, todėl reikėjo 20–30 minučių papildomai lyginant su NaCl, kad jie ištirpintų panašų ledo tūrį. Taip pat Chang ir kt. (1994) pateikia kai kurių JAV valstijų ir Kanados naudojamus SMM ir jų kiekius. Skystųjų druskų rekomendacijos yra tokios: esant dangos

temperatūrai nuo –2,2 iki +1,7 °C vienai juostai naudojama 18,324–73,296 kg/km, kai susidaro juodas ledas, o prevencijai vykdant 18,324–54,973 kg/km, esant dangos temperatūrai nuo –3,3 iki +1,7 °C vienai juostai naudojama 73,296–149,412 kg/km, kai sninga arba šlapdriba, esant dangos temperatūrai nuo –15 iki +1,7 °C vienai juostai naudojama 36,648 kg/km, kai šalto oro slidumas. CMA naudojimo kiekiai yra nurodyti 1.13 lentelėje. Kalio acetato 50 % koncentracijos tirpalo rekomendacijos yra tokios: ledo šalinimui, kai temperatūra 0 °C ir žemiau bei plonas ledo sluoksnis, tai 122,337 l/km vienai juostai, o kai temperatūra –12,2 °C ir žemiau bei plonas ledo sluoksnis tai 371,718 l/km vienai juostai, vykdant apsaugą nuo apledėjimo naudojama 61,169 l/km vienai juostai, vykdant išankstinį drėkinimą naudojama 2,352 l / 453,592 kg smėlio. Kanzaso valstijoje esant temperatūrai nuo –12,2 iki –3,9 °C naudojama nuo 28,191 iki 211,432 kg/km vienai juostai.

1.15 lentelė. CMA naudojimo kiekiai JAV ir Kanados teritorijoje (Chang et al., 1994)

Transporto agentūra	Mišinys	Vidutinis paros intensyvumas	Taikymo norma kg/km vienai juostai	Naudojimo santykis CMA/druska
Denveris	CMA/smėlis	24000–30000	47,079–93,876	1/1
Masačusetso DPW 7 rajonas	CMA	12000	78,935	0,87/1
Masačusetso DPW 6 rajonas	CMA	2000	84,573	0,44/1
Mičigano DOT	CMA	31000	84,573	1/1
Nebraskos DOH	CMA/smėlis	29000	112,764–140,954	1/1
Vakarų Virdžinijos DOH	CMA	13000	91,621	1,3/1
Caltrans	CMA	1350–12000	98,668–112,764	N/A
Ontario MOT	CMA	32000	75,000	N/A

Matiukas (2019) darbe tyrė tradicinių ir alternatyvių slidumą mažinančių cheminių medžiagų poveikį pėsčiųjų takuose ir tų SMM odos gaminiais. Buvo tirtos 3 SMM: NaCl, „Ledo siaubas“ (tai mišinys NaCl iki 98 %, melasos iki 5 %, karbamidas iki 4 % ir kt., kuris gali būti naudojamas iki –25 °C) ir „Nordway-NF“ (sausas mišinys natrio formiato 97 % ir daugiau, inhibitorių iki 2 %, kuris gali būti naudojamas iki –15 °C). Ledo tirpdymo bandymai buvo atlikti lauko sąlygomis. Trys SMM buvo beriami pagal autoriaus parinktus kiekius, vadovaujantis KPV (2015) ir DMMS-KP 06 (2006) rekomendacijomis, kurį naudojo dvigubai didesnį. Taip pat buvo vertinamos dangos bei oro temperatūros ir susiformavusių kritulių rūšys ant dangos (pūrus sniegas, prispaustas sniegas, ledas, kurių storiai iki 3 cm). Pavyzdžiui, ledui tirpinti prie –10 °C naudojama 50 g/m² ir 100 g/m² visoms trimis SMM, pūriam sniegui tirpinti – 35 ir 70 g/m², prispaustam sniegui – 40 ir 80 g/m². Aktualiuose galiojančiuose normatyviniuose dokumentuose nurodyta, kad NaCl naudojamas: esant 1 mm ledo iki -5°C

temperatūrai barstoma 20 g/m², iki –10 °C temperatūrai barstoma 40 g/m², esant 1 mm pūraus sniego iki –5 °C temperatūrai barstoma 10 g/m², iki –10 °C temperatūrai barstoma 20 g/m², esant 1 mm prispausto sniego iki –5 °C temperatūrai barstoma 15 g/m², iki –10 °C temperatūrai barstoma 30 g/m². Žemesnėse temperatūrose NaCl nerekomenduojama naudoti (DMMS-KP 06, 2006; KPV, 2015). Jo išvaduose yra teigiama, kad paskleidus normatyvuose nurodytą normą visų trijų SMM po 1 valandos veikimo nuo 0 iki –3 °C gerai ištirpina ledą, nuo 3 iki –6 °C standartinės normos ištirpinti ledą nepakanka, nes efektyvumas vidutiniškas, o paskleidus dvigubai didesnį kiekį efektyvumas nežymiai pagerėjo (šio atvejų geriausiai pasirodė „Ledo siaubas“ ir „Nordway NF“), žemesnėje nei –6 °C oro temperatūroje normatyvuose nurodytą ir dvigubai didesnį SMM kiekį ištirpinti ledą nepakanka, nes jų efektyvumas yra mažas (šio atvejų geriausiai pasirodė „Nordway NF“). Matiuko (2019) gauti rezultatai parodė, kad NaCl ir kitų SMM efektyvumas žemesnėse temperatūrose yra panašus arba skiriasi nežymiai. Be to, ledo tirpinimo efektyvumas neturi stiprios priklausomybės nuo skleidžiamų SMM kiekių.

Anot Ružinsko (2015) ir kitų ledo tirpymo efektyvumą geriausiai nustatyti pagal ledo bandinių masės kiekio pasikeitimą prieš paskleidžiant NaCl, MgCl₂ ir CaCl₂ ir po jų paskleidimo. Tam išvedama 1.1 formulę, kuri apskaičiuoja prarastos ledo masės procentą:

$$IML = \frac{M_B - M_A}{M_B} \cdot 100, \quad (1.1)$$

kur IML – ledo masės praradimas (angl. Ice Mass Loss), M_B – ledo masė prieš taikant SMM (g), M_A – ledo masė pritaikius SMM (g). Tiksliesniems rezultatams bandymas pakartojamas 3 kartus. Bandymas buvo atliktas SHRP H-205.1 ir SHRP H-205.2 standartų pagrindu.

Šaltinių analizė parodė, kad atlikti tyrėjais juose aprašyti bandymai buvo vykdomi remiantis SHRP H-205 (1992) standartais. Todėl magistro darbe numatyti bandymai bus atliekami vadovaujantis SHRP H-205 (1992) standartais ir jame rekomenduojama metodika su tam tikromis modifikacijomis.

1.4. Skyriaus išvados

1. SMM skirstomos į dvi pagrindines kategorijas: chemines ir frikcines medžiagas. SMM ir jų barstymo kiekiai priklauso nuo aplinkos sąlygų ir aplinkos bei dangos temperatūros.
2. Atlikus mokslinių tyrimų analizę nustatyta, kad ledo tirpinimui naudojant vienodą ledo kiekį skirtingomis temperatūromis, žemėjant temperatūrai, reikalingas didesnis NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂ kiekis. Žemesnėje temperatūroje susidaręs ledas tirpsta lėčiau, todėl jo nutirpinimui reikalinga išbarstyti didesnį nei 20 g/m² SMM kiekį.

3. Asfalto danga yra atsparesnė cheminėms reakcijoms su NaCl, CaCl₂, MgCl₂, formiatais ir kitomis SMM nei betono danga. Tačiau didelis CMA kiekis gali saveikauti su asfalto danga ir sukelti dangos ardymą. Cheminės druskos, kuriose yra chloro, sukelia plieninių ir kitų metalų konstrukcijų bei mechanizmų (transporto priemonės ir t.t.) koroziją. Be to, NaCl gali sukelti šarminės silicio dioksido reakciją betone, taip pat jį ardydamas.
4. SMM intensyvus naudojimas teršia aplinką. Jų neigiamos savybės (toksiškumas ir cheminis aktyvumas) kelia pavojų augalams bei gyvūnams. Todėl rekomenduojama SMM naudoti kartu su inhibitoriais, kurie sumažina neigiamą poveikį aplinkai ir padidina cheminių medžiagų naudojimo efektyvumą. Kai kurie inhibitoriai (acetatai, formiatai, fosfatinio kalcio chloridas FCaCl₂, karbamidas (NH₂)₂CO) taip pat pasižymi antikorozinėmis savybėmis.
5. SMM, jų tirpalų arba mišinių barstymo, išpurškimo kiekis ant kelio dangos priklauso nuo aplinkos temperatūros ir naudojamos medžiagos rūšies. Esant vienodai aplinkos temperatūrai, 1 m² plotui reikia skirtingo kiekio atitinkamų SMM, kadangi jų efektyvumas skiriasi. Kai kurių SMM nerekomenduojama naudoti esant labai žemai temperatūrai. Pavyzdžiui, NaCl druskos tirpalą nerekomenduojama taikyti labai žemose temperatūrose (iki –6 °C, kaip rekomenduoja KPV (2015)). Susidariusiam slidumui, atsiradusiam dėl žemų oro ir dangos temperatūrų bei aplinkos sąlygų (lietaus, drėgmės, sniego, lijdros, šarmos, plikledžio), šalinti paprastai naudojami didesni druskos mišinio kiekiai nei prevencijai. Prevencijos veiksmų taikymas gali leisti ženkliai sutaupyti lėšų.
6. SMM saugojimo patalpos privalo būti sausos, kadangi SMM gali prarasti birumo savybę. Tačiau siekiant sumažinti dulkių susidarymą laikant SMM ilgą laiką, rekomenduojama palaikyti nedidelį drėgnumą 0,1–0,3 % patalpoje.

2. KELIŲ PRIEŽIŪROS ŽIEMĄ CHEMINIŲ MEDŽIAGŲ EFEKTYVUMO NUSTATYMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

2.1. Tyrimo objektas

Tyrimo tikslas laboratorinėmis sąlygomis nustatyti NaCl ir alternatyvių slidumą mažinančių cheminių medžiagų ledo tirpymo efektyvumą, gautus duomenis ir palyginti tarpusavyje. Suplanuoti tyrimu siekta patikrinti hipotezę – alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų efektyvumas tirpdant ledą yra panašus arba atitinkamomis sąlygomis geresnis nei NaCl.

Tyrimas nebus vykdomas lauko sąlygose, nes tam, kad tiksliau ištirti SMM efektyvumą reikalingos kontroliuojamos aplinkos sąlygos, t.y. pastovi oro ir bandinių temperatūra, sumažintas oro srautų / vėjo poveikis, pastovi oro drėgmė. Be to, SHRP H-332 (1992) vadove visi vykdomi ledo tirpymo ir įsiskverbimo į ledą eksperimentai buvo atlikti šaldymo kameroje. Siekiant imituoti žiemos sąlygas, tyrimas bus vykdomas laboratorijos „MCX-RTU Rooftop“ šaldymo kameroje (2.1 pav., 2.2 pav.). Šaldymo kameros viduje yra įrengtos lentynos, ant kurių bus laikomi ledo bandiniai stikliniuose indeliuose.



2.1 pav. „MCX-RTU Rooftop“ šaldymo kamera



2.2 pav. „MCX-RTU Rooftop“ šaldymo kameros valdymo pultas

Nagrinėjamos SMM (jų yra 10 vnt.):

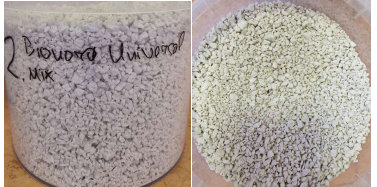
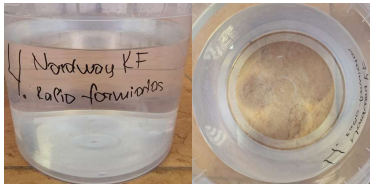
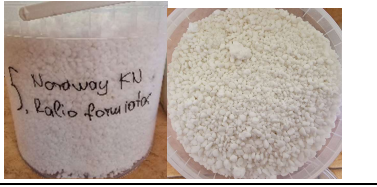
- Natrio chloridas
- „Bionord Universal“ (mėlynas)

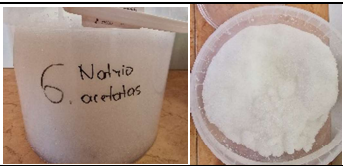
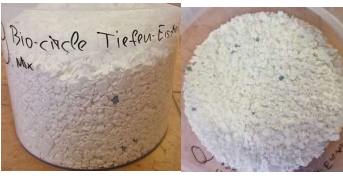
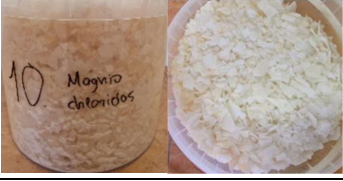
- „Bionord Step“ (oranžinis)
- „Nordway KF“ (skystas)
- „Nordway KN“ (granulės)
- Natrio acetatas
- Kalcio magnio acetatas (CMA)
- Kalcio chloridas (dribsniais)
- „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“
- Magnio chloridas (dribsniais).



2.3 pav. Tiriamos slidumą mažinančios medžiagos

2.1 lentelė. Tiriamos slidumą mažinančios medžiagos

Nr.	Medžiaga	Cheminė formulė	Sudėtis	Medžiagos nuotraukos
1	Natrio chloridas	NaCl	natrio chloridas	
2	Bionord Universal (mėlynas)	-	kalcio chlorido 10-30 % natrio chlorido 45-89 % kalio chlorido ≤10 % karbamido ≤10 % natrio formiato ≤15 % kalio formiato ≤15 %	
3	Bionord Step (oranžinis)	-	kalcio chloridas natrio chloridas karbamidas korozijos inhibitoriai marmuro drožlės biofiliniai papildai	
4	Nordway KF (skystas)	CHKO ₂	kalio formiatas	
5	Nordway KN (granulės)	CHKO ₂	kalio formiatas	

Nr.	Medžiaga	Cheminė formulė	Sudėtis	Medžiagos nuotraukos
6	Natrio acetatas	$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	natrio acetatas	
7	Kalcio magnio acetatas (CMA)	$\text{CaMg}_2(\text{CH}_3\text{COO})_6$	Kalcio ir magnio molinis santykis 3:7 Hidratuotas CMA + kiti acetatai - 96% Inertinė medžiaga - ne daugiau kaip 4%	
8	Kalcio chloridas (dribsniais)	CaCl_2	kalcio chloridas	
9	Bio-Circle Tiefen-Eisfrei		Kalcio chlorido hidratas Trąšų komponentai: pagrindinės maistinės medžiagos: K, N, P, Mg, Ca ir S; Mikroelementai: Fe, Mn, Co, B, Zn	
10	Magnio chloridas (dribsniais)	MgCl_2	magnio chloridas	

Tyrimo metu visų SMM efektyvumas lyginamas su NaCl, todėl ledo tirpdimui reikalingas paskleidimo kiekis parenkamas atsižvelgiant į NaCl barstymo rekomendacijas pagal KPV (2015) ir DMMS-KP 06 (2006). Bandymo metų SMM bus paskleidžiamos ant užšaldytų ledo bandinių. Tam kad sumažinti šalutinį poveikį eksperimentui, tyrimas buvo atliktas vienodomis sąlygomis. Visos sausos SMM buvo prasijotos pro sietus, kurių akučių dydis yra 2 mm ir 0,5 mm (2.4 pav.). Tyrime naudojamų prasijotų sausų SMM frakcija yra fr. 0,5/2 mm. SMM tirpalams gaminti buvo naudojamos tos pačios SMM. Tirpalai gaminami su 20 % koncentracija, išskyrus „Nordway KF“ medžiagą, kuri bus naudojama gryna dėl savo agregatinės būsenos. Tačiau 20 % koncentracijos tirpalas iš „Nordway KN“ medžiagos numatoma pagaminti, tam kad palyginti su kitais SMMt ir „Nordway KF“ medžiaga, nes tai yra viena medžiaga, kuria skiriasi tik agregatine būsena, bei jų cheminė formulė yra vienoda. Ledo bandiniams gaminti naudotas distiliuotas vanduo.



2.4 pav. Sietai su 0,5 ir 2 mm akučiais

Atliekant eksperimentą ledo bandinio temperatūra buvo matuojama skaitmeniniu lazeriniu termometru (2.5 pav.). Matuojant paviršiaus temperatūrą termometro lazeris pataiko į paviršių bei atspindi atgal. Matavimo priemonės tikslumas 0,1 °C. Aplinkos temperatūra fiksuota pagal šaldymo kameroje esančius zondus, kurių rodmenys rodomi šaldymo kameros valdymo pulto ekrane.



2.5 pav. Skaitmeninis lazerinis termometras su rankena



2.6 pav. Skaitmeninis slankmatis

Įsiskverbimo į ledą gylis matuotas skaitmeniniu slankmačiu (2.6 pav.). Slankmačio tikslumas yra 0,01 mm.



2.7 pav. Skaitmeninės svarstyklės „KERN PNS“

Ledo bandinių paruošimui ir ledo tirpymo bandymui naudotas skaitmeninės svarstyklės. Svarstyklių tikslumas 0,01 g, o didžiausias leidžiamas svoris 3200 g. Bandymo metų sveriami: apvalūs stikliniai indeliai, indeliai su įpiltu vandeniu, indeliai su užšaldytu ledu, indeliai su ledu po SMM veikimo, nusausinant ištirpusį skystį, paskleidžiamų SMM masės, sugertukų prieš sausinimą ir po sausinimo masė, švirkštai. Prietaisas prieš matavimus turi būti sugulščiuotas ir nunulintas.

Papildomos naudotos priemonės: apvalūs (9 cm skersmens) Petri stikliniai indeliai, matavimo indeliai švirkštai, šaukštai, pincetas, skystį sugeriantis popierius, sandarūs indai (kibirėliai) SMM laikymui.

Tirpalų gamyba

Tyrimu naudoti tirpalai buvo pagaminti vienodomis sąlygomis ir naudojant vienodą medžiagų kiekį (birių SMM, vandens). Tirpalų koncentracija buvo parinkta pagal 1 skyriuje aprašytus panaudojimo kiekius Lietuvoje bei užsienyje, atsižvelgiant į NaCl druskos tirpalo koncentraciją skleidžiama ant kelio dangos. Visų eksperimente naudojamų SMMt yra 20 %, išskyrus „Nordway KF“ medžiaga, kadangi tai yra skystis. Bandymams atlikti tirpalams reikėjo duoti nusistovėti, kad priemaišos esančios sausose SMM nusileistų ant kibirų dugno ir nepatektų ant ledo bandinių skleidžiant tirpalus, kad sumažinti rezultatų iškraipimą.

Tirpalo gamybai biri SMM maišyti su distiliuotu vandeniu. Tirpalo koncentracijai apskaičiuota (Matulis, B., ir kt., 2006):

$$\omega_{medžiagos} = \frac{m_{medžiagos}}{m_{tirpalo}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

čia:

$\omega_{medžiagos}$ – tirpalo koncentracija, procentinė dalis medžiagos nuo viso tirpalo, %,

$m_{medžiagos}$ – medžiagos masė, kg,

$m_{tirpalo}$ – tirpalo masė, kg.

20 % koncentracijos tirpalui pagaminti panaudota 500 g distiliuoto vandens. Reikalingas SMM kiekis apskaičiuotas pagal 2.2 formulę:

$$m_{SMM} = \frac{\omega_{SMM}}{100} \cdot m_{SMMt} \quad (2.2)$$

čia:

m_{SMM} – sausos slidumą mažinančios cheminės medžiagos masė, g.

m_{SMMt} – slidumą mažinančios cheminės medžiagos tirpalo masė, g,

ω_{SMM} – slidumą mažinančios cheminės medžiagos tirpalo koncentracija, %,

Tai sausos slidumą mažinančios cheminės medžiagos masė apskaičiuojama pagal 2.2 formulę:

$$m_{SMM} = \frac{20}{100} \cdot 625 = 125 \text{ g}$$

Masė tirpalo apskaičiuojama pagal 2.3 formulę:

$$m_{SMMt} = m_{H_2O} + m_{SMM} \quad (2.3)$$

čia:

m_{H_2O} – distiliuoto vandens masė, g.

2.2 lentelėje pateiktos sumaišytų SMM su distiliuotu vandeniu ir gautų tirpalų masės. Dėl nenustatytų priežasčių sumaišant SMM ir distiliuota vandenį tirpalų realia masė skyrėsi nuo teorinės masės daugiausiai iki $\pm 0,099$ %, išskyrus $MgCl_2$.

2.2 lentelė. SMM tirpalų gamyba

Nr .	Medžiaga	Cheminė formulė	Koncentracija, %	Vandens masė, g	Tirpalo masė, g	SMM, g	Koncentracija pagal faktinę tirpalo masę, %
1	Natrio chloridas	NaCl	20	500	624,37	125	20,020
2	Bionord Universal (mėlynas)		20	500	627,99	125,01	19,906
3	Bionord Step (oranžinis)		20	500	626,97	125,01	19,939
4	Nordway KF (skystas)	CHKO ₂	-	-	-	-	-
5	Nordway KN (granulės)	CHKO ₂	20	500	623,64	125	20,043
6	Natrio acetatas	CH ₃ COONa·3H ₂ O	20	500	624,12	125	20,028
7	Kalcio magnio acetatas (CMA)	CaMg ₂ (CH ₃ COO) ₆	20	500	624,67	125	20,011
8	Kalcio chloridas (dribsniais)	CaCl ₂	20	500	628,1	125	19,901
9	Bio-Circle Tiefen-Eisfrei		20	500	627,86	125	19,909
10	Magnio chloridas (dribsniais)	MgCl ₂	20	500	625,00	125	20,000

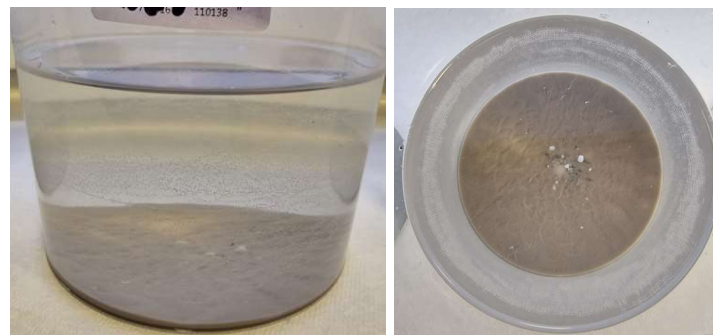
Žemiau pateikta stebėjimo rezultatų SMMt aprašas. Stebėjimai buvo atlikti po 2 valandų, po 1 paros ir po 7 parų nuo SMMt sumaišymo. Pagamintų SMMt nuotraukos darytos praėjus parai po jų sumaišymo.

NaCl (techninė druska) tirpalas: matyti neištirpusių dalelių, tamsiai žalios spalvos, tikėtina dėl netirpių priemaišų, maišant putuoja, tirpalas daugiau blankus nei skaidrus. Po paros tapo skaidrus, atsirado tamsiai žalios spalvos nuosėdos.



2.8 pav. NaCl tirpalas

„Bionord Universal“ (mėlynas) tirpalas: yra neištirpusių smulkių dalelių, atsirado pilkos spalvos nuosėdos, tirpalas daugiau skaidrus nei blankus. Po paros tirpalas skaidrus, atsirado smėlio spalvos nuosėdos.



2.9 pav. „Bionord Universal“ (mėlynas) tirpalas

„Bionord Step“ (oranžinis) tirpalas: yra neištirpusių didelių dalelių, atsirado pilkos spalvos nuosėdos, tirpalas daugiau skaidrus nei blankus. Po paros tirpalas skaidrus, iškrito smėlio spalvos nuosėdos, yra pilkos spalvos neištirpusios stambios dalelės (kaip akmenukai).



2.10 pav. „Bionord Step“ (oranžinis) tirpalas
„Nordway KF“ (skystas) tirpalas: skaidrus.



2.11 pav. „Nordway KF“ (skystas) tirpalas
„Nordway KN“ (granulės) tirpalas: granulės pilnai ištirpo, tirpalas gavosi skaidrus. Po paros iškrito labai mažas kiekis smėlio spalvos nuosėdų, tirpalas skaidrus.

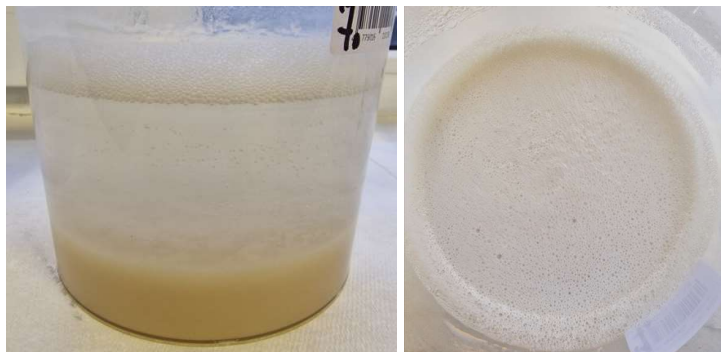


2.12 pav. „Nordway KN“ (granulės) tirpalas
Natrio acetato tirpalas: pilnai ištirpo, skaidrus, ant sienelės pirmą valandą po paruošimo laikėse labai daug oro burbulėlių. Po paros pilnai ištirpo, skaidrus, šiek tiek liko oro burbulėlių. Tai vienintelis tirpalas, kuris užšaldavo aukštesnėje nei -10°C (bet ne aukščiau nei -6°C) įnešus jį į šaldymo kamerą.



2.13 pav. Natrio acetato tirpalas

CMA tirpalas: įšilo, pradėjo pats tirpti, o maišant putuoti, pilnai ištirpo, maišant blankus ir drumstas, gelsvos spalvos, pastovėjęs smėlio spalva su tirštomis putomis tirpalas emulsijos pavidalo. Po paros tirpalas daugiau prematamas nei blankus, tirpalas su smėlio spalvos atspalviu, putų kiekis mažai sumažėjo, atsirado pienoškų-geltonos spalvos nuosėdos 2,3 cm storio. Po savaitės, beveik skaidrus (šiek tiek blankus) su smėlio spalvos atspalviu, yra nuosėdos ir mažas sluoksnis putų.



2.14 pav. CMA tirpalas

CaCl_2 tirpalas: įšilo, pradėjo pats tirpti, šiek tiek atsirado pilkos spalvos nuosėdų. Po paros tirpalas skaidrus, yra baltos spalvos su geltonu atspalviu nuosėdos dumblo pavidalo tekstūros. Po savaitės beveik skaidrus, šiek tiek blankus, atsirado plevelė, kurios skaidrumas kaip celafano.



2.15 pav. CaCl_2 tirpalas

„Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ tirpalas: įšilo, pradėjo pats tirpti, neištirpo mėlynos spalvos dalelės, skaidrus, maždaug po 7 minučių temperatūra pasiekė +40,1 °C. Po paros tirpalas skaidrus, yra šiek tiek baltos spalvos nuosėdų dumblo pavidalo tekstūros, mėlynos spalvos stambios dalelės neištirpo, bet suminštėjo ir sutrupėjo. Po savaitės skaidrus, mėlynos dalelės neištirpo.



2.16 pav. „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ tirpalas

MgCl₂ tirpalas: pradėjo pats tirpti, ištirpo pilnai, daugiau skaidrus nei blankus. Po paros tirpalas skaidrus šiek tiek yra geltono atspalvio, atsiado baltos spalvos nuosėdos, kurių beveik nesimato.



2.17 pav. MgCl₂ tirpalas

Kai kurie SMM sumaišius su distiliuotu vandeniu išskyrė šilumą, todėl jų temperatūra buvo matuojama skaitmeniniu lazeriniu termometru. 2.3 lentelėje pateikiami SMM tirpalų temperatūros kitimai.

2.3 lentelė. SMMt temperatūros kitimas gaminant laboratorijoje

Nr.	Medžiagos tirpalas	Vandens temperatūra, °C	Tirpalo temperatūra po pagaminimo, °C	Tirpalo temperatūra po 5 min, °C	Temperatūros pokytis tarp I ir II matavimų, °C	Temperatūros pokytis tarp II ir III matavimų, °C
		I matavimas	II matavimas	III matavimas		
1	NaCl	17,4	18,0	14,5	+0,6	-3,5
2	Bionord Universal	17,2	19,4	18,3	+2,2	-1,1

Nr.	Medžiagos tirpalas	Vandens temperatūra, °C	Tirpalo temperatūra po pagaminimo, °C	Tirpalo temperatūra po 5 min, °C	Temperatūros pokytis tarp I ir II matavimų, °C	Temperatūros pokytis tarp II ir III matavimų, °C
		I matavimas	II matavimas	III matavimas		
3	Bionord Step	17,0	16,8	15,6	-0,2	-1,2
4	Nordway KF (skystas)	-	-	-	-	-
5	Nordway KN (granulės)	17,3	17,2	16,7	-0,1	-0,5
6	Natrio acetatas	17,4	18,4	10,3	+1,0	-8,1
7	CMA	15,8	16,4	28,6	+0,6	+12,2
8	CaCl ₂	18,3	18,7	33,7	+0,4	+15,0
9	Bio-Circle Tiefen-Eisfrei	18,4	18,8	34,3	+0,4	+15,5
10	MgCl ₂	17,6	18,9	20,9	+1,3	+2,0

Temperatūra buvo matuojama tris kartus: distiliuoto vandens temperatūra prieš suberiant sausą SMM (I matavimas), tirpalo temperatūra po SMM suberimo ir sumaišymo (apytiksliai 10 šaukšto pasukimų) (II matavimas) ir tirpalo temperatūra po 5 minučių (III matavimas). Rezultatai parodė, kad nežymiai įšilo „Bionord Universal“ ir MgCl₂, stipriai įšilo CMA (SMMt ir toliau šilo, kol nepasiekė +40,1 °C), CaCl₂ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ (jis įšilo daugiausiai ir greičiausiai per 5 minutes iki +34,3 °C, o pokytis sudarė +15,5 °C), „Nordway KN“ ir „Bionord Step“ temperatūra beveik nepakito, nors po 5 minučių šiek tiek sumažėjo, NaCl iš pradžių šiek tiek įšilo, o po 5 minučių temperatūra sumažėjo 3,5 °C, natrio acetatas, taip pat kaip ir NaCl, iš pradžių šiek tiek įšilo, tačiau po 5 minučių tirpalas atvėso iki +10,3 °C, kurio pokytis sudarė –8,1 °C. Praėjus vienai parai tirpalų temperatūra buvo vienoda su aplinkos temperatūra.

2.2. Tyrimo metodai. Laboratoriniai bandymai: ištirpdyto ledo kiekis ir įsiskverbimas į ledą

Darbe vykdomas eksperimentas, kuriuo tikslas nustatyti SMM efektyvumą pagal du metodus:

- Ledo tirpdymo efektyvumą;
- Skverbimasis į ledą.

Ledo tirpdyimo ir įsiskverbimo į ledą bandymai atlikti vadovaujantis SHRP H-332 (1992) metodikomis. Modifikuojant jas ir atsižvelgiant į Lietuvos kelių priežiūros žiemą rekomendacijas, atliekami bandymai eksperimento tikslui pasiekti ir atlikti tyrimo uždavinius.

Ledo tirpdyimo bandymo eiga

Ledo tirpdyimo efektyvumas nustatomas pagal standarto CEN/TS 16811-3 (2015) C priede nurodytus SHRP H-205.1 (birioms medžiagoms) ir SHRP H-205.2 (skystoms medžiagoms) metodikų (Chappelow ir kt. 1992) reikalavimus. Standartuose SHRP H-205.1 (1992) ir SHRP H-205.2 (1992), kuriuose aprašytas ledo tirpdyimas kietaisiais ir skystaisiais ledo cheminiais tirpikliais, bandymams atlikti buvo naudojami 9 colių (22,86 cm) skersmens ir 3/4 colių (1,91 cm) gylio apvalūs indai, į kuriuos įpilama 130 ml distiliuoto arba nejonizuoto (virinto) vandens tam, kad užšalant susidarytų 1/8 colių (3,175 mm) storio ledo sluoksnis. Bandymo trukmė buvo 10, 20, 30, 45 ir 60 min, o SMM buvo tirtos esant –1, –3,9, –9,4, –15 ir –18 °C temperatūroms. Nustatytas SMM tiriamas kiekis yra 4,17 g, o tirpalams ir skystosioms SMM yra 3,8 ml.

Paruoštas ir pasvertas apvalus stiklinis indelis 9 cm skersmens (63,6 cm² ploto), į kurį įpiltas vanduo. Atsižvelgiant į SHRP H-205.1 (1992) ir SHRP H-205.2 (1992) metodikas, kuriose naudojamas 22,86 cm skersmens (410,4 cm² ploto) indelis, apskaičiuotas reikalingas vandens kiekis laboratorinio bandymo indeliui užtikrinant 4,5 mm ledo storio sluoksnį:

$$\frac{63,6}{4,5 \cdot 10^{-1}} = 28,6 \approx 30 \text{ g}.$$

Indas uždengus įdetas į šaldymo kamerą 1 parai. Bandymas atliktas esant nuo –3 iki –10 °C temperatūros, todėl šaldymo kameroje nustatomos 3 temperatūros: –3, –6 ir –10 °C. Po paros pasvertas indas su susidariusiu ledu. Bandymo rezultatai matuoti po 5 ir 60 min veikimo laiko. Paskleistas iš anksto pasvertas SMM kiekis. Kadangi NaCl yra labai populiari SMM naudojant kelių priežiūrai žiemą ir tyrimo tikslas nurodo palyginti visas SMM su NaCl, tai remiantis Lietuvos normatyviniais dokumentais parenkamas visiems SMM vienodas paskleidžiamas kiekis. Pagal KPV (2015) ir DMMS-KP 06 (2006), atsižvelgiant į aplinkos sąlygas, plačiausiai naudojamas NaCl druskos kiekis yra 40 g/m². Apskaičiuotas reikalingas kiekis paskleisti ant 9 cm skersmens (63,6 cm² ploto) indo:

$$\frac{40 \cdot 63,6 \cdot 10^{-4}}{1} = 0,26 \text{ g}.$$

Tyrimas buvo atliktas vienodomis sąlygomis. Visos sausos SMM buvo prasijotos pro sietus, kurių akučių dydis yra 2 mm ir 0,5 mm (2.4 pav.). Tyrime naudojamų prasijotų sausų SMM frakcija yra fr. 0,5/2 mm.

SMMt tirti naudota tokia pat eiga, kaip ir kietosioms SMM, su kai kuriais pakeitimais. Jeigu paskleidžiamas SMMt, tai naudojamas tirpalo laikimui švirkštas pasveriamas tris kartus:

kai švirkštas tuščias ir sausas, kai švirkštas su tirpalu ir kai švirkštas iš karto po paskleidimo. Reikalingas tirpalo kiekis apskaičiuotas remiantis SHRP H-205.2 (1992) metodiką, kurioje numatyta 4,17 g kietosios SMM paskleisti ant 22,86 cm skersmens (410,4 cm² ploto). SHRP H-205.2 (1992) metodikoje tiriamų SMMt koncentracija skiriasi, o šio tyrimo atveju naudota SMMt koncentracija yra vienoda. SMMt kiekis nustatytas atsižvelgiant kietosios medžiagos skleidžiamo kiekio. Tirpalas paruošiamas su 20 % koncentracija, kurio reikalingas paskleidimui kiekis įtraukiamas į švirkštus. Švirkštai su SMMt yra laikomi šaldymo kameroje, vienodomis sąlygomis. Tirpalo kiekis apskaičiuotas taip:

$$\frac{4,17 \cdot 63,6}{410,4} \cdot \frac{1}{0,2} = 3,23 \text{ g.}$$

„Nordway KF“ medžiaga yra skystis (2.1 lentelė), todėl jai nustatomas efektyvumas tik ledo tirpdymo tyrmu, remiantis SHRP H-205.2 (1992) standartu.

Praėjus veikimo laikui, ledo bandinys sausintas sugertuku apie 10 s ir pasvertas. Ledo tirpdymo efektyvumas nustatytas kaip santykis ištirpinto ledo masės ir ledo bandinio prieš paskleidžiant SMM (SHRP H-205, 1992; Ružinskas et al, 2015):

$$LTE = \frac{m_{ledo} - m_{po}}{m_{ledo}} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

čia:

LTE – ledo tirpdymo efektyvumas, %;

m_{ledo} - ledo bandinio masė prieš paskleidžiant SMM, g;

m_{po} – nusausinto ledo bandinio masė, g.

Gautiems rezultatams užrašyti ir apskaičiuoti naudotos 2.4 ir 2.5 lentelės, kietosioms SMM ir jų tirpalams atitinkamai. Kietosios būsenos CaCl₂ ledo tirpdymo efektyvumo nustatymo bandymas pavaizduotas 2.18 pav., o „Nordway KF“ tirpalo – 2.19 pav.

2.4 lentelė. Kietosios būsenos NaCl ledo tirpdymo efektyvumo nustatymo žiniaraštis

Laikas, min	Bandymo Nr.	SMM g/m ²		40	t, °C	-3						
		Indo masė, g	Vandens masė, g	Indo ir vandens masė, g	Indo ir ledo masė, g	SMM, g	Sausas suger tukas, g	Drėgnas suger tukas, g	Indo ir ledas po sausini mo masė, g	LTE, %	Vidurkis, %	Standartinis nuokrypis
1	Techninė druska/Natrio chloridas NaCl											
5	B1	44,27	30	74,27	73,93	0,26	0,53	1,94	72,81	3,776	4,2	0,6
5	B2	44,2	30	74,2	73,97	0,26	0,75	2,16	72,82	3,863		
5	B3	43,61	30	73,61	72,25	0,26	0,75	2,44	70,81	5,028		
60	B1	43,93	30	73,93	73,60	0,26	0,56	4,11	70,24	11,325	11,3	0,7
60	B2	42,24	30	72,24	71,82	0,26	0,43	3,16	68,74	10,412		
60	B3	43,75	30	73,75	73,38	0,26	0,49	3,56	69,75	12,238		



a

b

c

2.18 pav. Kietosios būsenos CaCl_2 ledo tirpdyimo bandymas esant $-3\text{ }^\circ\text{C}$ (a) – ką tik paskleidus, b) – 5 min po paskleidimo, c) – po sausinimo)

2.5 lentelė. NaCl tirpalo ledo tirpdyimo efektyvumo nustatymo žiniaraštis

Laikas, min	Bandymo Nr.	SMM g/m^2			40	$t, ^\circ\text{C}$	-3								
		Indo masė, g	Vandens masė, g	Indo ir vandens masė, g	Indo ir ledo masė, g	Švirkštas tuščias, g	Švirkštas su SMM t, g	Švirkštas be SMM t po paskleidimo, g	SMM t, g	Sausas sugertukas, g	Drėgnas sugerukas, g	Indo ir ledo po sausinimo masė, g	LTE, %	Vidurkis, %	Standartinis nuokrypis
1	Techninė druska/Natrio chloridas NaCl														
5	B1	43,83	30	73,83	73,81	3,88	7,11	3,94	3,17	0,57	6,04	71,53	7,6	8,0	0,3
5	B2	44,21	30	74,21	74,04	3,83	7,06	3,89	3,17	0,48	6,14	71,55	8,3		
5	B3	42,15	30	72,15	72,04	3,88	7,11	3,93	3,18	0,53	5,89	69,64	8,0		
60	B1	44,2	30	74,2	74,15	3,89	7,12	3,94	3,18	0,55	10,22	67,63	21,8	22,1	0,9
60	B2	41,81	30	71,81	71,75	3,89	7,12	3,94	3,18	0,5	10,03	65,41	21,2		
60	B3	44,38	30	74,38	74,32	3,83	7,06	3,88	3,18	0,54	10,57	67,37	23,2		



a

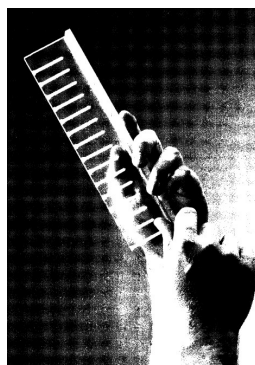
b

c

2.19 pav. „Nordway KF“ tirpalo ledo tirpdyimo efektyvumo bandymas prie $-10\text{ }^\circ\text{C}$ (a) – ką tik paskleidus, b) – 60 min po paskleidimo, c) – po sausinimo)

Įsiskverbimo į ledą bandymo eiga

Pagal SHRP H-205.3 (1992), įsiskverbimo gylį į ledą reikia matuoti su specialia „Plexiglas“ plokšte (2.20 pav.), kurioje yra 10–15 išgręžtų ertmių su $5/32$ colių (4 mm) skersmeniu, padidintų viršuje iki 10 mm skersmens. Ertmių gylis yra iki 35 mm. Tačiau šio tyrimo metu, įsiskverbimo gylis matuotas su skaitmeniniu slankmačiu.



2.20 pav. „Plexiglas” plokštė (Chappelow, C.C., 1992)

Paruoštas ir pasvertas apvalus stiklinis indelis ($\varnothing 9$ cm, $63,6 \text{ cm}^2$), į kurį įpilamas 60 g vandens tam, kad gauti mažiausiai 7,5 mm storio ledo bandinį. Indas įdėtas į šaldymo kamerą 1 parai. Bandymas atliktas esant nuo -3 iki -10 °C temperatūros, todėl šaldymo kameroje nustatomi 3 temperatūros: -3 , -6 ir -10 °C. Po paros su slankmačiu matuotas atstumas nuo indo kraštinės briaunos iki susidariusio ledo paviršiaus 10 taškuose.

Ant ledo paviršiaus padėtos iš anksto paruošti 10 vnt. SMM dalelių (fr. 0,5/2 mm) su pincetu.

Bandymo rezultatai matuoti po 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45 ir 60 min veikimo laiko. Praėjus veikimo laikui, matuotas atstumas nuo indo kraštinės briaunos iki gyliausių dalelių įsiskverbimo taškų (2.21 pav.). Tam kad apskaičiuoti SMM įsiskverbimo gylį reikia atstumą nuo indo kraštinės briaunos iki ledo paviršiaus atimti iš atstumo nuo indo kraštinės briaunos iki gyliausio dalelės įsiskverbimo taško. Įsiskverbimo į ledą gylis apskaičiuotas pagal 2.5 formulę:

$$IGL = l_{po} - l_{prieš}, \quad (2.5)$$

čia

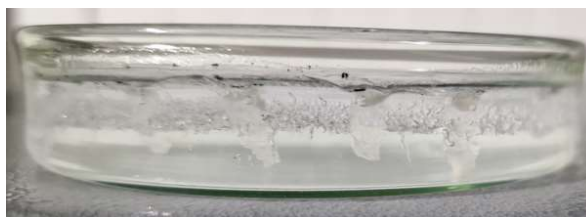
IG – įsiskverbimo gylis, mm;

$l_{prieš}$ - atstumas nuo indo kraštinės briaunos iki ledo paviršiaus, mm;

l_{po} - atstumas nuo indo kraštinės briaunos iki gyliausio dalelės įsiskverbimo taško, mm.



a



b

2.21 pav. CMA granulių įsiskverbimo į ledą gylio nustatymo bandymas esant -3 °C (a) – ką tik uždėjus granules, b) – 60 min po paskleidimo)

Įsiskverbimo į ledą bandymai atlikti tik naudojant birias medžiagas.

Tyrimai atlikti laikotarpyje nuo 2024 m. sausio 15 d. iki 2024 m. balandžio 15 d.

2.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatai ir jų analizė

Atlikus eksperimentą, toliau atliekama gautų rezultatų analizė, siekiant nustatyti efektyviausias SMM. Visų ištirtų SMM ir SMMt ledo tirpymo efektyvumo rezultatai pateiktos 2.6 lentelėje.

Analizuojant kietąsias SMM, esant -3°C temperatūrai, per 5 min daugiausiai ledą ištirpino CaCl_2 (4,8 %), antroje vietoje „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ (4,4 %), trečioje – NaCl (4,2 %), o mažiausiai ledą ištirpino CMA (1,5 %), antroje vietoje „Nordway KN“ (3,1 %), trečioje – natrio acetatas (3,3 %). Esant -3°C temperatūrai, per 60 min daugiausiai ledą ištirpino NaCl (11,3 %), antroje vietoje „Bionord Step“ (9,8 %), trečioje – „Bionord Universal“ (9,5 %), o mažiausiai ledą ištirpino CMA (5,8 %), antroje vietoje natrio acetatas (6,2 %), trečioje – MgCl_2 (6,2 %). Esant -6°C temperatūrai, per 5 min daugiausiai ledą ištirpino CaCl_2 (4,1 %), o mažiausiai – CMA (0,6 %). Esant -6°C temperatūrai, per 60 min daugiausiai ledą ištirpino „Bionord Universal“ (7,9 %), o mažiausiai – CMA (3,3 %). Esant -10°C temperatūrai, per 5 min daugiausiai ledą ištirpino „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ (1,4 %), o mažiausiai – CMA (0,1 %). Esant -10°C temperatūrai, per 60 min daugiausiai ledą ištirpino NaCl (2,3 %), o mažiausiai – CMA (0,6 %).

Analizuojant SMMt, esant -3 , -6 ir -10°C temperatūroms, per 5 ir 60 min daugiausiai ledą ištirpino „Nordway KF“. Taip pat gerai pasireiškė NaCl , „Bionord Universal“ ir „Nordway KN“ tirpalai. Esant -3°C temperatūrai, per 5 ir 60 min mažiausiai ledą ištirpino CMA (4,4 % ir 6,9 % atitinkamai). Esant -6°C temperatūrai, per 5 min mažiausiai ledą ištirpino MgCl_2 (0,9 %), o per 60 min – natrio acetatas (1,0 %). Esant -10°C temperatūrai, per 5 min mažiausiai ledą ištirpino MgCl_2 ($-0,0$ %), o per 60 min – „Bionord Step“ ($-0,1$ %). Taip pat neefektyviai pasirodė CMA, natrio acetatas ir MgCl_2 .

Tirpalų užšalimas stebėtas natrio acetato tirpalui esant -6 ir -10°C temperatūroms po 60 min (2.22 pav.), taip pat „Bionord Step“ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ tirpalams esant -10°C temperatūrai po 60 min. Tai reiškia, kad iš pradžių po paskleidimo SMM pradeda tirpinti ledą, tačiau po tam tikro laiko ištirpintas ledo kiekis pradeda užšalti. Jeigu paskleidžiamas tirpalas arba skysta SMM, tai tas skystis taip pat gali pradėti užšalti kartu su ištirpintu ledu, arba jeigu aplinkos temperatūra yra labai žema, tai tirpinančia skysta SMM, nespėję pradėti veikti ir iš karto pradeda užšalti. MgCl_2 tirpalui užšalimas stebėtas prie -10°C po 5 minučių vienam iš trijų bandinių, todėl vidurkis gavosi $-0,0$ %, tačiau po 60 min jo tirpalas ištirpino 0,2 % ledo masės.

Galima teigti, kad dauguma SMM yra efektyvios ledo tirpinimui esant -3°C temperatūrai, tačiau greitai praranda savo efektyvumą, kai temperatūra nusileidžia iki -6°C ar žemesnės (pvz., „Nordway KN“, „Bionord Step“, „Bionord Universal“, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, natrio acetatas). Tokios SMM kaip MgCl_2 ir CaCl_2 -3°C temperatūroje pasirodė kukliai, tačiau mažėjant temperatūrai jos nesumažina savo efektyvumo staigiai, o palaipsniui, kitaip sakant yra mažiau jautrios temperatūros pokyčiams. Bandymo metu stipriai pasireškė šių medžiagų higroskopiskumas, nes jos, esant šaldymo kameroje, prieš paskleidimą ant ledo bandinių pradėjo intensyviai sugerti drėgmę. Taip pat „Bionord Universal“ ir „Bionord Step“ pasireiškė mažu higroskopiskumu. NaCl druska taip pat greitai praranda efektyvumą, kuris buvo vienas iš didžiausių tarp visų SMM. „Nordway KF“ skystis buvo pats efektyviausias tirpalas tarp visų tirpalų, esant -3 , -6 ir -10°C temperatūroms, o jo efektyvumas taip pat lėtai mažėjo mažėjant temperatūrai. CMA granulės ir tirpalas pasižymėjo mažu efektyvumu, o ledo tirpinimo našumas santykinai greitai mažėjo. Vis dėlto, tai yra vienintelė medžiaga, kuri nei vienoje temperatūroje per 60 min neištirpo iki galo. Todėl tolimesnėse tyrimuose, būtų naudinga ištirti, šios SMM efektyvumą ilgesniuose laiko intervaluose, kol medžiaga visiškai neištirps.

2.6 lentelė. Ledo tirpdyimo efektyvumo SMM ir SMMt rezultatai

Nr.	SMM	Matavimo laikas, min	LTE SMM, %			LTE SMMt, %		
			-3 °C	-6 °C	-10 °C	-3 °C	-6 °C	-10 °C
1	Natrio chloridas	5	4,2	2,4	0,7	8,0	5,8	2,6
		60	11,3	4,6	2,3	22,1	10,6	7,9
2	Bionord Universal (mėlynas)	5	3,4	2,0	1,3	7,0	5,2	1,3
		60	9,5	7,9	2,1	20,9	9,1	5,8
3	Bionord Step (oranžinis)	5	3,8	2,1	1,0	6,9	3,7	1,1
		60	9,8	6,7	1,9	16,4	6,1	-0,1
4	Nordway KF (skystas)	5	-	-	-	16,0	11,9	11,5
		60	-	-	-	38,9	27,1	24,0
5	Nordway KN (granulės)	5	3,1	1,6	1,0	7,3	4,6	2,4
		60	8,9	5,8	2,0	17,0	6,4	6,1
6	Natrio acetatas	5	3,3	2,4	1,3	6,3	1,0	0,6
		60	6,2	3,8	1,8	9,2	1,0	0,3
7	Kalcio magnio acetatas (CMA)	5	1,5	0,6	0,1	4,4	2,2	0,2
		60	5,8	3,3	0,6	6,9	2,8	0,8
8	Kalcio chloridas (dribsniais)	5	4,8	4,1	1,3	6,8	3,8	1,9
		60	8,1	5,5	1,4	13,4	5,6	2,7
9	Bio-Circle Tiefen-Eisfrei	5	4,4	3,1	1,4	8,3	3,9	1,4
		60	9,1	6,0	1,7	19,4	5,4	1,3
10	Magnio chloridas (dribsniais)	5	3,8	2,9	1,2	6,8	0,9	-0,0
		60	6,2	4,6	2,0	7,0	1,3	0,2
	Efektyviausios SMM veikiant 5 min							

Nr.	SMM	Matavimo laikas, min	LTE SMM, %			LTE SMMt, %		
			-3 °C	-6 °C	-10 °C	-3 °C	-6 °C	-10 °C
	Efektyviausios SMM veikiant 60 min							
	Neefektyviausios SMM veikiant 5 min							
	Neefektyviausios SMM veikiant 60 min							
0,1	Pasireiškia užšalimas							



2.22 pav. Natrio acetate tirpalas esant -10 °C po 60 min, kuriame pasireiškė užšalimas

Dokumente DMMS-KP 06 (2006) nurodyti druskų ir jų mišinių panaudojimo kiekiai esant aplinkos temperatūroms 0, -5, -10 ir -15 °C ir susidarius ledui storui iki 3 mm. Todėl skverbimo į ledą analizė atlikta stebint prasiskverbimą pro 3 mm storio ledą ir bendrai pro visą ledą storį.

Sudarytos 2.7 lentelė ir 3 grafikai (2.23, 2.24, 2.25 pav.), skirti vizualiai palyginti laboratorijoje gautus įsiskverbimo į ledą rezultatus esant -3, -6 ir -10 °C temperatūroms, kai medžiaga sausa. Sušalęs ledas nustatytas 7,9–11,0 mm storio. Procentaliai, efektyviausiai prasiskverbė esant -3 °C temperatūrai: 100 % prasiskverbė NaCl, „Bionord Universal“, „Bionord Step“, 90 % – „Nordway KN“ ir 30 % CMA. Visiškai neprasiskverbė natrio acetatas, CaCl₂, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ ir MgCl₂. Procentaliai, efektyviausiai prasiskverbė esant -6 °C temperatūrai: 90 % prasiskverbė „Bionord Universal“, 80 % – NaCl, 70 % – „Bionord Step“ ir 60 % – „Nordway KN“. Visiškai neprasiskverbė natrio acetatas, CMA, CaCl₂, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ ir MgCl₂. Procentaliai efektyviausiai prasiskverbė, esant -10 °C temperatūrai: 30 % prasiskverbė „Nordway KN“, 20 % – NaCl, 10 % – „Bionord Universal“ ir „Bionord Step“. Visiškai neprasiskverbė natrio acetatas, CMA, CaCl₂, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ ir MgCl₂.

Pagal vidutinišką įsiskverbimo gylį, esant -3 °C temperatūrai, giliausiai prasiskverbė NaCl, „Bionord Universal“, „Bionord Step“ ir „Nordway KN“, o mažiausiai prasiskverbė MgCl₂, CaCl₂ ir natrio acetatas, esant -6 °C temperatūrai, giliausiai prasiskverbė NaCl, „Bionord Universal“, „Bionord Step“ ir „Nordway KN“, o mažiausiai prasiskverbė MgCl₂, natrio acetatas, CaCl₂, CMA ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, esant -10 °C temperatūrai

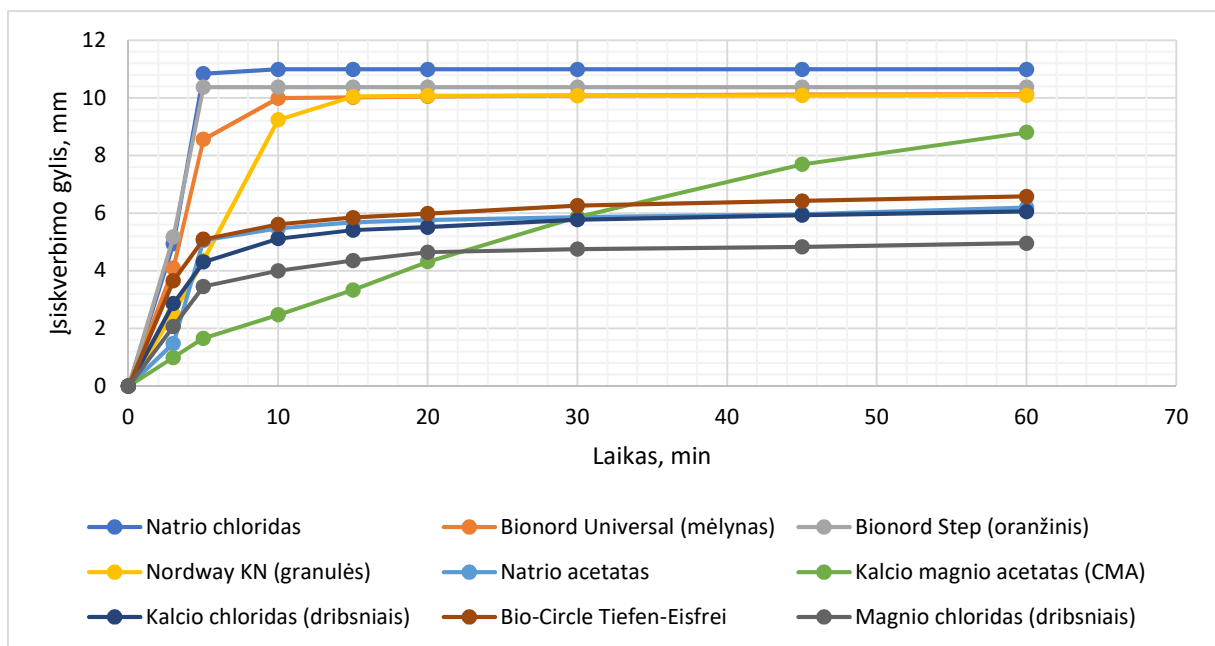
gyliausiai prasiskverbė „Bionord Step“, „Nordway KN“, NaCl ir „Bionord Universal“, mažiausiai prasiskverbė CMA, MgCl₂, CaCl₂, natrio acetatas ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“.

Palyginus su ledo tirpdyimo bandymais, „Nordway KN“ pasirodė efektyvus ir įsiskverbimo į ledą bandymuose, nes esant –10 °C temperatūrai procentaliai jis daugiausiai prasiskverbė. Įsiskverbimo bandymas su „Nordway KN“ ir CMA parodė, kad šių medžiagų efektyvumas labiau atskleidžia ilgesniuose laiko intervaluose. Tačiau CMA įsiskverbimo bandyme, esant –10 °C temperatūrai, prasiskverbė mažiausiai. Taigi, patvirtintas teiginys, kad ledo tirpdyimo ar įsiskverbimo efektyvumas mažėja, kai temperatūra mažėja arba naudojamas ilgesnis veikimo laikas.

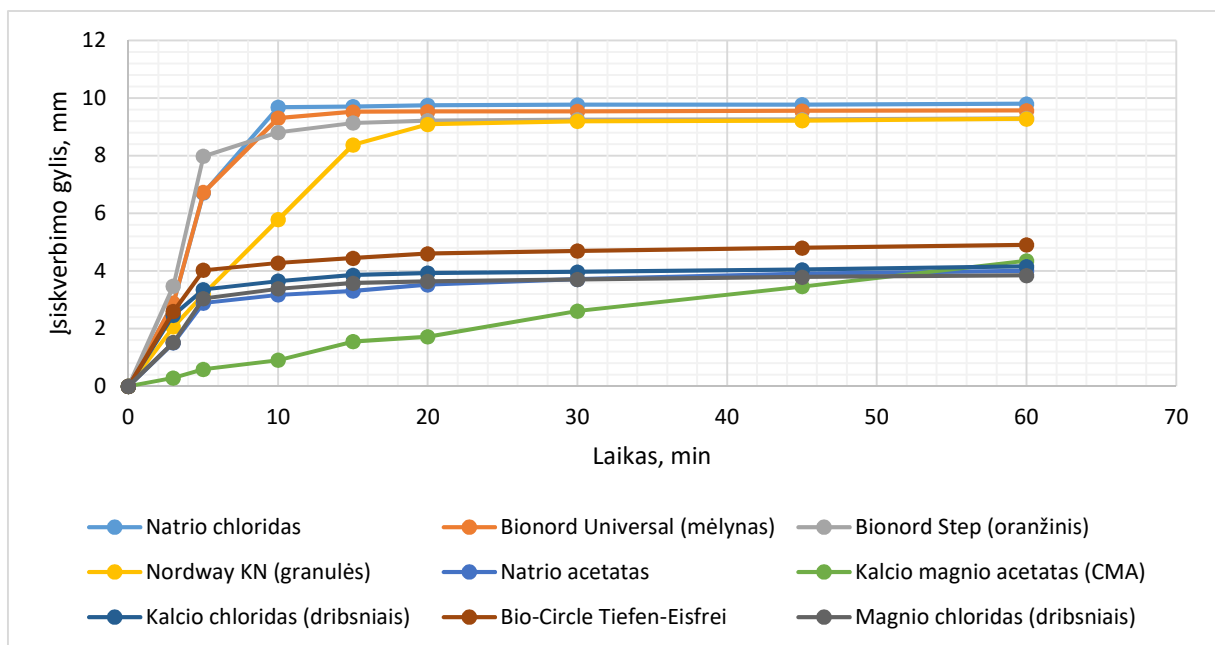
2.7 lentelė. SMM įsiskverbimo į 7,5 mm storio ledą rezultatai (pateikti gylio vidurkiai), kai temperatūra –3, –6 ir –10 °C

Matavimo laikas, min	Natrio chloridas	Bionord Universal (mėlynas)	Bionord Step (oranžinis)	Nordway KN (granulės)	Natrio acetatas	Kalcio magnio acetatas (CMA)	Kalci o chloridas	Bio-Circle Tiefen-Eisfrei	Magnio chloridas
–3 °C	1	2	3	5	6	7	8	9	10
3	4,94	4,10	5,18	2,50	1,48	1,00	2,87	3,66	2,07
5	10,85	8,57	10,38	4,37	5,06	1,66	4,31	5,10	3,46
10	10,99	10,00	10,38	9,25	5,47	2,48	5,12	5,62	4,01
15	10,99	10,02	10,38	10,05	5,68	3,34	5,42	5,85	4,36
20	10,99	10,06	10,38	10,08	5,77	4,32	5,52	5,99	4,65
30	10,99	10,09	10,38	10,09	5,86	5,88	5,78	6,27	4,75
45	10,99	10,12	10,38	10,09	5,97	7,70	5,93	6,43	4,83
60	10,99	10,13	10,38	10,09	6,20	8,81	6,06	6,58	4,96
Prasiskverbė viso dalelių, %	100	100	100	90	0	30	0	0	0
–6 °C	1	2	3	5	6	7	8	9	10
3	2,88	2,89	3,48	2,07	1,51	0,29	2,47	2,60	1,52
5	6,71	6,73	7,99	3,19	2,89	0,59	3,36	4,03	3,05
10	9,69	9,31	8,82	5,79	3,17	0,91	3,65	4,28	3,39
15	9,71	9,53	9,14	8,38	3,31	1,55	3,86	4,45	3,58
20	9,76	9,54	9,22	9,09	3,53	1,72	3,93	4,61	3,64
30	9,77	9,54	9,25	9,20	3,71	2,61	3,97	4,70	3,71
45	9,78	9,56	9,26	9,22	3,91	3,46	4,05	4,80	3,79
60	9,80	9,57	9,30	9,28	4,01	4,36	4,16	4,91	3,85
Prasiskverbė viso dalelių, %	80	90	70	60	0	0	0	0	0
–10 °C	1	2	3	5	6	7	8	9	10
3	1,34	2,05	1,62	1,07	0,98	0,15	1,80	2,51	1,36
5	2,01	3,70	3,43	2,03	2,14	0,31	2,69	3,25	1,84
10	6,73	5,62	8,37	3,03	2,86	0,57	2,94	3,50	1,99
15	7,46	6,93	8,76	4,07	3,28	0,80	3,04	3,57	2,14

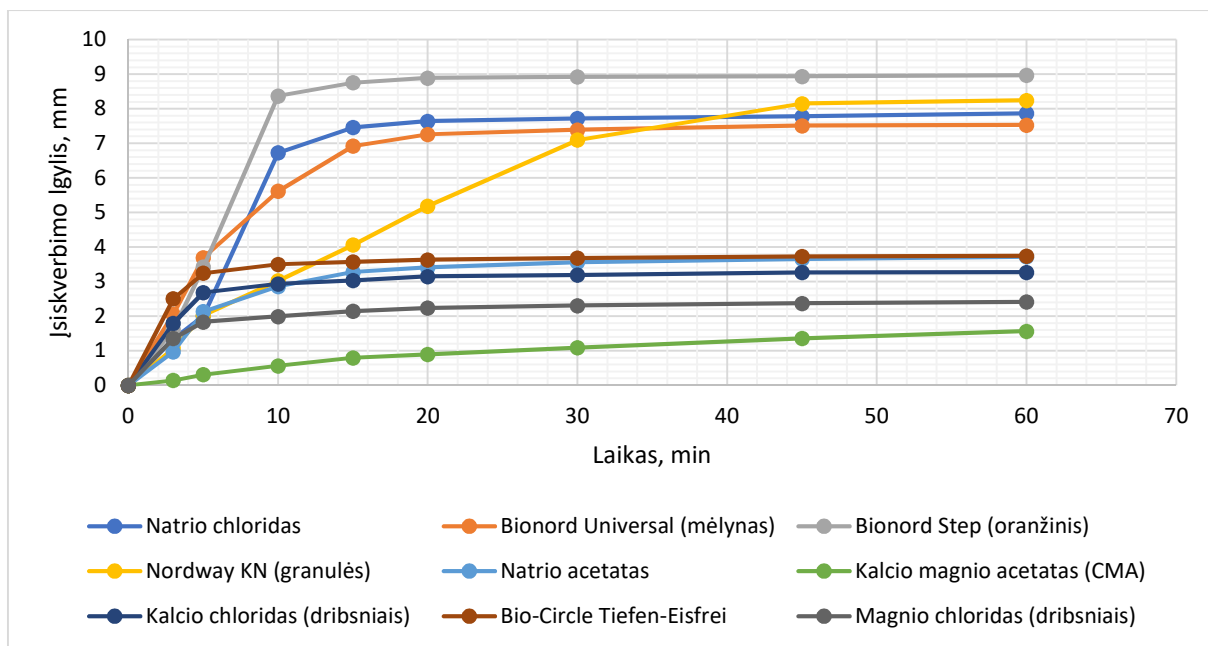
Matavimo laikas, min	Natrio chloridas	Bionord Universal (mėlynas)	Bionord Step (oranžinis)	Nordway KN (granulės)	Natrio acetatas	Kalcio magnio acetatas (CMA)	Kalci o chloridas	Bio-Circle Tiefen-Eisfrei	Magnio chloridas
20	7,64	7,26	8,89	5,19	3,41	0,90	3,15	3,63	2,24
30	7,72	7,39	8,92	7,10	3,56	1,09	3,19	3,68	2,31
45	7,78	7,51	8,94	8,15	3,65	1,36	3,27	3,73	2,37
60	7,87	7,53	8,97	8,24	3,72	1,57	3,27	3,74	2,42
Prasiskverbė viso dalelių, %	20	10	10	30	0	0	0	0	0



2.23 pav. Kietosios būsenos SMM įsiskverbimo gyliai esant –3 °C temperatūrai



2.24 pav. Kietosios būsenos SMM įsiskverbimo gyliai esant –6 °C temperatūrai



2.25 pav. Kietosios būsenos SMM įsiskverbimo gylio rezultatai esant $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai

Ledo tirpimo ir įsiskverbimo į ledą eksperimentų rezultatai parodė, kad pačios efektyviausios SMM yra NaCl, „Bionord Universal“, „Bionord Step“ ir „Nordway KF“. Šios medžiagos pasižymėjo didžiausiu efektyvumu, vertinant jas pagal abu tyrimo metodus. Neefektyviausiai pasirodė tokios SMM: CMA, natrio acetatas ir MgCl_2 ; tačiau negalima teigti, kad tos medžiagos visiškai neefektyvios, kadangi tam tikruose atvejuose jos demonstravo tam tikrą efektyvumą. Pavyzdžiui, CMA ir natrio acetatas parodė vidutiniškus rezultatus įsiskverbimo į ledą bandyme prie -3 ir $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, o sausas MgCl_2 pasirodė kaip viena iš efektyviausių SMM ledo tirpinimui prie -6 ir $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ per 5 ir 60 min intervalus.

Tirpalų naudojimas atskleidė, kad SMM efektyvumas stipriai priklauso nuo pačios SMM ir aplinkos sąlygų, nes palyginus su kietosiomis SMM, tirpalų efektyvumas stipriai didėja, esant $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, arba stipriai mažėja, esant $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai. Pavyzdžiui, kietosios būsenos NaCl, „Bionord Universal“, „Bionord Step“, „Nordway KF“ ir „Nordway KN“ efektyviai ištirpino ledą esant -3 ir -6 ir $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroms, o jų tirpalai ištirpino didesnę ledo kiekį. Sausa NaCl druska per 60 min ištirpino 11,3 % ledo masės esant $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4,6 % esant $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir 2,3 % esant $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, o tirpalas atitinkamai ištirpino 22,1 %, 10,6 % ir 7,9 % ledo masės. Tačiau žemesnėje nei $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje didelė dalis SMM tirpalų veikė priešingai: ištirpino mažiau ledo kiekio nei būdami kietojoje būsenoje, arba patys užšalo, kaip natrio acetatas ar „Bionord Step“. Tirpalų naudojimas parodė, kad jie greičiau pradeda tirpinti ledą, lyginant su kietosiomis SMM. Esant $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai visi tirti SMMt yra efektyvesni už sausas SMM. Esant $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai NaCl, „Bionord Universal“, „Nordway KF“ ir „Nordway KN“, tirpalai yra efektyvesni už tas pačias sausas SMM, o dideliu skirtumu nepasireiškė „Bionord Step“, CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen Eisfrei“ tirpalai. Esant $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

temperatūrai NaCl, „Bionord Universal“, „Nordway KF“ ir „Nordway KN“, CMA, CaCl₂ tirpalai yra efektyvesni už tas pačias sausas SMM, o dideliu skirtumu nepasireiškė „Bio-Circle Tiefen Eisfrei“ tirpalas.

2.8 lentelė. SMM svorinių koeficientų ir rangų nustatymas

Nr.	SMM	Svorinis koeficientas	Rangas
1	Techninė druska	8,6	1
2	Bionord Universal (mėlynas)	8,2	2
3	Bionord Step (oranžinis)	7,2	5
4	Nordway KF (skystas)	7,5	3
5	Nordway KN (granulės)	7,3	4
6	Natrio acetatas	4,6	8
7	Kalcio magnio acetatas	4,1	10
8	Kalcio chloridas	5,7	7
9	Bio-Circle Tiefen-Eisfrei	6,8	6
10	Magnio chloridas	4,5	9

Papildomai pritaikoma rangavimo sistema SMM efektyvumui, pasinaudojant matematiniais skaičiavimais. Įvedus svorinius koeficientus (ledo tirpdimui ir įsiskverbimui į ledą po 0,5), apskaičiuojamas kiekvienai SMM statistinis rezultatas ir pritaikomas rangas (2.8 lentelė). Pagal statistinį rezultatą SMM išsidėsto tokia tvarka nuo pačio efektyviausio: NaCl, „Bionord Universal“, „Nordway KF“, „Nordway KN“, „Bionord Step“, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, CaCl₂, natrio acetatas, MgCl₂, CMA.

2.4. Skyriaus išvados

1. Naudojant biriąsias SMM, esant aplinkos temperatūrai iki –3 °C, efektyviausiai ledą tirpdė NaCl ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
 - Natrio chloridas – 4,2 % (veikiant 5 min) ir 11,3 % (veikiant 60 min),
 - „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ – 4,4 % (veikiant 5 min) ir 9,1 % (veikiant 60 min).
2. Naudojant SMM tirpalus, esant aplinkos temperatūrai iki –3 °C, efektyviausiai ledą tirpdė NaCl ir „Nordway KF“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
 - Natrio chloridas – 7,9 % (veikiant 5 min) ir 22,1 % (veikiant 60 min),
 - „Nordway KF“ – 16,0 % (veikiant 5 min) ir 39,0 % (veikiant 60 min).
3. Naudojant biriąsias SMM, esant aplinkos temperatūrai iki –6 °C, efektyviausiai ledą tirpdė „Bionord Universal“ ir „Bionord Step“. Naudojant šias medžiagas, greito veikimo rezultatai tirpdant ledą buvo iki 50 % mažesni nei kitų medžiagų, tačiau laike ledo tirpymo

rezultatai buvo nustatyti iki 50 % didesni nei kitų medžiagų. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:

- „Bionord Universal“ – 2,0 % (veikiant 5 min) ir 7,9 % (veikiant 60 min),
 - „Bionord Step“ – 2,1 % (veikiant 5 min) ir 6,7 % (veikiant 60 min).
4. Naudojant SMM tirpalus, esant aplinkos temperatūrai iki -6°C , efektyviausiai ledą tirpdė NaCl ir „Nordway KF“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
- Natrio chloridas – 5,8 % (veikiant 5 min) ir 10,6 % (veikiant 60 min),
 - „Nordway KF“ – 11,9 % (veikiant 5 min) ir 27,1 % (veikiant 60 min).
5. Naudojant biriąsias SMM, esant aplinkos temperatūrai iki -10°C , efektyviausiai ledą tirpdė NaCl ir „Bionord Universal“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
- Natrio chloridas – 0,8 % (veikiant 5 min) ir 2,3 % (veikiant 60 min),
 - „Bionord Universal“ – 1,3 % (veikiant 5 min) ir 2,1 % (veikiant 60 min).
6. Naudojant SMM tirpalus, esant aplinkos temperatūrai iki -10°C , efektyviausiai ledą tirpdė NaCl ir „Nordway KF“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
- Natrio chloridas – 2,6 % (veikiant 5 min) ir 7,8 % (veikiant 60 min),
 - „Nordway KF“ – 11,5 % (veikiant 5 min) ir 24,0 % (veikiant 60 min).
7. Mažiausiai ledo nutirpdė Natrio acetatas ir Kalcio magnio acetatas (birus ir tirpalas), esant aplinkos temperatūrai -3°C , -6°C ir -10°C . Mažas ledo tirpdymo efektyvumas nustatytas ir MgCl_2 , ledo tirpdymo rezultatai panašūs, kaip ir natrio acetatu bei CMA. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
- Natrio acetatu (biri) – 3,3 % (veikiant 5 min) ir 6,2 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -3°C ; 2,4 % (veikiant 5 min) ir 3,8 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -6°C ; 1,3 % (veikiant 5 min) ir 1,8 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -10°C ;
 - Natrio acetatu (tirpalas) – 6,3 % (veikiant 5 min) ir 9,2 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -3°C ; 1,0 % (veikiant 5 min) ir 1,0 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -6°C ; 0,6 % (veikiant 5 min) ir 0,3 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -10°C ;
 - Kalcio magnio acetatu (biri) – 1,5 % (veikiant 5 min) ir 5,8 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -3°C ; 0,6 % (veikiant 5 min) ir 3,3 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -6°C ; 0,1 % (veikiant 5 min) ir 0,6 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -10°C ;
 - Kalcio magnio acetatu (tirpalas) – 4,4 % (veikiant 5 min) ir 6,9 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -3°C ; 2,2 % (veikiant 5 min) ir 2,8 %

- (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -6°C ; 0,2 % (veikiant 5 min) ir 0,8 % (veikiant 60 min), esant aplinkos temperatūrai iki -10°C .
8. Ledo tirpdyimo efektyvumas NaCl, tiek naudojant burią medžiagą, tiek tirpalą, esant aplinkos sąlygoms -3°C , -6°C ir -10°C nustatytas vienas geriausių.
9. Naudojant SMM tirpalus ledų tirpdyimo efektyvumas nustatytas iki 50 % didesnis nei biromis SMM.
10. Esant aplinkos temperatūrai -3°C , įsiskverbimo į ledą tyrimai parodė, kad pro:
- 3,0 mm storio ledą NaCl, „Bionord Universal“, „Bionord Step“ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ prasiskverbė kiek mažiau nei per 3 min., kai tuo tarpu prasiskverbimas „Nordway KN“, natrio acetatu, CMA, CaCl_2 ir MgCl_2 truko beveik 5 min.
 - nustatytas 7,9–11,0 mm storio ledą NaCl, „Bionord Universal“ ir „Bionord Step“ prasiskverbė kiek mažiau nei per 5 min., „Nordway KN“ per 10 min., o natrio acetatas, CMA, CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ ir MgCl_2 neprasiskverbė net pro 7,0 mm storio ledą praėjus 60 min.
11. Esant aplinkos temperatūrai -6°C , įsiskverbimo į ledą tyrimai parodė, kad pro:
- 3,0 mm storio ledą Bionord Universal prasiskverbė kiek mažiau nei per 3 min, o NaCl, „Bionord Step“, „Nordway KN“, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, CaCl_2 ir MgCl_2 prasiskverbė kiek mažiau nei per 5 min, kai tuo tarpu prasiskverbimas natrio acetatu truko beveik 10 min., o CMA – 45 min.
 - nustatytas 7,9–11,0 mm storio ledą „Bionord Universal“ prasiskverbė kiek mažiau nei per 5 min., NaCl ir „Bionord Step“ per 10 min., o natrio acetatas, CMA, CaCl_2 , Bio-Circle Tiefen-Eisfrei ir MgCl_2 neprasiskverbė net pro 7,0 mm storio ledą praėjus 60 min.
12. Esant aplinkos temperatūrai -10°C , įsiskverbimo į ledą tyrimai parodė, kad pro:
- 3,0 mm storio ledą nei viena SMM neprasiskverbė kiek mažiau nei per 3 min., o „Bionord Universal“, „Bionord Step“ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ prasiskverbė kiek mažiau nei per 5 min, kai tuo tarpu prasiskverbimas NaCl ir „Nordway KN“ truko beveik 10 min, CaCl_2 ir natrio acetatu truko beveik 15 min, o CMA ir MgCl_2 visiškai neprasiskverbė.
 - nustatytas 7,9–11,0 mm storio ledą „Bionord Step“ prasiskverbė kiek mažiau nei per 10 min., „Nordway KN“ per 45 min., NaCl ir „Bionord Universal“ prasiskverbė pro 7,0 mm ledų storį per 20 min, o natrio acetatas, CMA, CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ ir MgCl_2 neprasiskverbė net pro 7,9 mm storio ledą praėjus 60 min.

13. Ledo tirpdyimo ir įsiskverbimo į ledą eksperimentai parodė, kad efektyviausios SMM yra NaCl, „Bionord Universal“ ir „Nordway KF“. Taikant rangavimą šios medžiagos buvo įvertintos kaip efektyviausios atitinkamai 1, 2 ir 3 vietose. Mažiausias efektyvumas nustatytas magnio chloridas, natrio acetatas ir kalcio magnio acetatas, kurie taikant rangavimo sistemą užėmė atitinkamai 8, 9 ir 10 vietas. Tačiau tos medžiagos nėra visiškai neefektyvios. Svarbu pabrėžti, kad net ir žemiausiose pozicijose esančios SMM tam tikrose situacijose yra efektyvios. Todėl galutinis pasirinkimas priklauso nuo konkrečių panaudojimo sąlygų ir poreikių.

3. SLIDUMĄ MAŽINANČIŲ MEDŽIAGŲ EFEKTYVUMO NUSTATYMO REZULTATŲ ANALIZĖ

3.1. Eksperimentinių tyrimų metu gautų rezultatų interpretacija, lyginant su kitų mokslininkų atliktų tyrimų išvadomis

Atlikus laboratorijoje atliktų tyrimų rezultatų analizę, pereinama prie jų interpretacijos. Gauti tyrimų rezultatai palyginti su kitų mokslininkų ir tyrėjų gautais rezultatais. Taip pat lyginami laboratorijoje gauti rezultatai su ankščiau darytų bandymų rezultatais. Be to, atsižvelgta į aplinkos sąlygas ir naudojamų metodų nukrypimus nuo SHRP H-332 (1992) metodikų vadove pateiktų metodų.

SHRP H205.1 (1992) ir SHRP H-205.2 (1992) standartų metodikuose yra pateikti pavyzdžiai kietųjų bei skystųjų ledą tirpdančių cheminių medžiagų, kurios buvo tikrinamos ledo tirpinimo bandymuose. Tarp jų yra tokios SMM: NaCl ir CaCl_2 granulės, 26,3 % NaCl ir 37,3 % CaCl_2 koncentracijų tirpalai bei etilenglikolis. Etilenglikolis tai organinis junginys, bespalvis skystis, kuris plačiai naudojamas kaip antifrizas. Šiek tiek toksiškas, nes turi neigiamą poveikį organizmų nervų sistemai (Laurinavičius et al., 2011). Bandymai vyko prie $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrų, paskleiziant 4,17 g kietosios medžiagos arba 3,8 ml skystosios medžiagos ant ledo bandinio paviršiaus. Gauti rezultatai yra matuojami ištirpinto ledo mase vienam gramui SMM arba SMMt. Prie $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ po 60 min efektyviausiai suveikė NaCl ir CaCl_2 granulės (jų rezultatai yra labai panašūs 6,91 ir 6,79 g/g atitinkamai), antroje vietoje yra etilenglikolis, trečioje – CaCl_2 tirpalas, ketvirtoje – NaCl tirpalas. Prie $-9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ po 60 min efektyviausiai suveikė CaCl_2 granulės (jo rezultatas yra 3,89 g/g), antroje vietoje yra NaCl granulės, trečioje – etilenglikolis, ketvirtoje – CaCl_2 tirpalas, penktoje – NaCl tirpalas. Prie $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ po 60 min efektyviausiai suveikė CaCl_2 granulės (jo rezultatas yra 3,05 g/g), antroje vietoje yra etilenglikolis, trečioje – NaCl granulės, ketvirtoje – CaCl_2 tirpalas, penktoje – NaCl tirpalas. Etilenglikolis ledo tirpinimui yra efektyvesnis už tirpalus prie visų trijų temperatūrų, bet silpniau pasirodo nei sausos NaCl ir CaCl_2 granulės, išskyrus tik prie $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ etilenglikolis efektyvesnis už NaCl granulės, bet vis tiek silpnesnis už CaCl_2 granules. Taip pat NaCl ir CaCl_2 tirpalų koncentracija skiriasi, todėl jų efektyvumą yra sunku palyginti tarpusavyje ir su laboratorijoje gautais rezultatais. Tarp sausų medžiagų, prie $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ po 60 min NaCl yra efektyviausias bei tai sutampa su SHRP H-205 (1992) pateiktų rezultatų prie $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir prie $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ po 60 min NaCl yra efektyviausias bei tai nesutampa su SHRP H-205 (1992) pateiktų rezultatų prie $-9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Laboratoriniuose bandymuose efektyviau pasirodė tirpalai nei sausos SMM, tačiau tai susiję su skleidžiamu SMMt kiekiu: laboratoriniuose tyrimuose ant ledo

bandinio, kuriam pagaminti buvo panaudota 30 g distiliuoto vandens, skleidžiama 3,23 g 20 % koncentracijos tirpalus, o SHRP H-205 (1992) standartuose ant ledo bandinio, kuriam pagaminti buvo panaudota 130 ml distiliuoto vandens, skleidžiama 3,8 ml skirtingos koncentracijos tirpalus.

3.1 lentelė. Palyginimas ledo tirpymo kietosios būsenos NaCl ir CaCl₂, 26,3 % NaCl ir 37,3 % CaCl₂ tirpalų, etilenglikolio bandymo laboratorinių rezultatų su SHRP H-205.1 (1992) ir SHRP H-205.2 (1992) standartų rezultatais

SMM	Matavimo laikas, min	SHRP H-205 (1992) ištirpinto ledo masė (Ledo sluoksnio storis 3,175 mm įpilant 130 ml vandens, skleidžiant 4,17 g SMM arba 3,8 ml SMMt), g/ 1 g SMM (SMMt)			LTE rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 3 bandymų rezultato vidurkiai, esant 30 g ledo bandinio masei), %		
		-3,9 °C (25 °F)	-9,4 °C (15 °F)	-15 °C (5 °F)	-3 °C	-6 °C	-10 °C
NaCl(k)	5	-	-	-	4,2	2,4	0,7
	10	2,03	0,70	0,22	-	-	-
	20	3,56	1,37	0,33	-	-	-
	30	4,96	2,12	0,58	-	-	-
	45	6,09	2,89	0,85			
	60	6,91	3,57	1,16	11,3	4,6	2,3
CaCl ₂ (k)	5	-	-	-	4,8	4,1	1,3
	10	2,75	1,75	1,14	-	-	-
	20	4,58	2,86	2,46	-	-	-
	30	5,47	3,35	2,79	-	-	-
	45	6,28	3,65	2,98			
	60	6,79	3,89	3,05	8,1	5,5	1,4
NaCl (26,3 %* ir 20 %**)	5	-	-	-	8,0	5,8	2,6
	10	1,15	0,64	0,24	-	-	-
	20	1,51	0,69	0,27	-	-	-
	30	1,69	0,75	0,27	-	-	-
	45	1,81	0,80	0,28	-	-	-
	60	1,99	0,80	0,29	22,1	10,6	7,9
CaCl ₂ (37,3 %* ir 20 %**)	5	-	-	-	6,8	3,8	1,9
	10	1,65	1,10	0,78	-	-	-
	20	2,03	1,29	0,86	-	-	-
	30	2,35	1,38	0,89	-	-	-
	45	2,56	1,45	0,90	-	-	-
	60	2,73	1,48	0,91	13,4	5,6	2,7
Etilenglikolis (skystis, C ₂ H ₆ O ₂)	10	2,97	1,99	1,66	-	-	-
	20	3,89	2,34	1,67	-	-	-
	30	4,43	2,56	1,76	-	-	-
	45	4,93	2,72	1,84	-	-	-
	60	5,24	2,83	1,89	-	-	-
(k) – SMM kietoji būseną * - SMMt koncentracija nurodyta SHRP H-205							

SMM	Matavimo laikas, min	SHRP H-205 (1992) ištirpinto ledo masė (Ledo sluoksnio storis 3,175 mm įpilant 130 ml vandens, skleidžiant 4,17 g SMM arba 3,8 ml SMMt), g/ 1 g SMM (SMMt)			LTE rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 3 bandymų rezultato vidurkiai, esant 30 g ledo bandinio masei), %		
		-3,9 °C (25 °F)	-9,4 °C (15 °F)	-15 °C (5 °F)	-3 °C	-6 °C	-10 °C
** - SMMt koncentracija naudojama laboratorijoje atlikti bandymus							

3.2 lentelėje pateiktas palyginimas ledo tirpdymo NaCl ir CaCl₂ (kietojoje būsenoje) eksperimentinių tyrimų metu gautų rezultatų su SHRP H-205.3 (1992) rezultatais. Kaip yra matoma NaCl prasiskverbė pro ledo sluoksnį mažiau žemesnėje temperatūroje. Gautuose SHRP H-205.3 (1992) standarte ir laboratorijoje rezultatuose yra matoma, kad įsiskverbimo dalelių intensyvumas mažėja matuojant ilgesnius laiko intervalus. SHRP H-205.3 (1992) standarto ir laboratorijoje gauti rezultatai yra labai panašūs, išskyrus CaCl₂ medžiagos rezultatas prie -15 °C palyginus jį su rezultatu prie -10 °C. Pagal SHRP CaCl₂ efektyvumas nemažėja taip greitai, kaip laboratoriniuose rezultatuose, ir dalelės įsiskverbė iki 9,4 mm gylio. Tačiau laboratoriniuose rezultatuose CaCl₂ granulės prie -3 °C prasiskverbė iki 6,06 mm, prie -6 °C prasiskverbė iki 4,16 mm, prie -10 °C prasiskverbė iki 3,27 mm. Nors CaCl₂ granulės yra efektyvios žemose temperatūrose, tačiau yra skirtumas yra dėl pačios metodikos atlikimo, kadangi laboratorijoje nebuvo specialaus matavimo prietaiso (2.20 pav.), todėl bandymams atlikti buvo naudojami stikliniai apvalūs indeliai.

3.2 lentelė. Palyginimas įsiskverbimo į ledą kietosios būsenos NaCl ir CaCl₂ druskų bandymo rezultatų, gautų laboratorijoje, su SHRP H-205.3 (1992) standarto rezultatais

SMM	Matavimo laikas, min	SHRP H-205.3 (granulės masė 22-26 mg), mm			IG rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 10 bandymų rezultato vidurkiai, esant 7,5 mm ledo storiui), mm		
		-6,7 °C (20 °F)	-9,4 °C (15 °F)	-15 °C (5 °F)	-3 °C	-6 °C	-10 °C
NaCl(k)	3	1,0	0,5	-	4,94	2,88	1,34
	5	1,9	1,3	-	10,85	6,71	2,01
	10	3,6	2,1	-	10,99*	9,69	6,73
	15	5,1	3,2	-	10,99*	9,71	7,46
	20	6,7	4,0	-	10,99*	9,76	7,64
	30	10,0	5,7	-	10,99*	9,77	7,72
	45	13,1	8,9	-	10,99*	9,79	7,78
	60	13,4	10,4	-	10,99*	9,80	7,87
CaCl ₂ (k)	3	-	-	1,4	2,87	2,47	1,8
	5	-	-	2,3	4,31	3,36	2,69
	10	-	-	4,2	5,12	3,65	2,94
	15	-	-	6,2	5,42	3,86	3,04
	20	-	-	7,6	5,52	3,93	3,15
	30	-	-	9,3	5,78	3,97	3,19

SMM	Matavimo laikas, min	SHRP H-205.3 (granulės masė 22-26 mg), mm			ĮG rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 10 bandymų rezultato vidurkiai, esant 7,5 mm ledo storiui), mm		
		–6,7 °C (20 °F)	–9,4 °C (15 °F)	–15 °C (5°F)	–3 °C	–6 °C	–10 °C
	45	-	-	9,4	5,93	4,05	3,27
	60	-	-	9,5	6,06	4,16	3,27
(k) – SMM kietoji būseną							
* - visos SMM granulės prasiskverbė pro ledą iki lekštelės dugno							

3.3 lentelėje pateiktas palyginimas ledo tirpimo NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂ (kietojoje būsenoje) bei 23 % NaCl tirpalo eksperimentinių tyrimų metu gautų rezultatų su Shi ir Akino (2010) rezultatais. Rezultatai Shi ir Akino (2010) parodo, kad po 60 min prie –9,4 °C daugiausiai ištirpino ledo NaCl sausa druska, antroje vietoje CaCl₂, trečioje – MgCl₂, ketvirtoje – 23 % koncentracijos NaCl tirpalas. Laboratorijoje gautieji rezultatai po 60 min prie –10 °C daugiausiai ištirpino ledo 20 % koncentracijos NaCl tirpalas, antroje vietoje NaCl, trečioje – MgCl₂, ketvirtoje – CaCl₂. Ištirpintus ledo kiekius lyginti negalima, nes ledo bandinių masė ir paskleisti SMM kiekiai skiriasi: šaltinyje naudojami ledo bandiniui pagaminti iš 25 ml vandens, o ant jų bandinių paskleisdžiamas po 1 g sausos medžiagos arba po 0,9 ml SMM tirpalo, laboratorijoje ledo bandiniui pagaminti iš 30 g vandens, o ant bandinių paskleisdžiamas po 0,26 g sausos medžiagos arba po 3,23 g. SMM tirpalo. Shi ir Akino (2010) rekomenduoja modifikuotą SHRP ledo tirpimo testą atlikti pakartotinai kitose laboratorijose, nes gauti tyrimo rezultatai yra riboto pasitikėjimo.

3.3 lentelė. Palyginimas ledo tirpimo kietosios būsenos NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂ bei 23 % NaCl tirpalo druskų bandymo laboratorijoje gautų rezultatų su Shi ir Akino (2010) rezultatais

SMM	Matavimo laikas, min	Shi ir Akinas (2010) (ledo bandiniui pagaminti 25 ml vandens, paskleista sausos medžiagos 1 g, tirpalo 0,9 ml), ml		LTE rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 3 bandymų rezultato vidurkiai, esant 30 g ledo bandinio masei), %		
		–1,1 °C (30 °F)	–9,4 °C (15 °F)	–3 °C	–6 °C	–10 °C
NaCl(k)	10	1,0	1,1/1,5	-	-	-
	20	1,8	1,7/1,9	-	-	-
	30	2,6	2,4/2,2	-	-	-
	45	3,7	2,8/3,2	-	-	-
	60	5,3	3,2/3,5	11,3	4,6	2,3
NaCl (tirpalo koncentracija 20%)	5	-	-	8,0	5,8	2,7
	60	-	-	22,1	10,6	7,9
NaCl (tirpalo koncentracija 23%)	10	1,9/1,9/2,1	1,0/1,2	-	-	-
	20	2,4/2,4/2,7	1,1/1,2	-	-	-
	30	2,8/2,7/3,1	1,1/1,2	-	-	-
	45	3,2/3,2/3,4	1,1/1,2	-	-	-

SMM	Matavimo laikas, min	Shi ir Akinas (2010) (ledo bandiniui pagaminti 25 ml vandens, paskleista sausos medžiagos 1 g, tirpalo 0,9 ml), ml		LTE rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 3 bandymų rezultato vidurkiai, esant 30 g ledo bandinio masei), %		
		-1,1 °C (30 °F)	-9,4 °C (15 °F)	-3 °C	-6 °C	-10 °C
	60	3,6/3,4/3,5	1,1/1,2	-	-	-
CaCl ₂ (k)	10	2,0	2,2/2,8	-	-	-
	20	2,7	2,5/3,1	-	-	-
	30	3,5	2,7/3,2	-	-	-
	45	4,2	2,9/3,1	-	-	-
	60	5,3	3,0/3,2	8,1	5,5	1,4
MgCl ₂ (k)	10	2,7	2,2/2,1	-	-	-
	20	3,5	2,4/2,4	-	-	-
	30	4,0	2,4/2,5	-	-	-
	45	4,5	2,5/2,5	-	-	-
	60	4,9	2,5/2,5	6,2	4,6	2,0
(k) – SMM kietoji būseną						

3.4 lentelėje pateiktas palyginimas įsiskverbimo į ledą NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂ (kietojoje būsenoje) eksperimentinių tyrimų metu gautų rezultatų su Shi ir Akinu (2010) rezultatais. Rezultatai Shi ir Akinu (2010) ir gauti laboratorijoje parodo, kad gyiliausiai prasiskverbė NaCl druska, antroje vietoje CaCl₂, trečioje – MgCl₂. Taip pat matosi, kad bandymo pradžioje įsiskverbimas vyksta intensyviau, o link bandymo pabaigos įsiskverbimo intensyvumas mažėja. Pavyzdžiui, CaCl₂ prie -10 °C ir -9,4 °C beveik sustoja skverbtis po 45 ir 30 min atitinkamai temperatūroms. Shi ir Akinu neįtraukė didžiausius ir mažiausius įsiskverbimo gylius į vidutinį įsiskverbimo gylį bei modifikuoto SHRP H-205 (1992) ledo įsiskverbimo testo atlikinėti nerekomenduoja.

3.4 lentelė. Palyginimas įsiskverbimo į ledą kietosios būsenos NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂ druskų bandymo laboratorijoje gautų rezultatų su Shi ir Akinu (2010) rezultatais

SMM	Matavimo laikas, min	Shi ir Akinas (2010), mm		ĮG rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 10 bandymų rezultato vidurkiai, esant 7,5 mm ledo storiui), mm		
		-1,1 °C (30 °F)	-9,4 °C (15 °F)	-3 °C	-6 °C	-10 °C
NaCl(k)	10	6,4/5,8	3,0/3,7/3,4	10,99*	9,69	6,73
	20	11,9/8,3	3,8/4,4/4,4	10,99*	9,76	7,64
	30	14,1/11,3	4,0/5,0/5,1	10,99*	9,77	7,72
	45	15,7/17,5	3,7/5,6/5,3	10,99*	9,79	7,78
	60	18,8/19,8	4,7/5,9/5,8	10,99*	9,80	7,87
CaCl ₂ (k)	10	4,7/5,1	1,2/2,5/2,7	5,12	3,65	2,94
	20	5,9/6,5	1,8/3,3/2,8	5,52	3,93	3,15
	30	7,6/7,2	2,0/3,6/2,9	5,78	3,97	3,19

SMM	Matavimo laikas, min	Shi ir Akinas (2010), mm		ĮG rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 10 bandymų rezultato vidurkiai, esant 7,5 mm ledo storiui), mm		
		-1,1 °C (30 °F)	-9,4 °C (15 °F)	-3 °C	-6 °C	-10 °C
	45	9,0/8,6	2,0/3,9/3,3	5,93	4,05	3,27
	60	10,3/9,6	2,0/4,2/3,6	6,06	4,16	3,27
MgCl ₂ (k)	10	2,4/3,3	2,2/2,5/1,9	4,08	3,39	1,99
	20	2,7/4,8	2,5/2,8/2,0	4,65	3,64	2,24
	30	4,0/5,5	2,6/3,1/2,3	4,75	3,71	2,31
	45	6,1/6,8	2,8/3,2/2,3	4,83	3,79	2,37
	60	8,3/7,8	2,9/3,4/2,7	4,96	3,85	2,42
(k) – SMM kietoji būsena						
* - visos SMM granules prasiskverbė pro ledą iki lekštelės dugno						

Ratkevičius (2016) savo disertacijoje tyrė ledo trikdymą su penkiomis sausomis SMM: NaCl, CaCl₂, MgCl₂, natrio ir kalcio modifikuotų chloridų mišinys (NCCM), kurio sudėtyje 75 % NaCl ir 25 % CaCl₂ „Ice-melt“ gamintojo, natrio acetato ir natrio formiato mišinys „Nordway“ (NANF). Eksperimentas buvo vykdomas atsižvelgiant į SHRP H-332 (1992) metodikas. Ledo bandiniai buvo 30x30 cm kvadratai užpilti su 266 g vandens, kad gautusi 3 mm sluoksnis, ir įdėti į šaldymo kamerą šaldytis. Ant užšaldytų bandinių buvo skleidžiamos fr. 0,5/1 mm stambumo SMM po 10 g. Eksperimentas buvo kartojamas prie –3 °C, –6 °C, –9 °C, –15 °C ir –20 °C temperatūrų bei matavimai truko 4, 10, 20, 30, 60 ir 120 minučių. Po SMM veikimo ledo bandiniai išimami, ištirpęs tirpalas nupilamas ir ledas po veikimo bei ištirpęs skystis buvo sveriami. Įvertinti gautus rezultatus buvo naudojama tokia pati formulė, kaip naudojama ledo masės nuostolius skaičiuoti šiame magistro darbe. Gauti rezultatai pateikti 3.5 lentelėje, kurioje taip pat jie palyginami su laboratorijoje gautais rezultatais. Ratkevičius nustatė, kad laiko intervale nuo 10 iki 20 minučių ledo tirpimo intensyvumas yra mažesnis nei 0,5 %/min. Taip pat jis nustatė, kad esant ne žemesnei temperatūrai nei –3 °C NaCl, NANF ir NCCM yra didelio efektyvumo, tuo metu CaCl₂ ir MgCl₂ yra vidutinio efektyvumo, esant –6 °C temperatūrai NaCl ir NCCM yra vidutinio efektyvumo, o mažu efektyvumu pasireiškė NANF, CaCl₂ ir MgCl₂, esant –9 °C temperatūrai visos penkios SMM yra mažo efektyvumo, esant –15 °C ir žemesnei temperatūrai tik CaCl₂ ir MgCl₂ išlaiko mažą efektyvumą, o NaCl, NANF ir NCCM tampa visiškai neefektyvios (Ratkevičius, 2016). Lyginant su laboratorijoje gautais rezultatais NaCl, MgCl₂ ir CaCl₂ veikia panašiai. Tačiau, esant –10 °C temperatūrai, mažiausia kiekį prie 5 minučių ištirpino NaCl, po to MgCl₂, o efektyviausias gavo CaCl₂, o po 60 minučių daugiausiai ištirpino NaCl, antroje vietoje MgCl₂, o trečioje – CaCl₂. Esant –3 °C temperatūrai, per 60 min didžiausia kiekį ištirpino NaCl, antroje vietoje CaCl₂, trečioje – MgCl₂, per 5 min didžiausia kiekį ištirpino CaCl₂, antroje vietoje NaCl, trečioje – MgCl₂.

Rezultatai atvirkščiai nei pas Ratkevičių, kur, esant -3°C temperatūrai, per 60 min daugiausiai ištirpino NaCl, antroje vietoje yra CaCl_2 ir MgCl_2 , o per 4 min MgCl_2 , antroje vietoje CaCl_2 , trečioje – NaCl. Tendencija ledo tirpdimui mažėti, priklauso nuo temperatūros: ko mažesnė temperatūra, to mažesnis SMM ledo tirpdimas efektyvumas.

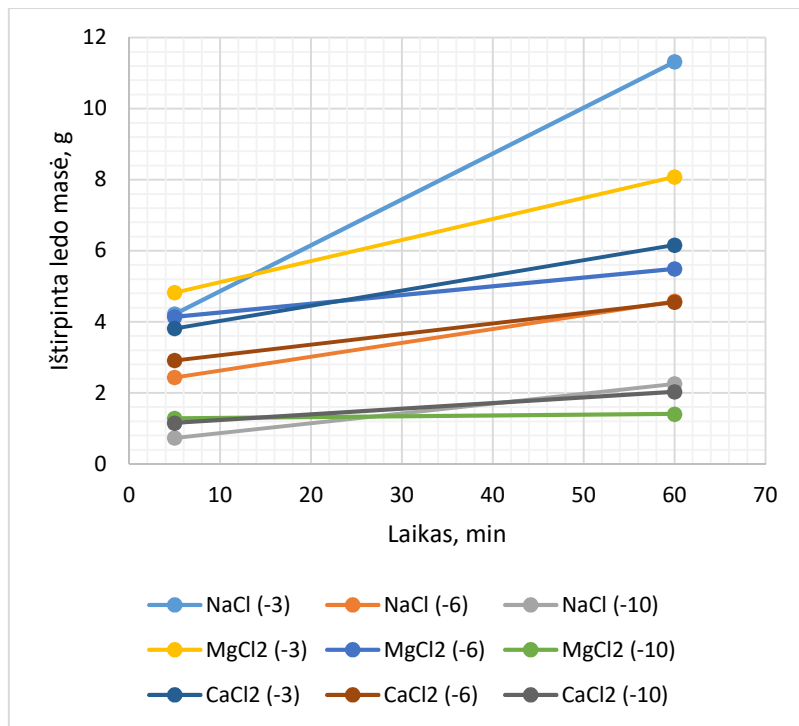
3.5 lentelė. Palyginimas ledo tirpdimas kietosios būsenos NaCl, CaCl_2 , MgCl_2 , NANF ir NCMC druskų bandymo laboratorijoje gautų rezultatų su Ratkevičius (2016) rezultatais

SMM	Matavimo laikas, min	Ratkevičius (2016), %/min				LTE rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 3 bandymų rezultato vidurkiai, esant 30 g ledo bandinio masei), %		
		-3°C	-6°C	-9°C	-15°C	-3°C	-6°C	-10°C
NaCl(k)	4	1,0	0,5	0,3	0,1	-	-	-
	5	-	-	-	-	4,2	2,4	0,7
	10	1,7	1,0	0,5	0,2	-	-	-
	20	0,3	0,2	0	0	-	-	-
	30	1,7	0,5	0,4	0,2	-	-	-
	60	0,2	0,2	0	0	11,3	4,6	2,3
	120	0	0	0	0	-	-	-
CaCl_2 (k)	4	2,3	2,0	2,0	1,2	-	-	-
	5	-	-	-	-	4,8	4,1	1,3
	10	0,9	0,5	0,3	0,1	-	-	-
	20	0,1	0	0,1	0	-	-	-
	30	0,6	0,2	0,3	0	-	-	-
	60	0,1	0	0	0	8,1	5,5	1,4
	120	0,1	0	0	0	-	-	-
MgCl_2 (k)	4	3,1	2,5	2,2	1,7	-	-	-
	5	-	-	-	-	3,8	2,9	1,2
	10	0,6	0,4	0,4	0,1	-	-	-
	20	0,1	0	0,1	0	-	-	-
	30	0,4	0	0,1	0	-	-	-
	60	0,1	0,1	0	0	6,2	4,6	2,0
	120	0	0	0	0	-	-	-
NANF(k)	4	1,4	0,7	0,3	0,1	-	-	-
	10	1,2	0,8	0,5	0	-	-	-
	20	0,2	0,1	0,3	0	-	-	-
	30	1,1	0,5	0,1	0,1	-	-	-
	60	0,3	0,2	0	0	-	-	-
	120	0,1	0	0	0	-	-	-
NCMC(k)	4	1,1	0,8	1,0	0,4	-	-	-
	10	1,1	0,8	0,4	0,2	-	-	-
	20	0,4	0,4	0	0	-	-	-
	30	1,8	0,7	0,3	0,1	-	-	-
	60	0,3	0,2	0,1	0	-	-	-
	120	0,1	0	0	0	-	-	-

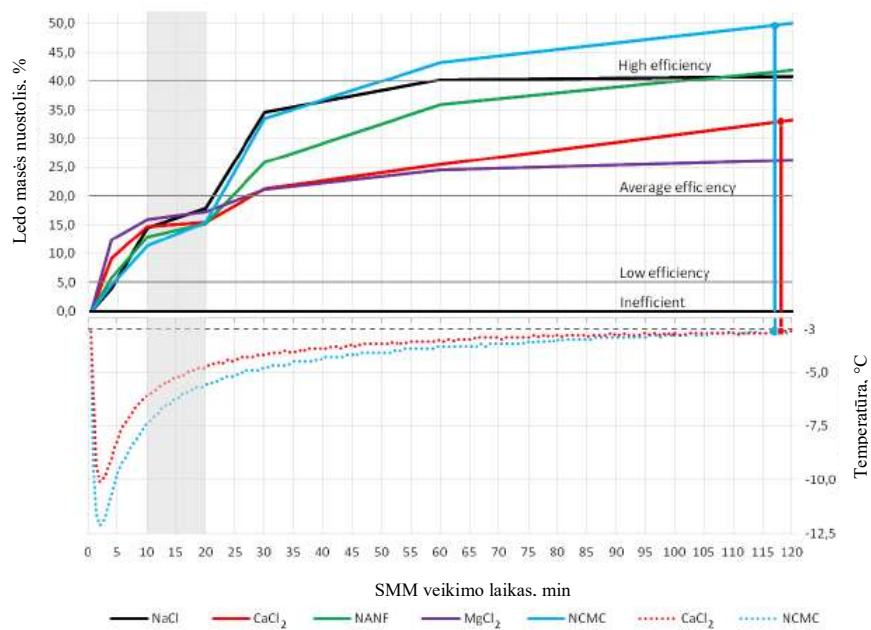
SMM	Matavimo laikas, min	Ratkevičius (2016), %/min				LTE rezultatai gauti laboratorijoje (pateikti 3 bandymų rezultato vidurkiai, esant 30 g ledo bandinio masei), %		
		-3 °C	-6 °C	-9 °C	-15 °C	-3 °C	-6 °C	-10 °C
(k) – SMM kietoji būsena								

Laurinavičius ir kt. (2016) analizę atlieka atsižvelgiant į Ratkevičiaus (2016) gautus rezultatus. Atliekant laboratorinį SMM efektyvumo eksperimentą, nustatė, kad nepriklausomai nuo aplinkos temperatūros ir naudojamų SMM, ledo tirpimo intensyvumas labai sumažėjo per laiko intervalą nuo 10 iki 20 minučių. Tyrėjai patvirtina, kad CaCl_2 įtaka ledo tirpimui pasireiškia greičiau nei NaCl atveju. Pagal ledo tirpimo efektyvumą SMM buvo suskirstyti į šias kategorijas: esant $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, NaCl , NANF ir NCMC buvo didelio efektyvumo, o CaCl_2 ir MgCl_2 – vidutinio efektyvumo, esant $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, NaCl ir NCMC buvo vidutinio efektyvumo, o NANF , CaCl_2 ir MgCl_2 – žemo efektyvumo, esant $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, visi tirti SMM buvo mažo efektyvumo, esant $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, CaCl_2 ir MgCl_2 buvo mažo efektyvumo, o NaCl , NANF ir NCMC – neveiksmingi. SMM galima suskirstyti ir pagal laiko intervalus, kuriais SRM buvo veiksmingi: esant $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, SMM veikė iki 120 minučių, esant $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, SMM veikė nuo 50 iki 70 min, esant $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, SMM veikė nuo 15 iki 22 min laiko intervalu, esant $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, SMM veikė nuo 30 iki 32 min laiko intervalu (Laurinavičius et al., 2016). Esant $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, SMM veikimas pasireiškė dviem etapais tyrimo laiko intervale: iškart po SMM paskleidimo ir maždaug po pusvalandžio, priklausomai nuo naudojamos medžiagos.

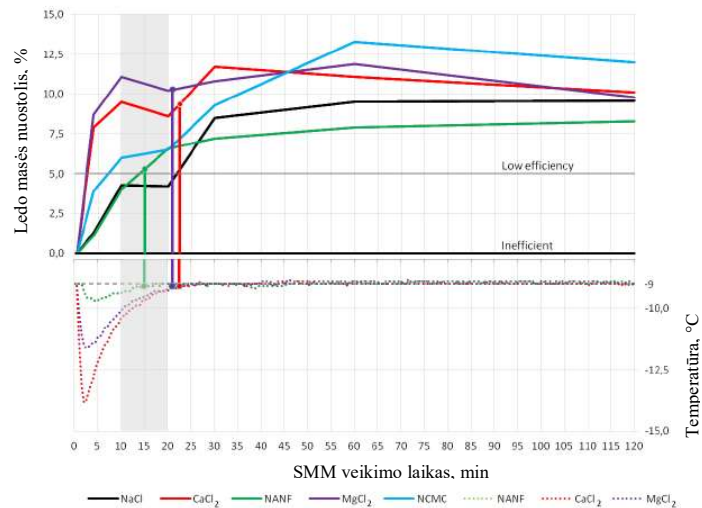
Bulevičius ir kt. (2013) savo straipsnyje pateikia NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 , natrio ir kalcio modifikuotų chloridų mišinio (NCMC) ir natrio acetato ir natrio formiato mišinio (NANF) veikimus prie $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3.2, 3.3 pav.). Palyginimui sudaromas laboratorijoje gautų rezultatų grafikas (3.1 pav.). Remiantis Bulevičiaus ir kt. (2013) tyrimo rezultatais, iš NaCl , CaCl_2 ir MgCl_2 efektyviausia SMM esant $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai yra NaCl , nes per 60 min jis ištirpina didžiausią ledo kiekį. Nors MgCl_2 iš pradžių tirpinimo procesą vykdė greičiau, vėliau jo tirpinimo intensyvumas sumažėjo, ir CaCl_2 šią medžiagą aplenkė, tačiau NaCl tirpinimo intensyvumo vis tiek nepasiekė.



3.1 pav. NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂ ledo tirpdymo grafikas per 5 ir 60 min esant –3 °C, –6 °C bei –9 °C



3.2 pav. Ledo masės nuostolis ir paviršiaus temperatūros pokytis ($t = -3$ °C) (Bulevičius, 2013; Laurinavičius, 2014)



3.3 pav. Ledo masės nuostolis ir paviršiaus temperatūros pokytis ($t = -9\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Bulevičius, 2013; Laurinavičius, 2014)

Anot Bulevičiaus ir kt. (2013) tyrimo rezultatus, iš NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂ efektyviausia SMM esant $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai yra MgCl₂, nes per 60 min jis ištirpina didžiausią ledo kiekį. NaCl buvo mažiausiai efektyvus. Visoms trims medžiagoms bandymo pradžioje būdingas didelis intesyvumas, tačiau su laiku jis stipriai sumažėja ir ledo tirpinimas beveik nutrūksta. Taip pat CaCl₂ ir MgCl₂ druskos bandymo metu stebimas užšalimas. Tai reiškia, kad ištirpintas ledas palaipsniui vėl pradėjo užšalti. Panaši situacija buvo pastebėta ir laboratorijoje atliktame natrio acetato tirpalo tyrime.

Bulevičius ir kt. (2013) bei kiti tyrėjai savo rezultatais patvirtino teiginį, kad ledo tirpdymo arba įsiskverbimo į ledą efektyvumas mažėja, mažėjant temperatūrai arba naudojant ilgesnį veikimo laiką. Tai reiškia, kad SMM efektyvumas priklauso nuo temperatūros, laiko ir cheminių savybių. Atliekant ledo tirpinimo bandymus, Bulevičius ir kt. (2013) bei Chappelow et al. (1992) nustatė, kad CaCl₂ druska žemesnėje nei $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje demonstruoja geresnį efektyvumą, palyginti su laboratorijoje gautais rezultatais ir Shi ir Akino (2010), Ratkevičiaus (2016) rezultatais. Tačiau, dauguma tyrėjų konstatavo, jog NaCl druska yra dažniausiai efektyviausia tarp NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂. Ypač ryškiai NaCl efektyvumas atsiskleidžiamas aukštesnėje nei $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje.

2021 m. Vaitkus ir kt. (2021) atliko ledo tirpdymo efektyvumo ir įsiskverbimo į ledą eksperimentus. Ledo tirpdymo efektyvumo tyrimo trukmė buvo pasirinkta 10 ir 45 min, o temperatūros tokios pačios, kaip ir šiame magistro darbe ($-3, -6, -10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Paskleidžiamas sausų SMM kiekis ant ledo bandinių atitinka $0,26\text{ g}$ (40 g/m^2), o tirpalų – $3,23\text{ g}$. Ledo bandiniams gaminti buvo naudojami $9,0\text{ cm}$ skersmens apvalūs stikliniai indeliai, į kuriuos įpilama po 30 g distiliuoto vandens. Šiame magistro darbe atliekami tyrimai yra pratęsimas Vaitkaus ir kt. (2021) tyrimų. Anot Vaitkaus ir kt. (2021) ledo tirpdymo efektyvumo tyrimas parodė, kad

efektyviausios sausos SMM: per 10 min esant -3°C temperatūrai yra NaCl, CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, „Bionord Universal“, MgCl_2 , per 10 min esant -6°C temperatūrai yra „Bionord Universal“, NaCl, „Nordway KN“, „Bionord Step“, per 10 min esant -10°C temperatūrai yra „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, CaCl_2 , MgCl_2 , per 45 min esant -3°C temperatūrai yra „Bionord Universal“, NaCl, CaCl_2 , „Bionord Step“, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, per 45 min esant -6°C temperatūrai yra NaCl, „Bionord Step“, CaCl_2 , „Bionord Universal“, „Nordway KN“, per 45 min esant -10°C temperatūrai yra CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, „Bionord Universal“. Analizuojant SMM veikimo tendencijas, nustatyta, kad esant -3°C ir -6°C temperatūroms geriausią efektyvumą demonstruoja NaCl, „Bionord Universal“, CaCl_2 , „Bionord Step“, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, o esant -10°C temperatūrai – „Bionord Universal“, CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“. SMM veikiant 10, 45 ir 60 min efektyviausiai pasireiškė NaCl, „Bionord Universal“, „Bionord Step“, „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, o veikiant 5, 10 ir 45 min „Bionord Universal“, CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“. Didžioji dauguma SMM demonstruoja tendenciją, kad kuo ilgesnis veikimo laikas, tuo daugiau ledo jie ištirpina, o mažėjant temperatūrai SMM efektyvumas mažėja. Prieštaringi rezultatai gauti esant -10°C temperatūrai, kai per 60 min visi SMM ištirpino mažiau ledo nei per 45 min. Tačiau šis prieštaravimas paaiškinamas tuo, kad esant -10°C temperatūrai SMM yra mažai efektyvūs ir jų tirpinimo intensyvumas po 20 min tampa pakankamai mažas. Be to, veikiant SMM gali pasireikšti pakartotinis užšalimas.

3.6 lentelė. Vaitkus ir kt. (2021) sausų SMM rezultatų papildymas su laboratorijoje gautais rezultatais

SMM	LTE (rezultatai gauti laboratorijoje), %			LTE (Vaitkus ir kt., (2021)), %						LTE (rezultatai gauti laboratorijoje), %		
	5 min			10 min.			45 min.			60 min		
	-3°C	-6°C	-10°C	-3°C	-6°C	-10°C	-3°C	-6°C	-10°C	-3°C	-6°C	-10°C
1 Natrio chloridas	4,2	2,4	0,7	5,55	4,23	2,29	6,92	5,59	2,99	11,3	4,6	2,3
2 Bionord Universal	3,4	2,0	1,3	4,81	4,30	2,84	7,66	5,19	3,30	9,5	7,9	2,1
3 Bionord Step	3,8	2,1	1,0	4,32	4,11	2,91	6,76	5,34	2,90	9,8	6,7	1,9
5 Nordway KN	3,1	1,6	1,0	4,34	4,15	2,86	5,73	5,06	2,72	8,9	5,8	2,0
6 Natrio acetatas	3,3	2,4	1,3	4,13	2,92	2,54	5,20	3,91	2,13	6,2	3,8	1,8
7 Kalcio magnio acetatas	1,5	0,6	0,1	2,52	1,93	0,68	4,75	2,78	0,85	5,8	3,3	0,6
8 Kalcio chloridas	4,8	4,1	1,3	5,13	3,66	3,09	6,78	5,30	3,82	8,1	5,5	1,4
9 Bio-Circle Tiefen-Eisfrei	4,4	3,1	1,4	4,93	3,73	3,17	6,68	4,45	3,33	9,1	6,0	1,7

SMM	LTE (rezultatai gauti laboratorijoje), %			LTE (Vaitkus ir kt., (2021)), %						LTE (rezultatai gauti laboratorijoje), %		
	5 min			10 min.			45 min.			60 min		
	-3 °C	-6 °C	-10 °C	-3 °C	-6 °C	-10 °C	-3 °C	-6 °C	-10 °C	-3 °C	-6 °C	-10 °C
10 Magnio chloridas	3,8	2,9	1,2	4,78	3,41	3,09	6,26	4,05	2,91	6,2	4,6	2,0
	Efektyviausių SMM rezultatai gauti laboratorijoje											
	Efektyviausių SMM rezultatai, kaip teigiama Vaitkaus ir kt. (2021) darbe											

Anot Vaitkaus ir kt. (2021) ir laboratorijoje gautų rezultatų analizės, ledo tirpymo efektyvumo tyrimas parodė, kad „Nordway KF“ yra efektyviausias esant -3, -6 ir -10 °C temperatūroms. Be to, per 60 min SMM veikimo laiką NaCl ir „Bionord Universal“ pasirodė efektyvūs, o CMA, natrio acetatas ir MgCl₂ – neefektyvūs. Ledo tirpymo efektyvumo tendencija su SMM atitinka sausų SMM tendenciją: mažėjant temperatūrai, SMM efektyvumas mažėja, o ilgėjant SMM veikimo laikui, ištirpinamo ledo kiekis didėja. Tačiau, kaip matyti iš 3.7 lentelės, Vaitkaus ir kt. (2021) tyrime, atliktame esant -6 °C ir -10 °C temperatūroms per 60 min, SMM ištirpino didesnę ledo kiekį nei laboratorijoje. Dėl neaiškių priežasčių rekomenduojama atlikti daugiau tyrimų tokiomis sąlygomis. Taip pat tirpalai ištirpino didesnę ledo kiekį nei sausos SMM. Atliktame laboratoriniame tyrime dar du SMM – „Nordway KN“ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ – kai kuriais atvejais taip pat pasižymėjo efektyvumu.

3.7 lentelė. Palyginimas Vaitkaus ir kt. (2021) SMMt rezultatų su laboratorijoje gautais rezultatais

SMM	LTE, %								
	5 min			60 min			60 min.(Vaitkus ir kt. (2021))		
	-3 °C	-6 °C	-10 °C	-3 °C	-6 °C	-10 °C	-3 °C	-6 °C	-10 °C
1 NaCl	8,0	5,8	2,6	22,1	10,6	7,9	27,71	18,88	13,26
2 Bionord Universal	7,0	5,2	1,3	20,9	9,1	5,8	26,06	17,53	12,82
3 Bionord Step	6,9	3,7	1,1	16,4	6,1	-0,1	22,80	14,57	10,39
4 Nordway KF	16,0	11,9	11,5	38,9	27,1	24,0	42,19	32,86	24,62
5 Nordway KN	7,3	4,6	2,4	17,0	6,4	6,1	23,79	16,12	11,34
6 Natrio acetatas	6,3	1,0	0,6	9,2	1,0	0,3	16,90	10,22	8,46
7 Kalcio magnio acetatas	4,4	2,2	0,2	6,9	2,8	0,8	18,17	11,73	8,09
8 Kalcio chloridas	6,8	3,8	1,9	13,4	5,6	2,7	22,38	15,62	11,28
9 Bio-Circle Tiefen-Eisfrei	8,3	3,9	1,4	19,4	5,4	1,3	21,95	14,85	10,70
10 Magnio chloridas	6,8	0,9	-0,0	7,0	1,4	0,2	17,38	10,89	7,91

0,953	Pasireiškia užšalimas
	Efektyviausių SMMt rezultatai gauti laboratorijoje
	Efektyviausių SMMt rezultatai, kaip teigiama Vaitkaus ir kt. (2021) darbe
	Neefektyviausių SMMt rezultatai, kaip teigiama Vaitkaus ir kt. (2021) darbe

Vaitkaus ir kt. (2021) darbe aprašomas įsiskverbimo į ledą tyrimas, atliktas esant -6°C temperatūrai. Tyrimo metu 0,26 g SMM buvo paskleidžiami ant ledo bandinių, kurių storis buvo 4,5 mm ir 7,5 mm. 4,5 mm storio ledo bandiniams gaminti buvo naudojama 30 g distiliuoto vandens, o 7,5 mm storio – 60 g. 4,5 mm storio ledo rezultatų stebėjimas vyko po 10 min, o 7,5 mm storio – po 5 ir 10 min. Rezultatai parodė, kad esant -6°C temperatūrai per 10 min visos SMM prasiskverbė pro 4,5 mm storio ledą. Pro 7,5 mm storio ledą per 5 min prasiskverbė tik „Bionord Step“ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, o per 10 min prasiskverbė „Bionord Universal“, „Bionord Step“, „Nordway KN“, CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“, MgCl_2 . Laboratorijoje atliktas įsiskverbimo tyrimas skiriasi nuo Vaitkaus ir kt. (2021) tyrimo, nes šiuo atveju buvo skleidžiama po 10 granulių ant ledo bandinio. Kiekviena granulė buvo stebima atskirai, o granulių įsiskverbimo gylį matuoti buvo naudojamas slankmatis.

3.8 lentelė. SMM prasiskverbimo 4,5 mm ir 7,5 mm storio ledu vizualinio tyrimo rezultatai, kai temperatūra yra -6°C (Vaitkus ir kt., 2021)

SMM	-6°C		
	7,5 mm		4,5 mm
	Po 5 min.	Po 10 min.	Po 10 min.
1 NaCl	-	-	+
2 Bionord Universal	-	+	+
3 Bionord Step	+	+	+
5 Nordway KN (granulės)	-	+	+
6 Natrio acetatas	-	-	+
7 Kalcio magnio acetatas	-	-	+
8 Kalcio chloridas	-	+	+
9 Bio-Circle Tiefen-Eisfrei	+	+	+
10 Magnio chloridas	-	+	+

Laboratorijoje atlikto tyrimo rezultatai parodė, kad esant -6°C temperatūrai, procentaliai efektyviausi buvo šie SMM: 90 % prasiskverbė „Bionord Universal“ pro 7,5 mm ledo storį per 60 min, 80 % – NaCl, 70 % – „Bionord Step“ ir 60 % – „Nordway KN“. Visiškai neprasiskverbė natrio acetatas, CMA, CaCl_2 , „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ ir MgCl_2 . Vaitkaus ir kt. (2021) tyrimo rezultatai parodė, kad „Bionord Universal“, „Bionord Step“ ir „Nordway KN“ SMM prasiskverbė į ledą taip pat, kaip ir laboratorijoje atliekant tyrimus. Tačiau, skirtingai nei laboratorijoje gauti rezultatai, Vaitkaus ir kt. (2021) tyrimas parodė, kad CaCl_2 ,

MgCl₂ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ taip pat prasiskverbė pro 7,5 mm storio ledo sluoksnį. Rezultatų skirtumai gali būti siejami su bandymo metodikos skirtingu atlikimu. Ledo tirpdymo efektyvumo tyrime CaCl₂, MgCl₂ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ pasižymėjo pakankamai geru ledo tirpinimo efektyvumu. Tačiau vienos granulės veikimas įsiskverbiant į ledą, kurios svoris neviršija 0,03 g, yra nepakankamas, kad SMM prasiskverbtų pro 7,5 mm storio ledo sluoksnį. NaCl prasiskverbimas pasireiškė tik po 10 min. Tai leidžia daryti prielaidą, kad per 5 ir 10 min išbarstytas medžiagos kiekis nespėjo prasiskverbti pro ledą. Natrio acetatas ir CMA taip pat neprasiskverbė per 10 min nei viename iš tyrimų.

3.2. Kelių priežiūros žiemą medžiagų reikalavimų atnaujinimo pasiūlymai

Išanalizavus ledą šalinančių medžiagų atviras kainos internete 3.9 lentelėje pateiktų mažiausių kainų rezultatus. Paieškai atlikti buvo ieškomi ir analizuojami įvairiausių tiekėjų pasiūlymai. Kadangi medžiagos kaina priklauso nuo tiekėjo, perkamo kiekio, pirkėjo ir t.t., buvo priimtas sprendimas ieškoti 25 kg maišus sausos SMM, nes toks kiekis dažniausiai pasitaikydavo prekyboje. Kaip yra matoma iš lentelės, pigiausios SMM yra „Bionord Step“ (0,23 Eur/kg), NaCl (0,32 Eur/kg), „Bionord Univeral“ (0,59 Eur/kg), brangiausios yra natrio acetatas (3,50 Eur/kg), „Nordway KF“ (1,54 Eur/kg), „Nordway KN“ (1,52 Eur/kg), „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ (1,21 Eur/kg). Kainos atitinka 2024 metų balandžio mėnesiui.

3.9 lentelė. SMM kainos pagal 2024 m. balandžio mėn.

Nr.	Medžiaga	Cheminė formulė	Kaina, Eur/kg
1	Techninė druska/Natrio chloridas	NaCl	0,32
2	Bionord Universal (mėlynas)		0,59
3	Bionord Step (oranžinis)		0,23
4	Nordway KF (skystas)	CHKO ₂	1,54
5	Nordway KN (granulės)	CHKO ₂	1,52
6	Natrio acetatas	CH ₃ COONa·3H ₂ O	3,50
7	Kalcio magnio acetatas (CMA)	CaMg ₂ (CH ₃ COO) ₆	0,62
8	Kalcio chloridas (dribsniais)	CaCl ₂	0,75
9	Bio-Circle Tiefen-Eisfrei		1,21
10	Magnio chloridas (dribsniais)	MgCl ₂	0,86

Šalies ekonomikos požiūriu SMM naudojimas kelia keletą svarbių klausimų. Kadangi SMM nėra pigios, reikalingas detalesnis ekonominis tyrimas ir naudos bei kaštų analizė. Pagal turimus duomenis, pigiausios laboratoriniame tyrime naudojamos SMM yra „Bionord Step“ (0,23 Eur/kg), NaCl (0,32 Eur/kg), „Bionord Univeral“ (0,59 Eur/kg), o brangiausios yra natrio acetatas (3,50 Eur/kg), „Nordway KF“ (1,54 Eur/kg), „Nordway KN“ (1,52 Eur/kg), „Bio-

Circle Tiefen-Eisfrei“ (1,21 Eur/kg). Kaip matyti iš kainos ir gautų efektyvumo rezultatų, „Bionord Step“ ir „Bionord Universal“ mišinius, kurių sudėtyje yra inhibitorių, galima naudoti plačiai barstant kelius žiemą. Juose taip pat yra NaCl. Šis faktas, patraukli kaina ir artimas „Bionord Step“ bei „Bionord Universal“ efektyvumas grynai NaCl druskai leidžia šias dvi SMM naudoti kaip alternatyvą grynai NaCl druskai, tačiau jų naudojimas turi būti sąmoningas, racionalus bei ribojamas, nes jų sudėtyje yra cheminių medžiagų, turinčių neigiamą poveikį aplinkai, įvairioms konstrukcijoms ir mechanizmams, o inhibitoriai ne visiškai pašalina, o tik sušvelnina neigiamą tradicinių SMM poveikį. Kitų šalių praktiką rodo, kad alternatyvios SMM nėra labai plačiai naudojamos, tačiau neaišku ar tai lemia medžiagų efektyvumas, kaina, ar neigiamas poveikis.

Šiais laikais aplinkos saugos klausimas yra itin aktualus. Todėl atliekant platesnius ledo šalinimo ir slidumo mažinimo tyrimus, būtina įvertinti naudojamų SMM poveikį aplinkai: vandens tvenkiniams, gyvūnams, metalinėms, betoninėms ir kitoms konstrukcijoms ir plieninėms mechanizmams ir jų elementams, kelio dangai. Naudojant statistinius ir kitus matematinius metodus, sukuriama svoriniai koeficientai prieš tai minėtiems rodikliams ir SMM reitinguojamos nuo efektyviausių ir mažiausiai žalingų iki neefektyviausių ir labiausiai žalingų.

Siūloma sukurti metodikas SMM efektyvumui tikrinti laboratorinėmis ir lauko sąlygomis, kadangi metodus aprašytus SHRP H-332 (1992) tyrimų metų teko adaptuoti. Siūloma ledo tirpdymui naudoti ne metodikoje nurodytus cheminių druskų kiekius, bet išskaičiuoti ir naudoti kiekius pagal tirpdomo ledo plotą (pvz. kai nurodytas medžiagos kiekis 1 m^2). Į metodikas, atlikus papildomus rato sukibimo su ledo paviršiaus tyrimus, galėtų būti įtrauktas ir rato sukibimo su ledo paviršiaus tyrimo metodika ir svarba.

Ledo tirpdyimo bandymo metu SMMt pasirodė itin efektyvūs. Atsižvelgiant į gautų tyrimų rezultatus, jų efektyvumas esant -3°C temperatūrai yra didesnis nei biriųjų SMM. Todėl siūloma nustatyti SMMt išpurškimo scenarijus esant atitinkamai neigiamai aplinkos temperatūrai.

3.3. Skyriaus išvados

1. Pigiausios SMM yra „Bionord Step“ (0,23 Eur/kg), NaCl (0,32 Eur/kg), „Bionord Universal“ (0,59 Eur/kg), o brangiausios yra natrio acetatas (3,50 Eur/kg), „Nordway KF“ (1,54 Eur/kg), „Nordway KN“ (1,52 Eur/kg), „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ (1,21 Eur/kg).
2. Bulevičius ir kt. (2013), Vaitkus ir kt. (2021) ir kiti tyrėjai savo rezultatais patvirtino teiginį, kad ledo tirpdyimo arba įsiskverbimo į ledą efektyvumas mažėja, mažėjant temperatūrai arba naudojant ilgesnį veikimo laiką. Tai reiškia, kad SMM efektyvumas priklauso nuo temperatūros, laiko ir cheminių savybių.

3. Atliekant ledo tirpinimo bandymus Bulevičius ir kt. (2013), Chappelow et al. (1992), CaCl_2 druska žemesnėje nei $-9\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje parodė geresnį efektyvumą, nei laboratorijoje gautuose rezultatuose bei Shi ir Akino (2010), Ratkevičiaus (2016) darbuose. Atliktų kitų mokslinių tyrimų analizė parodė, kad NaCl druska dažniausiai yra efektyviausia tarp NaCl, CaCl_2 ir MgCl_2 . Šis laboratorinis tyrimas patvirtino, kad NaCl druska buvo taip pat efektyviausia ledo tirpinimo medžiaga tarp visų tirtų SMM.
4. Vaitkus ir kt. (2021) atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad naudojant biriąsias SMM, esant aplinkos temperatūrai iki $-3\text{ }^\circ\text{C}$, efektyviausiai ledą tirpdė NaCl, „Bionord Universal“ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
 - Natrio chloridas – 5,5 % (veikiant 10 min) ir 6,9 % (veikiant 45 min),
 - „Bionord Universal“ – 4,8 % (veikiant 10 min) ir 7,7 % (veikiant 45 min),
 - „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ – 4,9 % (veikiant 10 min) ir 6,7 % (veikiant 45 min).
5. Naudojant biriąsias SMM, esant aplinkos temperatūrai iki $-6\text{ }^\circ\text{C}$, efektyviausiai ledą tirpdė NaCl, „Bionord Universal“ ir „Bionord Step“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
 - Natrio chloridas – 4,2 % (veikiant 10 min) ir 5,6 % (veikiant 45 min),
 - „Bionord Universal“ – 4,3 % (veikiant 10 min) ir 5,2 % (veikiant 45 min),
 - „Bionord Step“ – 4,1 % (veikiant 10 min) ir 5,3 % (veikiant 45 min).
6. Naudojant biriąsias SMM, esant aplinkos temperatūrai iki $-10\text{ }^\circ\text{C}$, efektyviausiai ledą tirpdė CaCl_2 ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
 - Kalcio chloridas – 3,1 % (veikiant 10 min) ir 3,8 % (veikiant 45 min),
 - „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ – 3,2 % (veikiant 10 min) ir 3,3 % (veikiant 45 min).
7. Naudojant SMM tirpalus, esant aplinkos temperatūrai iki -3 , -6 ir $-10\text{ }^\circ\text{C}$, efektyviausiai ledą tirpdė NaCl ir „Nordway KF“. Ištirpdyta ledo dalis SMM nustatyta:
 - Natrio chloridas – 27,7, 18,9 ir 13,26 % atitinkamoms temperatūroms (veikiant 60 min),
 - „Nordway KF“ – 42,2, 32,9 ir 24,6 % atitinkamoms temperatūroms (veikiant 60 min).
8. Esant aplinkos temperatūrai $-6\text{ }^\circ\text{C}$, įsiskverbimo į ledą tyrimai parodė, kad pro:
 - 4,5 mm storio ledą visos SMM prasiskverbė kiek mažiau nei per 10 min.
 - 7,5 mm storio ledą „Bionord Step“ ir „Bio-Circle Tiefen-Eisfrei“ prasiskverbė kiek mažiau nei per 5 min, o „Bionord Universal“, „Nordway KN“, CaCl_2 ir MgCl_2 prasiskverbė kiek mažiau nei per 10 min, kai tuo tarpu prasiskverbimas NaCl, natrio acetatu ir CMA, truko ilgiau nei 10 min.
9. Šiame darbe ir Vaitkus ir kt. (2021) atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad abiejuose darbuose SMM efektyvumas, nustatytas tyrimų metu, sutampa. Todėl didžiausias efektyvumas

nustatytas NaCl, „Bionord Universal“ ir „Nordway KF“, o mažiausias – MgCl₂, natrio acetatui ir CMA.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Išanalizavus Lietuvos ir užsienio literatūrą, buvo nustatyta, kad egzistuoja dvių kategorijų SMM: cheminės ir frikcinės medžiagos. SMM, jų tirpalų arba mišinių barstymo, išpurškimo kiekis ant kelio dangos priklauso nuo aplinkos temperatūros ir naudojamos medžiagos rūšies. Esant vienodai aplinkos temperatūrai, 1 m² plotui reikia skirtingo kiekio atitinkamų SMM, kadangi jų efektyvumas skiriasi. Kai kurių SMM nerekomenduojama naudoti esant labai žemai temperatūrai. Pavyzdžiui, NaCl druskos tirpalą nerekomenduojama taikyti labai žemose temperatūrose (iki –6 °C, kaip rekomenduoja KPV (2015)).
2. Ledo tirpdymo efektyvumas NaCl, tiek naudojant burią medžiagą, tiek tirpalą, esant aplinkos sąlygoms –3 °C, –6 °C ir –10 °C nustatytas vienas geriausių.
3. Ledo tirpdymo ir įsiskverbimo į ledą eksperimentai parodė, kad efektyviausios SMM yra NaCl, „Bionord Universal“ ir „Nordway KF“. Taikant rangavimą šios medžiagos buvo įvertintos kaip efektyviausios atitinkamai 1, 2 ir 3 vietose. Mažiausias efektyvumas nustatytas magnio chloridas, natrio acetatas ir kalcio magnio acetatas, kurie taikant rangavimo sistemą užėmė atitinkamai 8, 9 ir 10 vietas. Tačiau tos medžiagos nėra visiškai neefektyvios. Svarbu pabrėžti, kad net ir žemiausiose pozicijose esančios SMM tam tikrose situacijose yra efektyvios. Todėl galutinis pasirinkimas priklauso nuo konkrečių panaudojimo sąlygų ir poreikių.
4. Bulevičius ir kt. (2013), Vaitkus ir kt. (2021) ir kiti tyrėjai savo rezultatais patvirtino teiginį, kad ledo tirpdymo arba įsiskverbimo į ledą efektyvumas mažėja, mažėjant temperatūrai arba naudojant ilgesnį veikimo laiką. Tai reiškia, kad SMM efektyvumas priklauso nuo temperatūros, laiko ir cheminių savybių.
5. Atliekant ledo tirpinimo bandymus Bulevičius ir kt. (2013), Chappelow et al. (1992), CaCl₂ druska žemesnėje nei –9 °C temperatūroje parodė geresnį efektyvumą, nei laboratorijoje gautuose rezultatuose bei Shi ir Akino (2010), Ratkevičiaus (2016) darbuose. Atliktų kitų mokslinių tyrimų analizė parodė, kad NaCl druska dažniausiai yra efektyviausia tarp NaCl, CaCl₂ ir MgCl₂. Šis laboratorinis tyrimas patvirtino, kad NaCl druska buvo taip pat efektyviausia ledo tirpinimo medžiaga tarp visų tirtų SMM.
6. Hipotezė, kad alternatyvių slidumą mažinančių medžiagų efektyvumas tirpdant ledą yra panašus arba atitinkamomis sąlygomis geresnis nei NaCl, nepasitvirtino. Eksperimento rezultatų ir statistinių apskaičiavimų analizė parodė, jog NaCl druska išlieka efektyviausia slidumą mažinančia chemine medžiaga. Visgi, dvi alternatyvos – „Bionord Step“ ir „Bionord Universal“ – pasižymi panašiu efektyvumu kaip ir gryna NaCl druska. Tad šias

dvi alternatyvas galima naudoti kelių priežiūrai žiemą, įvertinus jų poveikį aplinkai, įvairioms konstrukcijoms bei mechanizmams.

SIŪLYMAI

1. Siūloma sukurti metodikas SMM efektyvumui tikrinti laboratorinėmis ir lauko sąlygomis, kadangi metodus aprašytus SHRP H-332 (1992) tyrimų metų teko adaptuoti. Siūloma ledo tirpdimui naudoti ne metodikoje nurodytus cheminių druskų kiekius, bet išskaičiuoti ir naudoti kiekius pagal tirpdomo ledo plotą (pvz. kai nurodytas medžiagos kiekis į m²). Į metodikas, atlikus papildomus rato sukibimo su ledo paviršiaus tyrimus, galėtų būti įtrauktas ir rato sukibimo su ledo paviršiaus tyrimo metodika ir svarba.
2. Ledo tirpdyimo bandymo metu SMMt pasirodė itin efektyvūs. Atsižvelgiant į gautų tyrimų rezultatus, jų efektyvumas esant –3 °C temperatūrai yra didesnis nei biriųjų SMM. Todėl siūloma nustatyti SMMt išpurškimo scenarijus esant atitinkamai neigiamai aplinkos temperatūrai.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- AASHTO Designation: R 34-03. Standart Practice for Evaluating Deicing Chemicals. 2022
- „Apie sektorių Lietuvos kelių tinklas“. 2023. <https://sumin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/keliai-ir-keliu-transportas-1/apie-sektoriu-10/>
- Arbeitspapier Nr. 11. Einsatz von Streumitteln im Winterdienst (Darbo dokumentais Nr. 11 Barstymo medžiagų naudojimas kelių priežiūrai žiemą) Die Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr. Austrijos kelių, geležinkelių ir susisiekimo tyrimų bendrovė, 2012. 26 p.
- Automobilių kelių priežiūros žiemą medžiagų techninių reikalavimų aprašas TRA KPŽM 23. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius, 2023. 33 p.
- Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 19. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius, 2019. 30 p.
- Bieńka, J., Dzienis, T., Godlewski, T., Kamela, R., Radomska, E. Wytyczne zimowego utrzymania dróg (Kelių priežiūros žiemą gairės). Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa, 2006. 91 p.
- Bulevičius, M., Čygas, D., Laurinavičius, A., Mučinis, D., Vaitkus, A. (2013) Materials and technologies for winter road maintenance in lithuania. Department of Roads, Faculty of Environmental Engineering, Vilnius Gediminas technical university, Lithuania.
- Burinskienė, M., Jakovlevas-Mateckis, K., Paliulis, G. M. Miestotvarka: vadovėlis. 2-asis papildytas ir pataisytas leidimas. Vilnius: Technika, 2011. 476 p.
- CEN/TS 16811-3 Winter maintenance equipment – De-icing agents – Part 3: Other solid and liquid de-icing agents – Requirements and test methods. European committee for standardization. 2015. 40 p. ICS 71.100.45; 13.030.40
- Chang, N. Y., Pearson, W., et al. Environmentally Sensitive Sanding and Deicing Practices. Colorado Transportation Institute and Colorado Department of Transportation. 1994. 196 p.
- Chappelow, C.C., McElroy, A.D., Blackburn, R.R. Darwin, D., de Noyelles, F.G., Lock, C.E. 1992. Handbook of Test Methods for Evaluating Chemical Deicers, SHRP-H-332. Strategic Highway Research Program. National Research Council Washington, D.C. 290 p.
- Čygas, D., Laurinavičius, A., Vaitkus, A., Ratkevičius, T. Kelių ir gatvių priežiūra žiemą. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2016. 148 p.

- Darbo, mechanizmų ir medžiagų sąnaudų kelių priežiūros darbams normatyvų rinkinys DMMS-KP 06. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius, 2006. 178 p.
- Kelių priežiūra... Interaktyvus žemėlapis „Kelių priežiūros lygiai“ Prieiga per internetą: <https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=674763b1c1b54fc38b176c2ed05da148&extent=2464647.9792%2C7203839.3313%2C2887650.4937%2C7381631.8591%2C102100>
- Kelių priežiūros vadovas „Automobilių kelių nuolatinės priežiūros normatyvai KPV PN 23“. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius, 2022. 52 p.
- Kelių priežiūros vadovas II dalis „Automobilių kelių priežiūros darbų atlikimo technologija KPV DT-15“. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius, 2015. 31 p.
- Laurinavičius, A., Čygas, D., Vaitkus, A., Ratkevičius, T., Bulevičius, M., Mučinis, D., Baltrušaitis, A. (2016) Research of snow melting materials performance efficiency for road winter maintenance. Transport. Volume 31(3): 322–332 doi:10.3846/16484142.2016.1211551
- Laurinavičius, A., Mažeika, R., Vaiškūnaitė, R., Brimas, G., Milašius, Š. (2011) Possibilities for the use of chemicals materials alternative to chlorides for decreasing road slipperiness in winter. The baltic journal of road and bridge engineering. 6(4): 274–282.
- „Ledo tirpiklis granuluotas magnio chloridas 25 kg“. 2024. <https://www.b-a.eu/p649040/ledo-tirpiklis-bisofitas-25kg>
- Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. <https://www.meteo.lt/>
- Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių kelių priežiūros žiemą vadovas. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius, 2015. 125 p.
- LST EN 16811-1 Kelių priežiūros žiemą įranga ir medžiagos. Ledą tirpinančios medžiagos. 1 dalis. Natrio chloridas. Reikalavimai ir bandymo metodai. Lietuvos standartizacijos departamentas. 2016. 43 p.
- LST EN 16811-2 Kelių priežiūros žiemą įranga ir medžiagos. Ledą tirpinančios medžiagos. 2 dalis. Kalcio chloridas ir Magnio chloridas. Reikalavimai ir bandymo metodai. Lietuvos standartizacijos departamentas. 2016. 31 p.
- Matiukas, A. (2019) Tradicinių ir alternatyvių slidumą mažinančių cheminių medžiagų pėsčiųjų takuose tyrimas ir vertinimas [Baigiamasis magistro darbas]. Vilniaus Gedimino technikos

universitetas.

- Matulis, B., Janickis, V., Petrašauskienė, N. Chemijos pagrindai: vadovėlis. Kaunas: Technologija, 2006. 430 p. ISBN: 9955251085.
- Muthumani, A., Fay, L., Akin, M., Wang, Sh., Gong, J., Shi, X. (2014). Correlating lab and field tests for evaluation of deicing and anti-icing chemicals: A review of potential approaches. Cold Regions Science and Technology 97. 21–32
- Nixon, W. A.; Qiu, J.; Qiu, L.; Kochumman, G.; Xiong, J. 2005. Ice melting performance for ice-control chemicals, in TRB 84th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM, 9–13 January 2005, Washington, DC, 1–21. 67
- „Potassium Acetate...“, 2024. <https://www.fengchengroup.com/chemicals/mineral-inorganic-substance/potassium-acetate-bp-ep-usp-fcc-acetic-acid.html>
- R PDTP 12 Pėsčiųjų ir dviračių takų projektavimo rekomendacijos. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos. Vilnius, 2012. 38 p.
- Ratkevičius, T. (2016). Valstybinės reikšmės automobilių kelių priežiūros žiemą optimizavimas [daktaro disertacija]. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Rimkus, A. Miesto gatvių priežiūra ir remontas. Vilnius: Technika, 2004. 144 p.
- Rimkus, A. (2003). Chloridų, naudojamų sniego ir ledo tirpinimui keliuose poveikio aplinkai įtakančių faktorių analizė. The 25th International Baltic Road Conferences Materials. Vilnius. 12p.
- Ružinskas, A., Bulevičius, M., Sivilevičius, H. 2015. Laboratory investigation and efficiency of deicing materials used in road maintenance. Journal of Transport, Volume 31(2): 147–155.
- RVS 12.04.16 Streumittel (Kelių barstymo medžiagos). Die Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr. Austrijos kelių, geležinkelių ir susisiekimo tyrimų bendrovė, 2017. 14 p.
- Shi, X. and Akin, M., Development of Standardized Test Procedures for Evaluating Deicing Chemicals, Western Transportation Institute and Wisconsin Department of Transportation, Transportation Research Board, Washington DC CR07-02, Project 0092-08-32, 2009.
- Shi, X., Fay, L. Et al. Evaluation of alternative anti-icing and deicing compounds using sodium chloride and magnesium chloride as baseline deicers - phase I. 2009. 292 p.
- Snow and Ice Databook. 2018. XVth International Winter Road Congress, Poland, Gdansk. 145

p.

Snow and Ice Databook. 2022. XVIth International Winter Road Congress, Canada, Calgary. 305 p.

Statybos techninis reglamentas STR 2.06.04:2014 „Gatvės ir vietinės reikšmės keliai. Bendrieji reikalavimai“. Vilnius, 2014. 51 p.

Strėlkutė, A., Bradulienė, J. (2013). Bišofito, naudojamo sniegui ir ledui tirpinti, poveikio augalų daigumui ir antžeminės dalies augimui tyrimas. Mokslas – Lietuvos ateitis (Science – Future of Lithuania). Vilnius. doi:10.3846/mla.2013.63

Vaitkus, A., Juknevičiūtė-Žilinskienė, L. 2021. Alternatyvių, slidumą kelyje mažinančių cheminių medžiagų ir optimalaus jų barstymo kiekio parinkimo algoritmo (modelio) sukūrimas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Vilniaus miesto gatvių, pėsčiųjų ir dviračių takų priežiūros reikalavimai. Vilniaus miesto savivaldybės administracija. Vilnius, 2021. 35 p.

„Visuotinė lietuvių enciklopedija. Krituliai“. 2024. <https://www.vle.lt/straipsnis/krituliai/>

Wang, K., Nelsen, D. E., Nixon, W. A. 2006. Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials, Cement and Concrete Composites 28(2): 173-188.

Winter maintenance in Sweden. 2002. Compiled for COST 344 "Improvements to Snow and Ice Control on European Roads". Swedish National Road and Transport Research Institute. Task Group "Best practice" 27 March 2002. 30 p.

Winter Sanding Guidelines. 2012. Communities of Tomorrow, Leveraged Municipal Innovation Fund. 50 p.