



FFI-RAPPORT

21/00487

Laboratorietester av betain og andre baneavvisingsmidler

— smelteegenskaper og infiltrasjonsforsøk

Jorunn Aaneby
Ida Vaa Johnsen

Laboratorietester av betain og andre baneavisingmidler – smelteegenskaper og infiltrasjonsforsøk

Jorunn Aaneby
Ida Vaa Johnsen

Emneord

Avrenning
Friksjon
Rensing
Rullebaner
Vinter

FFI-rapport

21/00487

Prosjektnummer

555701

Elektronisk ISBN

978-82-464-3331-8

Engelsk tittel

Laboratory tests of betaine and other de-icing agents – melting properties and infiltration tests

Godkjenner

Øyvind Voie, *forskningsleder*
Janet Martha Blatny, *forskningsdirektør*

Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.

Opphavsrett

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

Sammen drag

Baneavisingmidler benyttes for å sikre tilstrekkelig høy friksjon på rullebaner ved vinterforhold. Urea var vanlig å benytte som baneavisingmiddel tidligere, men miljøskadelige effekter ved urea har gjort at de fleste lufthavner har gått over til å bruke acetat- eller formiatbaserte baneavisingmidler. Salter av formiater og acetater kan forårsake korrosjon av flymaterialer som medfører betydelige vedlikeholdskostnader. Betainbaserte baneavisingmidler kan være et alternativt baneavisingmiddel. Betain er mindre korrosivt enn formiater og acetater, og utslipp av betain innebærer en lavere miljøbelastning enn utslipp av urea.

I denne studien ble egenskapene til de betainbaserte baneavisingmidlene Betafrost L Plus, Betafrost G og Nutristim sammenliknet med egenskapene til de formiatbaserte baneavisingmidlene Aviform L50 og Aviform S-Solid, og vannfortynnet og fast urea. Baneavisingmidlenes kjemiske egenskaper ble undersøkt. Smelteegenskapene ble undersøkt ved å måle ismeltingsrate og -kapasitet ved -2, -4 og -6 °C. I tillegg ble det utført renseforsøk av betain ved å føre vann med betain gjennom kolonner med jord og filtermaterialene aktivt kull, clinoptilolite, aktivert glassfiltermedium, kalsiumkarbonat, kvartssand, mangandioksid og kombinasjoner av disse filtermaterialene.

De betainbaserte baneavisingmidlene hadde betydelig lavere ledningsevne enn de formiatbaserte avisingmidlene, som viser at betainbaserte baneavisingmidler er mindre korrosive. Ismeltingsraten og -kapasiteten til de betainbaserte baneavisingmidlene var dårligere enn for de formiatbaserte baneavisingmidlene, men de betainbaserte baneavisingmidlene viste like god smelteeffekt som urea. For alle avisingmidlene avtok ismeltingsraten og -kapasiteten med synkende temperatur. Ved de laveste temperaturene, spesielt -6 °C, var det en tendens at smeltevannet frøys på igjen i løpet av testen. Det ble vist at ismeltingsraten og -kapasiteten kan økes ved å øke konsentrasjonen av avisingmiddel i løsningsene som påføres, eller ved å påføre en større mengde baneavisingmiddel. Blandinger med Nutristim og vann viste like god smelteeffekt som produktet Betafrost L Plus, og bedre smelteeffekt enn blandinger med Betafrost G og vann. Generelt viste avisingmidlene i fast form lavere smeltekapasitet per masse rent middel og fungerte saktere enn avisingmidlene i flytende form.

Aktivt kull reduserte innholdet av totalt nitrogen, totalt organisk karbon og biokjemisk oksygenforbruk i vannet med betain effektivt i noen uker, men deretter avtok renseseffekten. De øvrige filtermaterialene som ble testet viste lav eller ingen renseseffekt.

Denne studien har vist at betainbaserte baneavisingmidler kan være aktuelt å benytte på rullebaner fordi de viser like gode smelteegenskaper som urea i laboratorietester. Storskala tester av betainbaserte avisingmidler på rullebaner vil gi kunnskap om hvordan disse avisingmidlene fungerer under reelle betingelser. Dersom det skal lages blandinger av fast betain og vann direkte ved flyplasser, anbefales det å benytte Nutristim ettersom det løses lettere i vann og ga bedre smelteeffekt enn blandinger med Betafrost G. Ved bytte til betain som baneavisingmiddel bør løsninger for rensing av avrenningsvann med betain utredes nærmere.

Summary

Runway de-icing agents are used to ensure sufficient friction on runways during winter conditions. Urea was commonly used as runway de-icing agent in the past, but undesirable environmental effects of urea has made most airports switch to de-icing agents based on acetates or formates. However, salts of formates and acetates can cause corrosion of aircraft materials, which entails significant maintenance costs. De-icing agents based on betaine may be an alternative de-icing agent. Betaine is less corrosive than formates and acetates, and emissions of betaine have less environmental impact than urea.

In this study, the properties of the betaine-based de-icing agents Betafrost L Plus, Betafrost G and Nutristim were compared with the properties of the formate-based de-icing agents Aviform L50 and Aviform S-Solid, and liquid and solid urea. Chemical properties of the de-icing agents were investigated. Ice-melting properties were investigated by measuring ice melting rate and capacity at -2, -4 and -6 °C. In addition, experiments were performed with cleansing water with betaine through soil and the filter materials activated carbon, clinoptilolite, activated glass filter medium, calcium carbonate, quartz sand, manganese dioxide and combinations of these materials.

The betaine-based de-icing agents had significantly lower conductivity than the formate-based de-icing agents, which shows that the betaine-based de-icing agents are less corrosive. The ice-melting rate and capacity of the betaine-based de-icing agents were lower than for the formate-based de-icing agents, but the betaine-based de-icing agents showed similar ice-melting performance as urea. For all the de-icing agents, the ice-melting rate and capacity decreased with decreasing temperature. At the lowest temperatures, especially -6 °C, the melted water had a tendency to freeze during the test. It was shown that the ice-melting rate and capacity can be increased by increasing the concentration of de-icing agent in the solutions applied, or by applying a larger amount of de-icing agent. Mixtures with Nutristim and water showed similar ice-melting effect as Betafrost L Plus, and better ice-melting effect than mixtures with Betafrost G and water. In general, the de-icing agents in solid form showed lower ice-melting capacity per mass and worked slower than the de-icing agents in liquid form.

Activated carbon reduced the content of total nitrogen, total organic carbon and biochemical oxygen demand in the water with betaine efficiently at first, but after a few weeks, the cleansing effect decreased. The other filter materials tested showed low or no cleansing effect.

This study has shown that betaine-based de-icing agents have potential for runway use because they show ice-melting properties comparable to urea in laboratory tests. Large-scale tests of betaine-based de-icing agents on runways will provide knowledge on how these de-icing agents perform under real conditions. If solid betaine and water are going to be mixed at airports, Nutristim is recommended, as it dissolves more readily in water and showed better ice-melting properties than mixtures with Betafrost G. If airports switch to betaine as the main de-icing agent, solutions for treatment of run-off water containing betaine should be investigated.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
Forord	7
1 Innledning	9
1.1 Bakgrunn	9
1.1.1 Avisingsmidler	9
1.1.2 Virkningsmekanisme til avisingsmidler	10
1.1.3 Evenes flystasjon og miljøbelastning	11
1.2 Formål	12
2 Materialer og metoder	14
2.1 Avisingsmidler	14
2.2 Fysisk og kjemisk karakterisering	16
2.2.1 Fuktighet og uløselige komponenter	16
2.2.2 pH og ledningsevne	16
2.2.3 Kjemisk og biokjemisk oksygenforbruk	17
2.3 Laboratorietester av smelteegenskaper	17
2.3.1 Innledning	17
2.3.2 Issmeltingsrate og -kapasitet	17
2.4 Rensing av betainholdig vann ved infiltrasjon	21
3 Resultater og diskusjon	25
3.1 Karakterisering av avisingsmidlene	25
3.1.1 Tørrstoff og uløselige komponenter	25
3.1.2 pH og ledningsevne	25
3.1.3 Løselighet i vann	27
3.1.4 Kjemisk og biokjemisk oksygenforbruk	28
3.2 Issmeltingsrate og -kapasitet til avisingsmidlene	29
3.2.1 Ulike temperaturer	29
3.2.2 Ulike doseringer	35
3.2.3 Ulike konsentrasjoner	36

3.2.4	Avisingsmiddel i fast form	39
3.3	Infiltrasjonsforsøk av betainholdig vann	42
4	Oppsummering og konklusjon	47
	Referanser	49
	Vedlegg	52
A	Kunstig regnvann	52
B	Resultater laboratorietester av smelteegenskaper	53
B.1	Smeltetester -2 °C	53
B.2	Smeltetester -4 °C	55
B.2.1	Ulike konsentrasjoner	57
B.2.2	Økt dosering avisingsmiddel	59
B.2.3	Granulat 60	
B.3	Smeltetester -6 °C	61
B.4	Oppsummerte resultater	63
C	Filtermaterialer infiltrasjonsforsøk	67
D	Analyseresultater infiltrasjonsforsøk	68

Forord

Denne studien er en del av oppdraget «Alternative baneavisingmidler», finansiert av Forsvarsdepartementet (FD). Oppdraget er gjort i samråd med en prosjektrådsgruppe med representanter fra Avinor, Luftforsvaret, Forsvarsmateriell (FMA), Forsvarsbygg (FB), Forsvarsstaben (FST) og Forsvarsdepartementet (FD). I tillegg har Forsvarets laboratorietjeneste (FOLAT) og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) bidratt med kunnskap. Formålet med oppdraget har vært å:

- Kartlegge alternative baneavisingmidler og -metoder, med hensikt å finne en løsning som hverken skader miljø eller korroderer fly
- Gjennomføre praktiske tester av baneavisingmidler i laboratoriet og i storskala
- Gjøre en helhetlig vurdering og kostnadsanalyse av aktuelle løsninger/metoder

Denne rapporten omhandler resultatene fra de praktiske testene av baneavisingmidler som har blitt gjort i laboratoriet. Rapporten er en av flere rapporter som har blitt publisert som en del av oppdraget. Laboratorietestene ble utført ved FFI i 2020 og 2021.

Oslo, 15. mars 2021
Jorunn Aaneby
Ida Vaa Johnsen



1 Innledning

1.1 Bakgrunn

1.1.1 Avisingsmidler

Avisingsmidler benyttes for å sikre tilstrekkelig høy friksjon på rullebaner ved vinterforhold. De vanligste avisingsmidlene som benyttes på rullebaner, både i Norge og andre land, er salter av acetater og formiater (Schweigert og Poissonier, 2016, French et al., 2010). Urea var vanlig å benytte som avisingsmiddel på rullebaner tidligere, men miljøskadelige effekter ved urea har gjort at de fleste lufthavner har gått over til å bruke acetat- eller formiatbaserte avisingsmidler (Freeman et al., 2015). Urea inneholder forholdsvis mye nitrogen og har en uheldig gjødslande effekt. Nedbrytning av urea krever i tillegg mye oksygen som kan føre til anaerobe akvatiske miljø (Corsi et al., 2001). Formiat- og acetatbaserte avisingsmidler inneholder ikke nitrogen og krever betydelig mindre oksygen ved nedbrytning enn urea (Shi, 2008). Formiater og acetater har derimot uønskede korrosive egenskaper som kan medføre korrosjon av flymateriell, som for eksempel karbon-karbon-bremser (Huttunen-Saarivirta et al., 2011, Shi, 2008). Korrosjon av flymaterialer kan føre til redusert flysikkerhet og øker behovet for vedlikehold av flyene. På lufthavnene i Norge brukes det i dag hovedsakelig formiatbaserte avisingsmidler. Økt bruk av slike avisingsmidler på lufthavner der Forsvaret operer har ifølge Forsvarsmateriell (FMA) medført betydelig økning i antall korrosjonstilfeller av luftfartøy de siste årene.

Betain er et sukkerprodukt bestående av trimetylglysin og er et alternativt baneavisingsmiddel til urea, formiater og acetater. Betain benyttes blant annet på lufthavner i Finland (Alatypö og Jutila, 2010b). Betain er lite korrosivt, og det har et lavere oksygenbehov ved nedbrytning enn urea, men høyere enn formiater og acetater (Shi, 2008). En sammenlikning av avisingssegenskapene til betain og kaliumformiat i en finsk studie viste at betain fungerte dårligere enn kaliumformiat i laborietester, men i feltstudier ble det ikke observert noen signifikant forskjell mellom avisingsmidlene (Alatypö og Jutila, 2010b). Statistiske analyser (av mange felttester på to flyplasser i Finland) viste at formiater og acetater fungerte bedre enn betain og urea, og at betain fungerte bedre enn urea. Alle avisingsmidlene ble vurdert som tilstrekkelig gode til å oppnå ønsket friksjon på rullebanene (Alatypö og Jutila, 2010b). Ifølge Alatypö og Jutila (2010a) har antall korrosjonstilfeller på militære fly i Finland blitt betydelig redusert etter overgangen til betain. Et annet alternativt og relativt nytt baneavisingsmiddel er Gen3. Det består av en blanding av natriumacetat og glyserin og brukes blant annet i Storbritannia (LNT Solutions, 2021).

Betainbaserte avisingsmidler selges under merkevarenavn som Betafrost og Nutristim. Betafrost finnes både i form av granulater, Betafrost G, og som en væske, Betafrost L Plus, mens Nutristim er et pulver. Aviform er det formiatbaserte avisingsmiddelet som hovedsakelig benyttes på lufthavner i Norge. Aviform finnes som granulater, Aviform S, og som en væske, Aviform L50. Normalt benyttes avisingsmidler i flytende form til å smelte is fra overflaten, mens avisingsmidler i form av granulater eller pulver benyttes til å penetrere isen slik at den slipper fra underlaget og lettere kan fjernes. En stor andel av baneavisingsmidlene benyttes preventivt ved

at det legges ut før nedbør for å unngå eller forsinke dannelsen av is og snø på rullebanen, og for å lettere kunne fjerne is og snø som legger seg (Schweigert og Poissonier, 2016, Gerbino-Bevins et al., 2012).

1.1.2 Virkningsmekanisme til avisingsmidler

Avisingsmidler fungerer ved at de senker frysepunktet til vann. Når avisingsmiddelet kommer i kontakt med snø eller is på rullebanen, vil snøen eller isen forandre fase fra fast til flytende form. Om og hvor raskt faseforandringen skjer, vil avhenge av for eksempel typen avisingsmiddel, mengden avisingsmiddel som påføres, og temperaturen. Avisingsmidler i fast form må hydreres før de kan smelte is. Hydreringen avhenger av kjemiske og fysiske egenskaper ved avisingsmidlene og tilgjengeligheten på vann. For faste avisingsmidler, begynner smelteprosessen når avisingsmiddelet har blitt løst, mens den for flytende avisingsmidler begynner umiddelbart. (Schweigert og Poissonier, 2016)

Den teoretiske evnen et avisingsmiddel har til å smelte is kan forutses ut fra kjemiske egenskaper, slik som molekylmassen til avisingsmiddelet, løseligheten av avisingsmiddelet i vann, og frysepunktet til blandinger av avisingsmiddelet og vann. Det laveste frysepunktet som kan oppnås for en blanding av avisingsmiddel og vann omtales som den eutektiske temperaturen. Den eutektiske temperaturen er assosiert med et unikt blandingsforhold av avisingsmiddelet og vann, som omtales som en eutektisk blanding. Den eutektiske temperaturen gir informasjon om den laveste temperaturen der avisingsmiddelet kan smelte is eller snø (Chappelow et al., 1992).

Oppløsning av salter og andre stoffer i vann fører til at frysepunktet til vann reduseres. Molekylmassen til et avisingsmiddel kan gi informasjon om hvor mange partikler (molekyler) en gitt mengde avisingsmiddel vil gi når det løses i vann. Jo lavere molekylmasse, jo flere molekyler vil løses per masse avisingsmiddel, og jo flere molekyler som løses, jo lavere blir frysepunktet til løsningen (Lysbakken, 2019). I hvilken grad avisingsmiddelet reduserer frysepunktet til vann, avhenger også av hvordan avisingsmiddelet binder til seg vannmolekyler. Vannmolekyler som er bundet til avisingsmiddelet vil ikke være frie til å fungere som løsemiddel, og avisingsmidler som binder til seg frie vannmolekyler er mer effektive til å redusere frysepunktet til vann (Wählin et al., 2017).

En oversikt over de kjemiske egenskapene til natriumacetat, natrium- og kaliumformiat, urea og betain er gitt i Tabell 1.1. Avisingsmiddelet Aviform L50 inneholder kaliumformiat, mens Aviform S-solid inneholder natriumformiat. Natriumacetat finnes i Gen 3. Betain finnes i produktene Betafrost G, Betafrost L Plus og Nutristim.

Tabell 1.1 Kjemiske egenskaper for stoffer som brukes i avisingsmidler.

Kjemisk stoff	Kjemisk formel ¹	Molekylmasse (g/mol) ¹	Løselighet i vann (g/100 ml) ¹	Eutektisk blandingsforhold (vekt%)	Eutektisk temperatur (°C)
Natriumacetat	CH ₃ COONa	82,03	46,5 (ved 20 °C)	23 ²	-18 ²
Natriumformiat	HCOONa	68,01	97,2 (ved 20 °C)	24,7 ²	-16 ²
Kaliumformiat	HCOOK	84,12	331 (ved 18 °C)	55,1 ³	-61 ³
Urea	CH ₄ N ₂	60,06	54,5 (ved 25 °C)	32,8 ⁴	-12 ⁴
Betain	C ₅ H ₁₁ NO ₂	117,15	61,1 (ved 19 °C)	-	-

¹PubChem (2021) ²Danilov et al. (2018) ³Frolova et al. (2015) ⁴Yuan et al. (2016),

Betain har omtrent dobbelt så høy molekylmasse som urea og formiat/acetat, og ut fra dette kan det antas at betain vil være omtrent halvparten så effektivt per masse avisingsmiddel. Når salter som natriumacetat, natriumformiat og kaliumformiat løses i vann, vil ett molekyl gi to ioner, mens urea og betain ikke vil spaltes til flere molekyler når det løses i vann. Salter som spaltes i flere ioner vil være mer effektive som avisingsmiddel enn stoffer som ikke gjør dette (Lysbakken, 2019).

Natriumformiat har høyere løselighet i vann enn urea og betain. Natriumformiat har også lavere eutektisk temperatur enn urea, som betyr at natriumformiat er mer effektivt som avisingsmiddel ved lavere temperatur enn urea. I praksis vil temperaturen der avisingsmiddelet fungerer være høyere enn den eutektiske temperaturen, for eksempel fungerer natriumformiat kun effektivt ned mot -10 °C, selv om den eutektiske temperaturen er -16 °C (Frolova et al., 2015). Løseligheten til kaliumformiat er betydelig høyere enn løseligheten til natriumformiat. Kaliumformiat har også mye lavere eutektisk temperatur enn natriumformiat (Frolova et al., 2015). De kjemiske egenskapene i Tabell 1.1 gjelder for stoffene som er de aktive ingrediensene i avisingsmidler. Kommersiell avisingsmidler inneholder ofte additiver som korrosjonsinhibitorer og frysepunktnedsettende stoffer, slik at egenskapene til avisingsmidlene på markedet kan avvike fra egenskapene gitt i Tabell 1.1 (Schweigert og Poissonier, 2016).

1.1.3 Evenes flystasjon og miljøbelastning

I 2012 vedtok Stortinget at Evenes flystasjon skulle etableres som fremskutt base (QRA) for de nye kampflyene og i 2016 ble det vedtatt at Evenes flystasjon skulle være hovedbase for de maritime patruljeflyene (Forsvarsdepartementet, 2018). Evenes flystasjon skal etter planen være klar for operasjoner med kampfly i januar 2022 og for maritime patruljefly sommeren 2022 (Saunes et al., 2019). Etableringen av Evenes flystasjon som fremskutt base og hovedbase har aktualisert problematikken rundt bruk av formiat som avisingsmiddel på rullebaner. Bruk av formiatbaserte avisingsmidler ved Evenes flystasjon vil medføre betydelige vedlikeholdskostnader av Forsvarets luftfartøy.

Avrenning fra Evenes flystasjon skjer blant annet til Tårnstadvassdraget som er av stor nasjonal og internasjonal verdi. Deler av vassdraget er regulert som naturreservat og vernet iht. Ramsar-konvensjonen (Forsvarsdepartementet, 2018). Evenes flystasjon sin nære beliggenhet til viktige

naturverdier gjør at det ikke er aktuelt å benytte urea ved denne flystasjonen, i hvert fall ikke uten at det gjøres store tiltak for å redusere miljøbelastningen ved avrenningen. Ved å bytte til betainbaserte avisingsmidler på Evenes flystasjon, kan korrosjonsproblematikken relatert til formiatbaserte avisingsmidler unngås, samtidig som miljøbelastningen blir lavere enn ved bruk av urea. Miljøbelastningen ved bruk av betain vil likevel være høyere enn ved bruk av tilsvarende mengde formiat.

Utslipp av avisingsmidler fra flyplasser er regulert gjennom utslippstillatelser utstedt av miljømyndigheten. Utslippsgrenser for avisingsmidler kan fastsettes både i form av mengde avisingsmiddel det er tillatt å slippe ut eller bruke, og/eller mengde kjemisk oksygenforbruk (KOF) det er tillatt å slippe ut eller bruke. Dagens tillatelse for Evenes lufthavn innebærer en total ramme for utslipp av baneavisingsmiddel basert på formiat tilsvarende et teoretisk oksygenforbruk på inntil 35 000 kg KOF per sesong (Fylkesmannen i Nordland, 2019). Fra 2011 til 2018 lå forbruket av Aviform ved Evenes lufthavn på 15 000 til 25 000 kg KOF per sesong (Saunes et al., 2019). Ved en overgang til et betainbasert avisingsmiddel, som har betydelig høyere KOF enn formiat, vil grensen i dagens tillatelse overskrides. Siden dagens tillatelse for Evenes lufthavn gjelder for bruk av avisingsmiddel basert på formiat, må det søkes om ny tillatelse dersom det skal benyttes andre typer avisingsmiddel.

Dersom formiat skal erstattes med betainbaserte baneavisingsmidler ved Evenes flystasjon, må det i tillegg innføres andre tiltak for å redusere miljøbelastningen ved avrenningen. Eksempler på tiltak som kan redusere miljøbelastningen, er å redusere bruken av baneavisingsmidler ved å benytte sensorsystemer, bedre mekanisk fjerning av snø, optimalisert dosering og liggetid på banen, og oppsamling eller rensing av avrenningsvannet. Avrenningsvannet kan renses ved å tvinge det gjennom aktive barrierer, gjennom filtrering eller infiltrering i jord som binder eller bryter ned uønskede komponenter i avisingsmiddelet. Infiltrasjon i jord anses som en relativ enkel metode å etablere da den krever forholdsvis lite plass og inngripen i naturen. Hvor godt en infiltrasjonsløsning vil fungere, vil blant annet avhenge av de fysiske og kjemiske egenskapene til jorda på det aktuelle stedet og hvor stor den umettede sonen i jorda er. Renseeffekten vil også kunne påvirkes av temperatur og fuktighet i jorda. For å øke jordas kapasitet til å binde til seg eller bryte ned avisingsmidler, kan den tilsettes mineraler som perlitt og zeolitt (Pressl et al., 2019). En nærmere beskrivelse av tiltak og renseløsninger for å redusere miljøbelastning ved avisingsmidler er gitt i litteraturstudien «Alternative baneavisingsmidler og -metoder» utarbeidet av FFI (Johnsen og Aaneby, 2021).

1.2 Formål

Betainbaserte baneavisingsmidler kan være et alternativ til de tradisjonelle baneavisingsmidlene formiat og urea. Betain har ikke de samme korrosive egenskapene som formiater, og utslipp av betain innebærer en lavere miljøbelastning enn utslipp av urea. For å kunne ta i bruk betain som baneavisingsmiddel på Evenes og andre norske lufthavner, er det ønskelig med mer kunnskap om egenskapene til betain. Formålet med denne studien har vært å få mer kunnskap om hvordan temperatur, dosering og konsentrasjon av baneavisingsmidler påvirker smelteeffekten til betain og andre avisingsmidler. I tillegg har det vært av interesse å undersøke om miljøbelastningen

ved utslipp av betain kan reduseres ved infiltrasjon av avrenningsvann gjennom jord med eller uten tilsetningsstoffer.

Studien har omfattet:

- 1) Karakterisering av kjemiske egenskaper til betain og kjente avisingsmidler
- 2) Måling av ismeltingsrate og -kapasiteten til betain og kjente avisingsmidler ved ulike temperaturer, ulike konsentrasjoner og ulike doseringer
- 3) Infiltrasjonsforsøk av vann med betain gjennom jord og ulike filtermaterialer

2 Materialer og metoder

2.1 Avisingsmidler

En oversikt over avisingsmidlene som har blitt undersøkt i denne studien er gitt i Tabell 2.1. Bilder av avisingsmidlene er vist i Figur 2.1. En nærmere beskrivelse av egenskapene til avisingsmidlene er gitt i litteraturstudien «Alternative baneavisingsmidler og -metoder» utarbeidet av FFI (Johnsen og Aaneby, 2021).

Tabell 2.1 Oversikt baneavisingsmidler

Produkter	Produsent	Form	Kjemisk innhold
Produkter med betain:			
Nutristim 800	Danisco	Fast, pulver	Betain/trimetylglysin
Betafrost G	Finnfeeds (Danisco)	Fast, granulat	Betain/trimetylglysin
Betafrost L Plus	Genencor (Danisco)	Flytende	Ca. 50 % betain/trimetylglysin i vann
Produkter med urea:			
Vannfortynnet urea	Ørland flystasjon	Flytende	Ca. 50 % urea granulat i vann
Urea granulat	Yara	Fast, granulat	Urea
Produkter med formiat/acetat:			
Aviform S-Solid	Addcon	Fast, granulat	Natriumformiat
Aviform L50	Addcon	Flytende	Ca. 50 % kaliumformiat i vann
Gen 3	LNT Solution	Flytende	Natriumacetat og glyserin

Produkter med betain



Nutristim 800



Betafrost G



Betafrost L Plus

Produkter med urea



Urea granulat



Vannfortynnet urea

Produkter med formiat og acetat



Aviform S



Aviform L50



Gen 3

Figur 2.1 Bilder av avisingsmidlene

2.2 Fysisk og kjemisk karakterisering

Karakterisering av de fysiske og kjemiske egenskapene til et avisingsmiddel kan inkludere analyse av den kjemiske sammensetningen, inkludert additiver og urenheter, fuktighetsinnhold, innhold av uløselige komponenter, pH, løseligheten av avisingsmiddelet ved ulike temperaturer, frysepunkt og viskositet (Chappelow et al., 1992). I denne studien ble det kun utført en forenklet karakterisering av avisingsmidlene. For avisingsmidlene i fast form, ble innholdet av fuktighet og uløselige komponenter bestemt. For alle avisingsmidlene, ble pH og ledningsevne målt i løsninger med ulike konsentrasjoner. Løseligheten til avisingsmidlene i fast form ble vurdert ifm. løsningene med ulike konsentrasjoner som ble laget for måling av smelteegenskaper. Kjemisk og biokjemisk oksygenforbruk (KOF og BOF) til avisingsmidlene analysert ved et eksternt laboratorium.

2.2.1 Fuktighet og uløselige komponenter

For å måle innholdet av vann som er kjemisk bundet til avisingsmiddelet kreves prosedyrer som er spesifikke for materialet som skal testes (Chappelow et al., 1992). Analyse av kjemisk bundet vann ble ikke undersøkt i denne studien. Analyse av adsorbert fuktighet og fuktighet som ikke var kjemisk bundet til avisingsmidlene ble undersøkt ved å tørke ca. nøyaktig 5 g av avisingsmidlene i fast form i varmeskap ved 110 °C i 24 timer til konstant vekt. Fuktighetsinnholdet ble bestemt ut fra differansen mellom vekta av prøven før og etter den ble tørket.

Innholdet komponenter i avisingsmidlene som ikke er løselige i vann kan gi informasjon om hvor rent avisingsmiddelet er. Innholdet av uløselige komponenter ble bestemt ved å røre ut avisingsmidlene i fast form (ca. 5 g) i rikelig med vann (ca. 100 ml) og filtrere løsningen gjennom et kaffefilter. Mengden uløste partikler ble beregnet ut fra vekten av filteret før og etter tørking ved 105 °C.

2.2.2 pH og ledningsevne

Kjennskap til avisingsmidlenes pH og ledningsevne kan gi informasjon om hvordan de vil påvirke materialer og miljøer, og hvor korrosivt avisingsmiddelet er. Evaluering av de korrosive egenskapene til avisingsmidlene ble ikke undersøkt i denne studien, men analyse av pH og ledningsevne har blitt utført.

pH og ledningsevne ble målt direkte i avisingsmidlene i flytende form. For avisingsmidlene i fast form, ble pH og ledningsevne målt i 50 vekt% løsninger av avisingsmiddel og deionisert vann. I tillegg ble pH og ledningsevne målt i 1 vekt% løsninger av alle avisingsmidlene og i blandinger av avisingsmidlene som ble benyttet i smeltetestene og kunstig regnvann. For sistnevnte, ble det benyttet samme blandingsforhold som i smeltetestene, dvs. 5 ml avisingsmiddel i 100 ml regnvann. pH og ledningsevne ble målt med et bærbart feltinstrument (HACH HQ 40d Multi, probe CDC401 og PH281). Instrumentet ble kalibrert med bufferløsning pH 7 og 10 før måling av pH, og 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ før måling av ledningsevne.

2.2.3 Kjemisk og biokjemisk oksygenforbruk

Kjemisk- og biokjemisk oksygenforbruk (hhv. KOF og BOF) er viktige parametere å vurdere når det gjelder miljøbelastningen av avisingsmidler. Prøver av Aviform L50, Betafrost L Plus og 10 vekt% løsninger av Aviform S, Betafrost G, Nutristim og urea ble sendt til Eurofins Environmental Testing Norway for analyse av KOF og BOF. KOF ble analysert etter metode DIN 38409-41 (H41):1980-12 og BOF ble analysert etter metode DIN EN 1899-1 (H51): 1998-05. Begge analysene ble utført ved Eurofins Umwelt Ost GmbH i Freiberg, Tyskland.

2.3 Laboratorietester av smelteegenskaper

2.3.1 Innledning

Det finnes en rekke metoder for å undersøke smelteegenskapene til avisingsmidler. Testmetodene skiller gjerne mellom avisingsmidler i flytende og fast form, og om det er issmeltingsrate, issmeltingskapasitet, penetrering eller underkutting av is, som skal evalueres (Chappelow et al., 1992). Selv om laboratorietestene er utviklet med tanke på å være så forenelige med realistiske forhold som mulig, vil de avvike fra reelle betingelser. Resultater fra laboratorie- og felttester kan avvike fra hverandre fordi laboratorietestene ikke tar hensyn til parametere som variasjoner i meteorologiske forhold som temperatur og vind, trafikkmengde, og typen og tilstanden til underlaget (Muthumani et al., 2014). Laboratorietester er egnet til å gi sammenliknbare data under kontrollerte forhold og på akselerert tid.

Issmeltingsrate og -kapasitet er mål på mengden is et avisingsmiddel kan smelte uten å ta hensyn til måten det skjer på (Chappelow et al., 1992). For å måle issmeltingsrate og -kapasitet påføres avisingsmiddelet på is, i en spesiell rate og ved en kontrollert og konstant temperatur, og volumet smeltevann som dannes måles ved bestemte tidsintervaller. Det finnes flere metoder for å måle issmeltingsegenskaper og resultatene kan variere avhengig av metoden som benyttes.

2.3.2 Issmeltingsrate og -kapasitet

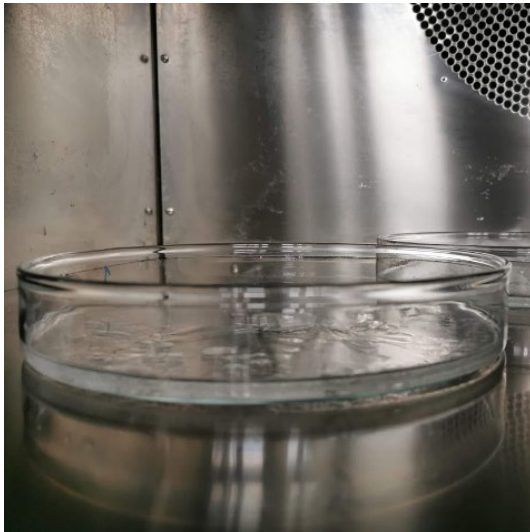
I denne studien ble avisingsmidlenes issmeltingsrate og -kapasitet undersøkt med en forenklet metode basert på issmeltingstestene SHRP H-205.1 og H-205.2.

Avisingsmidlene Betafrost L Plus, vannfortynnet urea granulat fra Ørland og Aviform L50 ble testet i den formen de var levert. Avisingsmidlene i fast form ble testet som granulat, i tillegg ble det laget løsninger av avisingsmiddel og vann i ulike blandingsforhold. Det ble benyttet springvann fordi det anses som mest realistisk. Det ble laget løsninger med 25, 50, 70, 100 og 200 g avisingsmiddel i 100 ml vann. Dette tilsvarer konsentrasjoner av avisingsmidlene på hhv. ca. 20, 33, 43, 50 og 67 vekt%. Hvilke konsentrasjoner som ble testet for de ulike avisingsmidlene er spesifisert i Tabell 2.2. Smelteegenskapene til Gen3 ble ikke undersøkt fordi det ble vurdert at dette avisingsmiddelet er et lite realistisk alternativ på bakgrunn av de korrosive egenskapene til avisingsmiddelet. Smelteegenskapene til Aviform ble inkludert i testene for å ha et kjent avisingsmiddel å sammenlikne med.

Testene ble utført i petriskåler i glass med diameter på 19 cm. Skålene ble tilsatt 100 ml kunstig regnvann som ble fryst til is. Kunstig regnvann ble laget ved å tilsette små mengder kalsiumsulfat, ammoniumsulfat, ammoniumklorid, natriumnitrat og natriumacetat til milliQ-vann (Vedlegg A). Skålene ble plassert i klimaskap justert til ønsket testtemperatur (-2, -4 og -6 °C) til isen var frossen. Islaget i skålene var om lag 3 mm tykt. Testen ble gjennomført ved å spre en gitt mengde (5, 10 ml eller 2,5 g) avisingsmiddel over isen i hver skål. Ved gitte tidsintervaller (10, 20, 30, 45 og 60 min) ble smeltevannet i skålen samlet opp i en sprøyte. Skålen ble holdt på skrå og rotert for å sikre at så mye som mulig av smeltevannet ble samlet opp. Volumet smeltevann ble avlest og notert, og smeltevannet ble deretter ført tilbake over isen. Oppsamlingen, avlesingen og tilbakeføringen av smeltevann ble utført mens skålene sto i klimaskapet med døren åpen. Det ble utført tre til fire tester samtidig. Hver test ble repetert minimum tre ganger. Smelteegenskapene ble vurdert ut fra volumet smeltevann som ble samlet opp ved de gitte tidsintervallene. I tilfellene der det ble tilsatt avisingsmiddel i flytende form, ble volumet avisingsmiddel (5 eller 10 ml) som ble tilsatt skålene ved oppstart av testen trukket fra volumet smeltevann før vurdering av smelteegenskapene.

Det ble i tillegg utført tester der hensikten var å se hvor mye is avisingsmidlene smeltet i løpet av 1 time og 2 timer, uten å måle volumet smeltevann underveis i testen. Testene ble utført ved at avisingsmiddel (5 ml flytende eller 2,5 g fast stoff) ble tilsatt skåler med is og volumet smeltevann ble målt opp etter 1 og 2 timer. Testen ble utført ved -4 °C.

Bilder fra smeltetestene er vist i Figur 2.2. En oversikt over testene som ble utført er vist i Tabell 2.2.



Figur 2.2 Smeltetestene i laboratoriet ble utført i skåler med ca. 3 mm tykk is. Skålene ble plassert i klimakammer justert til ønsket temperatur. Volumet smeltevann ble avlest ved gitte tidsintervaller.

Tabell 2.2 Oversikt over ulike blandinger og doseringer av avisingsmidler som ble testet.

Avisingsmiddel	Produkt	Konsentrasjon (vekt%)	Temperatur	Dosering	Antall tester
Formiat	Aviform L50	Flytende form, ca. 50 %	-2 °C	5 ml	6
			-4 °C	5 ml	3
				10 ml	3
	-6 °C	5 ml	6		
	Løsning av Aviform S	ca. 33 % ca. 50 %	-4 °C	5 ml	3 3
Aviform S	Fast form	-4 °C	2,5 g	3	
Betain	Betafrost L Plus	Flytende form, ca. 50 %	-2 °C	5 ml	6
			-4 °C	5 ml	3
				10 ml	3
	-6 °C	5 ml	6		
	Løsning av Betafrost G	ca. 33 %	-2 °C	5 ml	6
			-4 °C	5 ml	3
			-6 °C	5 ml	6
		ca. 20 % ca. 43 % ca. 50 % ca. 67 %	-4 °C	5 ml	3
	3				
	3				
	3				
	Betafrost G	Fast form	-4 °C	2,5 g	3
	Løsning av Nutristim	ca. 33 %	-2 °C	5 ml	3
			-4 °C	5 ml	3
-6 °C			5 ml	3	
ca. 20 % ca. 43 % ca. 50 %		-4 °C	5 ml	3	
	3				
	3				
Nutristim	Fast form	-4 °C	2,5 g	3	
Urea	Vannfortynnet urea granulat (fra Ørland)	Flytende form, ca. 50 %	-2 °C	5 ml	3
			-4 °C	5 ml	3
				10 ml	3
	-6 °C	5 ml	3		
	Løsning av urea granulat	ca. 33 %	-2 °C	5 ml	3
			-4 °C	5 ml	3
			-6 °C	5 ml	3
		ca. 20 % ca. 43 % ca. 50 %	-4 °C	5 ml	3
	3				
3					
Urea granulat	Fast form	-4 °C	2,5 g	3	

2.4 Rensing av betainholdig vann ved infiltrasjon

Infiltrasjon av vann med avisingsmiddel gjennom umettet jord kan være en forholdsvis enkel måte å redusere miljøbelastningen ved avrenning av avisingsmiddelet på. Infiltrasjon av vann med glykol og acetat/formiat gjennom stedege masser på Gardermoen lufthavn viste gode resultater de første årene renseløsningen var i bruk (Kraft, 2000).

I denne studien ble det utført kolonneforsøk for å undersøke om infiltrasjon av vann med betain kan være en egnet metode for å redusere miljøbelastningen ved avisingsmidler med betain. Det ble satt opp et kolonneforsøk der vann med betain ble ført gjennom stedege jord fra Evenes lufthavn, og filtermaterialer og kombinasjoner av filtermaterialer iblandet noe stedege jord fra Evenes. En oversikt over filtermaterialene som ble testet er gitt i Tabell 2.3. Bilder av filtermaterialene er vist i Figur 2.3. Filtermaterialene ble levert av Klart Vann AS.

Tabell 2.3 Beskrivelse fra Klart Vann AS (2020) av filtermaterialene som ble testet i infiltrasjonsforsøket.

Filtermateriale	Beskrivelse fra produsent
Aktivt kull (Filtrisorb 400)	Granulert aktivt kull egnet for fjerning av forurensninger fra drikkevann.
Kvartssand (Aqua-Sand)	Naturlig filtersand av silisiumdioksid av størrelse 0,4-0,8 mm.
Mangandioksid (Aqua Mandix)	Knust mangandioksid av størrelse 0,5-1,0 mm. Egnet til fjerning av Fe og Mn.
Aktivert glassfiltermedium	Filtermateriale av grønt containerglass som aktiveres slik at det dannes en mesoporøs struktur med et katalytisk overflateareal på 1 mill m ² per m ³ .
Kalsiumkarbonat (Aqua-Juraperle Marmor)	Kalsiumkarbonat (99 %) av størrelse 1-2 mm. Egnet til fjerning av CO ₂ , Fe, Mn og Al. Produktet har en mikrokrystallisk struktur, som gjør det mer effektivt enn ordinær kalkstein.
Clinoptilolite (Aqua Multolite)	Aluminiumsilikat som har evne til å fungere som et ionebyttermiddeium. Høy porøsitet. Kan absorbere tungmetaller, redusere ammoniumnivået ved hjelp av ionebytting og binde til seg suspendert stoff og bakterier.



Aktivt kull



*Kvartssand
0,4-0,8 mm*



*Mangandioksid
0,5-1,0 mm*



*Aktivert glassfiltermedium
0,4-0,8 mm*



*Kalsiumkarbonat
1,2-2,0 mm*



*Clinoptilolite
0,85-2,36 mm*

Figur 2.3 Filtermaterialene som ble testet i infiltrasjonsforsøket.

Alle kolonnene inneholdt i tillegg til filtermaterialer stedegen jord fra Evenes. Jorda hadde pH på $6,7 \pm 0,1$, innhold av totalt organisk materiale (TOM) på $4,5 \pm 1,0$ %, og innhold av totalt organisk karbon (TOC) på $2,6 \pm 0,6$ %. pH i jorda ble målt i en blanding av jord (10 ml) og deionisert vann (25 ml). TOM i jorda ble målt ved å måle glødetap ved 550 °C. TOC ble beregnet ved å dele TOM på 1,72.

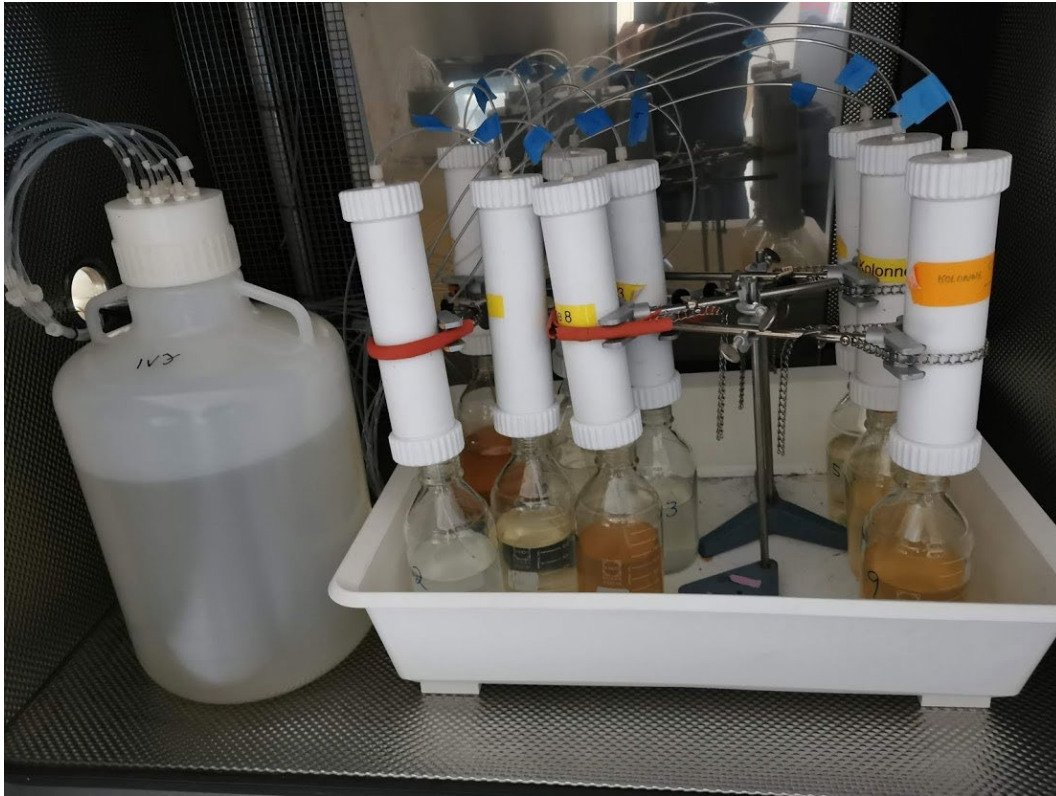
En oversikt over innholdet av filtermaterialer i kolonnene vist i Tabell 2.4. Mengden filtermateriale som ble tilsatt kolonnene varierte avhengig av tettheten til filtermaterialet.

Tabell 2.4 Oversikt over innhold i kolonnene i infiltrasjonsforsøket.

Kolonne	Filtermedium 1		Filtermedium 2		Menge jord (g)	Total mengde (g)
	Type	Mengde (g)	Type	Mengde (g)		
1	Jord	446			-	446
2	Aktivt kull	225			44	269
3	Kvartssand	550	Mangandioksid	107	51	708
4	Kvartssand	677			49	726
5	Aktivert glassfiltermedium	596			48	644
6	Aktivert glassfiltermedium	504	Mangandioksid	108	48	660
7	Kalsiumkarbonat	599			45	644
8	Clinoptilolite	370			48	418
9	Aktivert glassfiltermedium	506	Clinoptilolite	105	47	658

Kolonnene som ble brukt i forsøket var laget av teflon. De hadde en indre diameter på 5 cm og en lengde på 24 cm. Hver ende av kolonnene hadde et perforert lokk av plast. Kolonnene ble forsegleet med en skrukork av teflon som var koblet til en slange som via en peristaltisk pumpe førte kunstig regnvann (vedlegg A) med 5 g betain (Betafrost G) per liter vann gjennom kolonnene. Regnvannet iblandet betain ble ført gjennom kolonnene med en hastighet på ca. 0,6 l/min, fra topp til bunn, ettersom man ikke ønsket å mette jorda/filtermaterialet. Kolonnene og beholderen med regnvann iblandet betain ble plassert i et klimaskap justert til 4 °C. To ganger under forsøket ble klimaskapet skrudd av og forsøket pågikk i romtemperatur (ca. 20 °C) i en til to uker før det ble skrudd på igjen. Dette ble gjort for å undersøke effekten av å øke temperaturen. Oppsette av kolonneforsøket er vist i Figur 2.4.

Det ble tatt ut prøver hver eller annenhver uke gjennom forsøksperioden på 15 uker. Ved hver prøvetaking ble det tatt ut en referanseprøve fra beholderen med regnvann iblandet betain. Prøvene ble sendt til Eurofins Environment Testing Norway der de ble analysert for totalt nitrogen (TotN) etter metode NS 4743, totalt organisk karbon (TOC) etter metode NS-EN 1484, kjemisk oksygenforbruk (KOF) etter metode NS-ISO 15705, og biokjemisk oksygenforbruk (BOF) etter metode NS-EN 1899-1 (bestemt etter 5 dager).



Figur 2.4 Oppsett av kolonneforsøket. Beholder med regnvann tilsatt betain til venstre i bildet. Kolonner med filtermaterialer og oppsamling av prøver til høyere i bildet.

3 Resultater og diskusjon

3.1 Karakterisering av avisingsmidlene

3.1.1 Tørrstoff og uløselige komponenter

Tørrstoffinnhold og innhold av uløselige komponenter for avisingsmidlene i fast form er vist i Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Tørrstoff og innhold av uløselige komponenter for avisingsmidlene i fast form. Resultatene er gjennomsnitt av to-tre parallelle målinger \pm standardavvik.

Avisingsmiddel	Tørrstoff (%)	Uløselige komponenter (%)
Betafrost G	98,0 \pm 0,7	3,1 \pm 0,5
Nutristim	98,3 \pm 0,2	3,2 \pm 0,2
Urea	86 \pm 3	3,0 \pm 0,1
Aviform S	99,6 \pm 0,4	2,5 \pm 0,2

Betainproduktene Betafrost G og Nutristim hadde omtrent like høy andel tørrstoff, mens tørrstoffinnholdet i urea var lavere. Resultatene indikerer at det var lite fuktighet i betainproduktene, mens urea hadde et høyere fuktighetsinnhold. Alle avisingsmidlene inneholdt en forholdsvis lav andel komponenter som ikke var løselige i vann.

3.1.2 pH og ledningsevne

pH og ledningsevne for avisingsmidlene er vist i Tabell 3.2. pH og ledningsevne ble målt i løsninger med ulike konsentrasjoner av avisingsmiddel.

Tabell 3.2 pH og ledningsevne for avisingsmidlene

Avisingsmiddel	Konsentrasjon (vekt%)	pH	Ledningsevne (μ S/cm)
Betafrost L Plus	50 %	10,6	102
	1 %	6,7	74
Betafrost G	50 %	10,8	261
	1 %	9,1	23,4
Nutristim	44 %	10,8	322
	1 %	9,4	28,6
Vannfortynnet urea	50 %	9,5	908
Urea granulat	50 %	8,5	95
	1 %	8,3	21,8
Aviform L50	50 %	11,0	*
	1 %	8,7	8 400
Aviform S	50 %	12,1	56 300
	1 %	11,6	7 800
Gen 3	50 %	10,2	48 700

*ikke mulig å måle

Alle avisingsmidlene var basiske (pH>7). For Aviform L50 samsvarte pH relativt godt med pH (11,5) gitt i databladet for produktet (Addcon, 2012). For Betafrost L Plus var pH høyere enn pH oppgitt av Huttunen-Saarivirta et al. (2011) (8,1-8,3), men det er uklart om det er akkurat de samme Betafrost-produktene som har blitt undersøkt i de to studiene. pH i vannfortynnet urea fra Ørland var noe høyere enn løsningen av urea granulat laget i laboratoriet. Huttunen-Saarivirta et al. (2011) oppga pH til urea granulat til å være 9,2, som samsvarte relativt godt med pH i løsningen av urea granulat laget ved Ørland.

Det var betydelige forskjeller mellom ledningsevnen som ble målt i de ulike avisingsmidlene. Ledningsevnen i ufortynnet Aviform L50 var utenfor målområdet til instrumentet. Gen 3 hadde betydelig høyere ledningsevne enn Betafrost L Plus og urea. Ledningsevnen til løsningene av Betafrost G og Nutristim var i samme størrelsesorden, og noe høyere enn ledningsevnen i Betafrost L Plus. Det er ikke kjent nøyaktig hva produktene Betafrost L Plus, Betafrost G og Nutristim inneholder. Den nøyaktige konsentrasjonen av betain i Betafrost L Plus er heller ikke kjent. Andre innholdstoffer enn betain eller forskjeller i konsentrasjon av betain kan være årsaker til forskjellene i ledningsevne. Høyere ledningsevne i vannfortynnet urea fra Ørland kan skyldes at denne blandingen var laget med springvann, mens løsningen i laboratoriet var laget med deionisert vann.

Shi (2008) har oppgitt elektrisk ledningsevne i 1% løsninger av betain, urea, kaliumacetat og -formiat, der betain er oppgitt til å ha en ledningsevne på 99 $\mu\text{S}/\text{cm}$, urea 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$, og kaliumacetat og -formiat på hhv. 7000 og 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Huttunen-Saarivirta et al. (2011) oppga at Aviform L50 hadde ledningsevne på 9170 $\mu\text{S}/\text{cm}$, urea 17 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Betafrost med korrosjonsinhibitor 99 $\mu\text{S}/\text{cm}$ og Betafrost uten korrosjonsinhibitor 4,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ledningsevnene oppgitt av Shi (2008) og Huttunen-Saarivirta et al. (2011) stemmer forholdsvis godt med ledningsevnene målt i denne studien. Ledningsevnen målt i 1 % løsning av Betafrost L Plus var lavere enn for 1 % løsningene av Betafrost G og Nutristim.

For å gi en indikasjon på korrosiviteten til smeltevann iblandet avisingsmiddel, ble pH og ledningsevne målt i blandingene av avisingsmidlene som ble brukt i avisingstestene og kunstig regnvann. Det ble benyttet samme blandingsforhold som i smeltetestene, dvs. 5 ml avisingsmiddel i 100 ml regnvann. Resultatene er vist i Tabell 3.3.

Tabell 3.3 pH og ledningsevne av avisingsmiddel i kunstig regnvann

Avisingsmiddel	pH	Ledningsevne ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Betafrost L Plus	9,2	101
Løsning av Betafrost G	9,6	69
Løsning av Nutristim	9,6	73
Vannfortynnet urea fra Ørland	9,2	119
Løsning av urea granulat	7,8	52
Aviform L50	9,6	21 260
Kunstig regnvann	8,4	26

Alle avisingsmidlene, med unntak av løsningen av urea laget i laboratoriet, økte pH i smeltevannet til mellom 9,2 og 9,6. Alle avisingsmidlene økte ledningsevnen til regnvannet, økningen var minst for løsningene Betafrost G, Nutristim og urea laget på laboratoriet, og noe høyere for Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland. Smeltevannet iblandet Aviform L50 hadde betydelig høyere ledningsevne enn smeltevannet iblandet de andre avisingsmidlene.

3.1.3 Løselighet i vann

Det ble laget blandinger med avisingsmidlene i fast form og vann ved å løse hhv. 25, 50, 70, 100 og 200 g avisingsmiddel i 100 ml springvann.

Nutristim løste seg betydelig lettere i vann enn Betafrost G, urea og Aviform S. Dette var som forventet fordi Nutristim foreligger som et finkornet pulver mens de øvrige stoffene foreligger som granulat (se Figur 2.1). Generelt tok det lengre tid å løse opp stoffene i de mest konsentrerte blandingene. Det tok flere timer å løse opp 100 g Betafrost G, urea og Aviform S i 100 ml vann. Blandingene ble satt på ristemaskin og/eller rotator for å løse opp granulatet. Det var spesielt vanskelig å løse opp Aviform S som fortsatt ikke var fullstendig løst etter 24 timer på rotator.

Det var ikke mulig å løse 200 g urea granulat i vann da blandingen krystalliserte seg. Også blandingen med 100 g urea i vann krystalliserte seg når den ble lagret ved $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Blandingene med 100 g Aviform S ble varmet opp til rundt $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ for å forsøke å løse opp mest mulig av granulatet. Etter en time ved romtemperatur krystalliserte løsningen seg. De øvrige blandingene forble flytende også ved $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. De mest konsentrerte blandingene av Betafrost G og Nutristim i vann framsto veldig tyktflytende. Løseligheten av urea og betain er hhv. 55 og 61 g/100 ml (Tabell 1.1), og en løsning med 100 g avisingsmiddel per 100 ml vil derfor være overmettet. Natriumformiat skal ha en løselighet på 97 g/100 ml vann ved romtemperatur, høyere enn for betain og urea. Det var likevel vanskelig å lage en overmettet løsning av Aviform S som inneholder natriumformiat enn av urea og produktene med betain.

3.1.4 Kjemisk og biokjemisk oksygenforbruk

Kjemisk og biokjemisk oksygenforbruk som ble målt i avisingsmidlene er vist i Tabell 3.4. Både resultatene for KOF og BOF i blandingene av avisingsmidlene som ble sendt inn til analyse, og resultatene omregnet til mg KOF/BOF per g avisingsmiddel er vist. Betafrost L Plus og Aviform L50 ble sendt inn i slik som produktene forelå fra produsenten. For avisingsmidlene i fast form, ble det laget blandinger som inneholdt 100 g avisingsmiddel per l vann. Konsentrasjonen av avisingsmiddel i Betafrost L Plus og Aviform L50 er basert på tettheten til blandingene og er usikker.

Tabell 3.4 KOF og BOF i avisingsmidler for blandingene som ble sendt inn, og resultatene omregnet til mg KOF/BOF per g avisingsmiddel i blandingen.

Avisingsmiddel	Konsentrasjon	KOF		BOF	
		mg O ₂ /l	mg O ₂ /g	mg O ₂ /l	mg O ₂ /g
Betafrost L Plus	ca. 645 g per l løsning	462 000	716	794 000	1 231
Betafrost G	ca. 100 g per l løsning	5 110	51	114 000	1 130
Nutristim	ca. 100 g per l løsning	6 140	61	112 000	1 120
Urea	ca. 100 g per l løsning	438	4	270	3
Aviform L50	ca. 675 g per l løsning	128 000	190	1 450	2
Aviform S	ca. 100 g per l løsning	23 800	238	554	6

Betafrost L Plus hadde betydelig høyere KOF og BOF, omregnet til mg per g avisingsmiddel, enn Betafrost G og Nutristim. Den nøyaktige konsentrasjonen av betain i Betafrost L Plus er ikke kjent, og usikkerhet i konsentrasjonen av betain eller andre innholdsstoffer i Betafrost L Plus, kan være en av årsakene til forskjellene i BOF og KOF mellom de ulike produktene. Betafrost og Nutristim viste forholdsvis lik KOF og BOF. For både Betafrost L Plus, Betafrost G og Nutristim var BOF høyere enn KOF. KOF ble analysert med metoden DIN 38409-41 som er en titrimetrisk metode som benytter kaliumdikromat som oksidasjonsmiddel, i tillegg til kvikksølvulfat og sølvulfat (Kolb et al., 2017). DIN 38409-41 skulle ifølge analyselaboratoriet være egnet til å oksidere betain. DIN 38409-41 er en alternativ metode til standardmetoden NS-ISO 15705, som benytter dikromat i forseglede rør og bestemmer KOF ved spektrometri. Det er kjent at dikromat ikke oksiderer betain, og standardmetoden egner seg derfor ikke for å bestemme KOF i løsninger med betain (Thalasso et al., 1999).

Ifølge produktdatabladet til Betafrost L Plus skal det ha KOF og BOF på henholdsvis 480 og 200 mg per g væske (Dupont Genencor, 2017), som er betydelig lavere enn resultatene i denne studien. Det er ikke oppgitt hvilken metode disse resultatene i databladet er basert på. Thalasso et al. (1999) har oppgitt at teoretisk KOF for betain beregnet med Buswell-likningen er 2200 mg/g, høyere enn både resultatene i denne studien og resultatene i databladet for Betafrost L Plus. Teoretisk oksygenforbruk (TOF) angir støkiometrisk mengde oksygen som kreves for å oksidere forbindelsen og for forbindelser som vanskelig lar seg oksidere vil TOF være høyere enn KOF (Baker et al., 1999). BOF i prøvene ble analysert med metoden DIN 1899-1 som skal tilsvare standardmetoden NS-EN-1899-1. Det ble målt høyere BOF enn KOF i alle produktene

med betain. Normalt er KOF høyere enn BOF fordi organiske forbindelser oksideres lettere kjemisk enn biologisk.

Det ble målt lav KOF og BOF for urea, selv om det er kjent at dette avisingsmiddelet har et høyt oksygenforbruk ved nedbrytning. Ifølge Shi (2008) skal urea ha KOF og BOF på rundt 2100 mg/g, betydelig høyere enn resultatene i denne studien viser. Det kan se ut som at metodene som ble benyttet ikke er egnet for måling av KOF og BOF for urea.

Aviform L50 og Aviform S skal ifølge produsenten ha KOF på henholdsvis 95 og 240 mg/g, og BOF på henholdsvis 90 og 200 mg/g (Addcon, 2012, Addcon, 2015). KOF oppgitt i databladene stemmer forholdsvis bra med resultatene i denne studien, mens BOF i databladet er høyere enn resultatene i denne studien. Schweigert og Poissonier (2016) oppga tilsvarende verdier for KOF for Aviform L50 og Aviform S som i databladet, men de oppga at BOF i Aviform L50 og Aviform S var ubetydelig lav. Resultatene i denne studien viste også lave verdier for BOF i Aviform L50 og Aviform S.

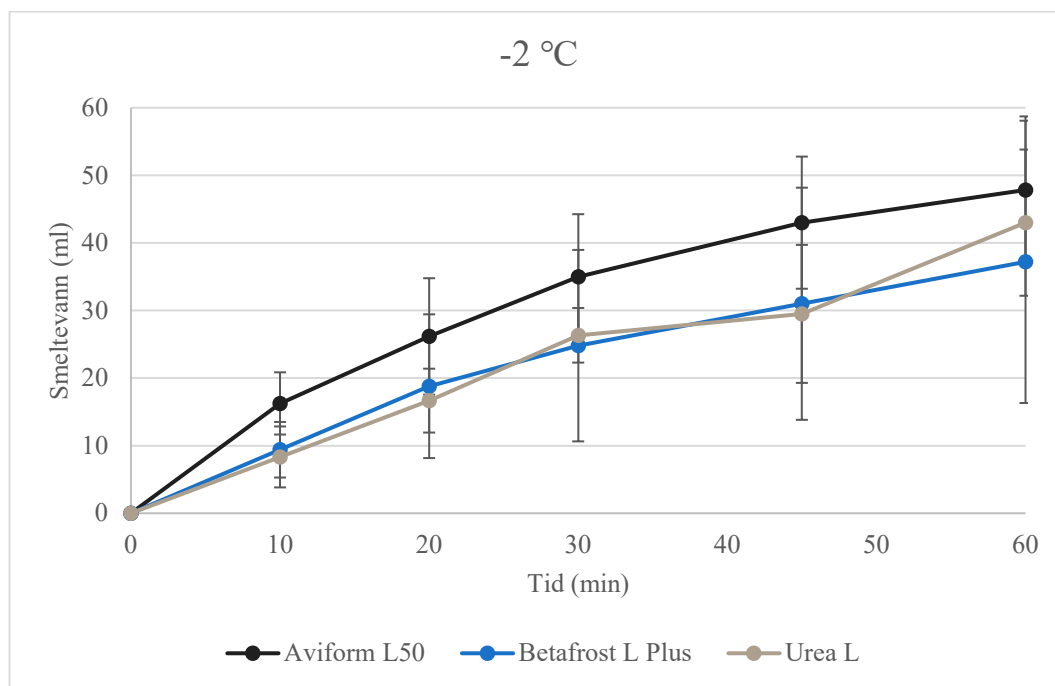
Resultatene fra analysene av KOF og BOF i avisingsmidlene viser at disse analysene kan være utfordrende, og at alle metoder ikke nødvendigvis er egnet for å måle KOF og BOF i alle typer produkter.

3.2 Issmeltingsrate og -kapasitet til avisingsmidlene

Issmeltingsrate og -kapasiteten til avisingsmidlene ble undersøkt ved ulike temperaturer, ulike konsentrasjoner og ulike doseringer av avisingsmidlene. En oversikt over testene som ble utført er gitt i Tabell 2.2. Resultatene fra alle testene er gitt i vedlegg B. Det er verdt å merke at det er stor usikkerhet forbundet med resultatene. Temperaturen i klimaskapet der forsøkene ble gjort økte raskt når skapet ble åpnet for å måle opp volumet smeltevann. Temperaturøkningen var høyest nærmest åpningen, og mindre lengst fra døra. Dette førte til at temperaturen i klimaskapet varierte avhengig av hvor skålene sto. Variasjonen i temperaturen i skapet førte til at isen i skålene som sto på siden med høyest temperatur tinte raskere enn isen i skålene på den andre siden. Forskjellen ble forsøkt utjevnet ved at skålenes plassering ble variert underveis i forsøket, samt at hvert avisingsmiddel ble testet flere ganger. Resultatene fra testene gir en indikasjon på hvordan de ulike avisingsmidlene fungerer i forhold til hverandre og ved ulike betingelser, men de gir ingen nøyaktige svar på issmeltingsraten og -kapasiteten til de ulike avisingsmidlene.

3.2.1 Ulike temperaturer

Smelteegenskapene for Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea granulater fra Ørland (Urea L) ved -2 °C er vist i Figur 3.1.

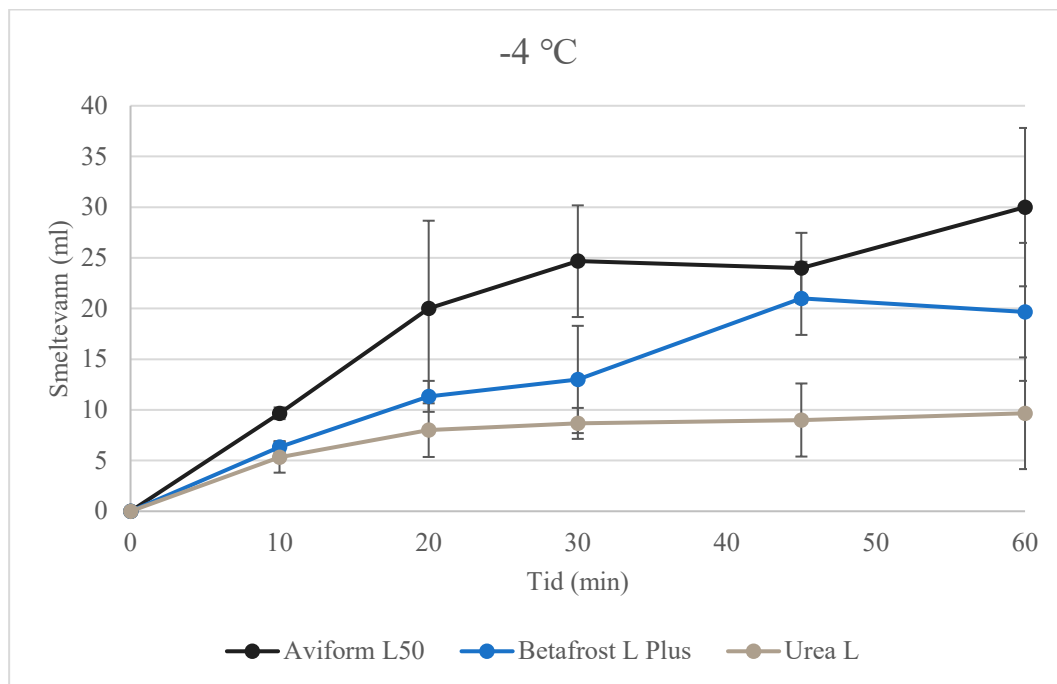


Figur 3.1 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland ved -2 °C. Resultatene er gjennomsnitt av 3-6 tester ± standardavvik.

Alle avisingsmidlene viste god smelteeffekt ved -2 °C. Volumet smeltevann økte jevnt gjennom testperioden. I løpet av 1 time smeltet avisingsmidlene is tilsvarende 37-48 ml smeltevann. Smelteeffekten var høyest for Aviform L50. Betafrost L Plus og vannfortynnet urea granulat fra Ørland viste omtrent like god smelteeffekt. Stor usikkerhet i resultatene gjør at det ikke er mulig å konkludere om det er noen signifikant forskjell i smelteeffekten til Betafrost L og vannfortynnet urea. Under et par av testene sto skålene i -2 °C i ytterligere 1,5 time etter smeltetesten var avsluttet. I løpet av denne tiden smeltet Aviform L50 is tilsvarende 80 ml smeltevann, mens Betafrost L Plus smeltet is tilsvarende 53 ml smeltevann.

Alatypö og Jutila (2010b) sammenliknet avisingsegenskapene til betain og kaliumformiat (tilsvarende Aviform L50) med en penetrasjonstest (SHRP H-205.3 og H-205.4) ved -2 °C. De fant at effekten av kaliumformiat var i overkant av dobbelt så høy, målt i mm penetrasjon av islaget, som effekten av betain. Til sammenlikning viste smeltetesten i denne studien at effekten av Aviform L50 var rundt 30-40 % høyere enn effekten av Betafrost L Plus. De kjemiske egenskapene til avisingsmidlene (Tabell 1.1) indikerte også at formiat er et mer effektivt avisingsmiddel enn urea og betain på bakgrunn av at formiat har lavere molekylmasse og danner flere molekyler når det løses i vann.

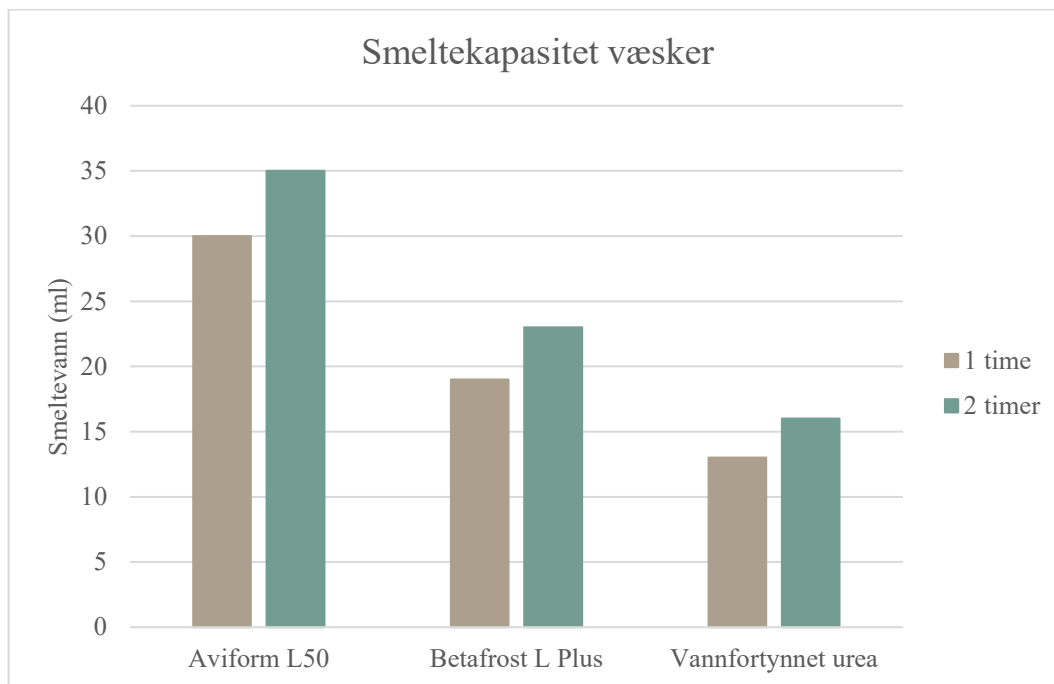
Smelteegenskapene for Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland (Urea L) ved -4 °C er vist i Figur 3.2.



Figur 3.2 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland ved -4 °C. Resultatene er gjennomsnitt av 3tester ± standardavvik.

Smelteeffekten ved -4 °C var lavere enn ved -2 °C. I løpet av 1 time smeltet Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland is tilsvarende henholdsvis ca. 10, 20 og 30 ml smeltevann. Aviform L50 og Betafrost L Plus viste relativt jevn smelteeffekt gjennom hele testperioden, men smelteeffekten stoppet litt mer opp etter 30 minutter enn hva som var tilfellet ved -2 °C.

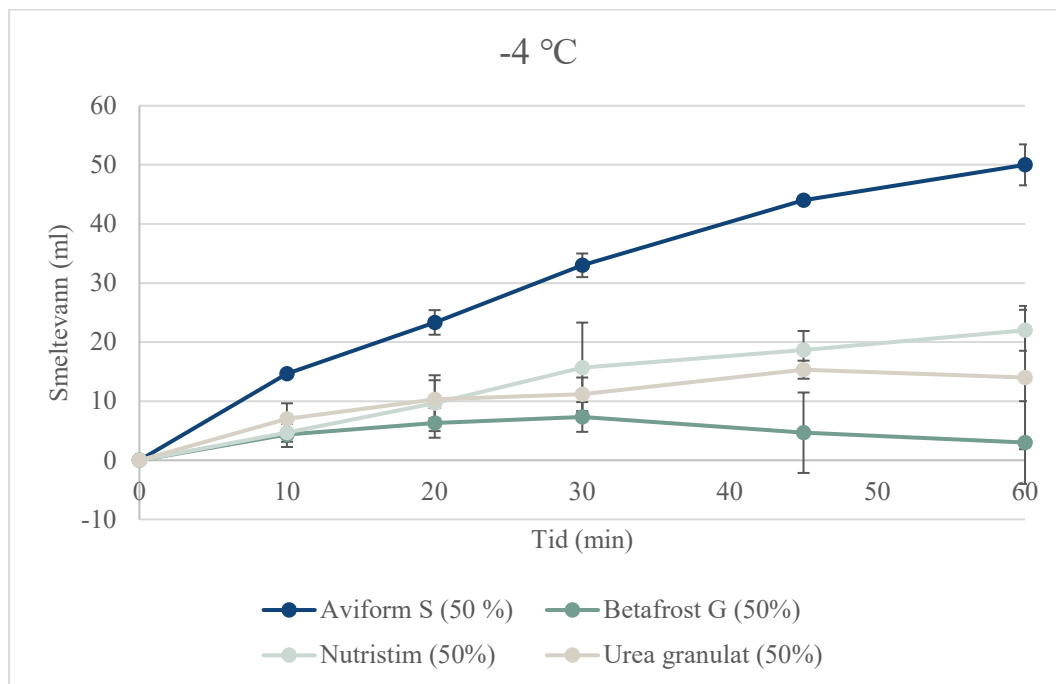
Det ble også utført en test av total smeltekapasitet for Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland der smeltevannet ble målt opp etter 1 og 2 timer. Testen ble utført ved -4°C. Resultatene er vist i Figur 3.3.



Figur 3.3 Smelteeffekt vist som totalt volum smeltevann målt opp 1 og 2 timer etter at avisingsmidlene var tilført skålene med is. Resultatene av en test som ble utført ved -4 °C.

Aviform L50 viste høyest smeltekapasitet i løpet av 1 og 2 timer, etterfulgt av Betafrost L Plus og vannfortynnet urea. Resultatene samsvarte med resultatene i Figur 3.2. Det var kun en liten økning i volumet smeltevann i løpet av den andre timen av testen, som indikerer at avisingsmidlene hovedsakelig viste effekt i løpet av den første timen.

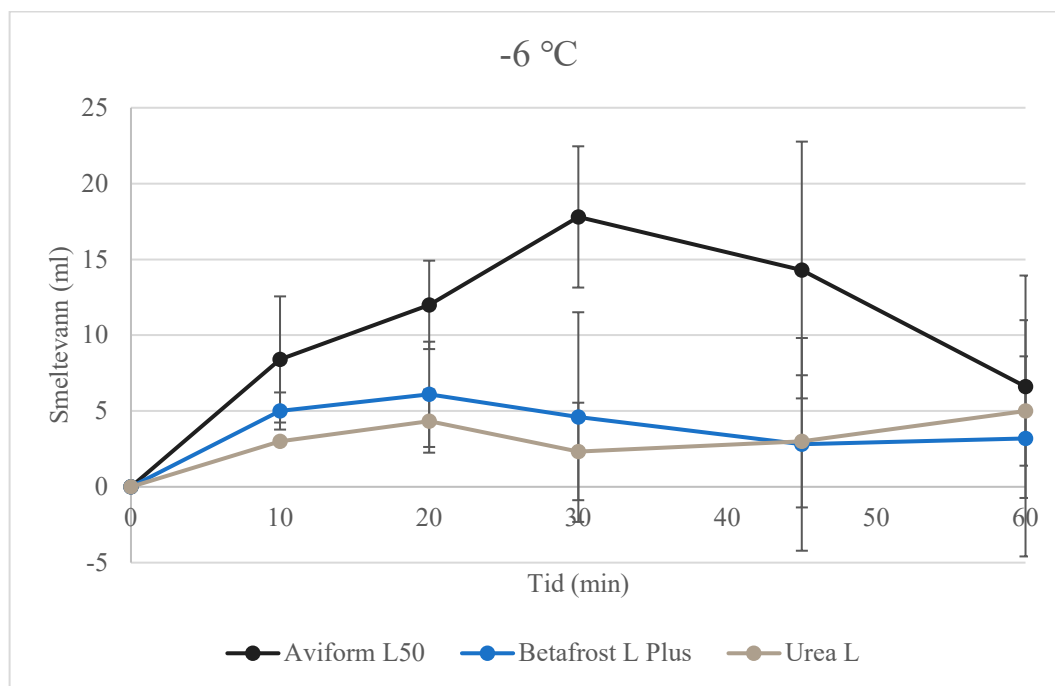
Smelteegenskapene for blandinger av Betafrost G, Nutristim og urea granulat laget på laboratoriet ved -4 °C er vist i Figur 3.4.



Figur 3.4 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for løsninger av Aviform S, Betafrost G, Nutristim og urea granulat laget på laboratoriet ved $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Resultatene er gjennomsnitt av 3 tester \pm standardavvik.

Smelteeffekten for løsningen av urea granulat laget på laboratoriet var høyere enn smelteeffekten for blandingen av urea granulat laget på Ørland. Smelteeffekten for løsningen av Aviform S laget på laboratoriet var også høyere enn smelteeffekten for Aviform L50. For å oppnå et blandingsforhold på 50 % Aviform S i vann, var det nødvendig å varme opp blandingen og løsningen som ble påført isen var sannsynligvis overmettet. Aviform L50 består av kaliumformiat, som har mye høyere løselighet i vann enn natriumformiat, som Aviform S består av. Løsningen av Nutristim laget på laboratoriet viste omtrent like god smelteeffekt som Betafrost L Plus, og bedre smelteeffekt enn urea, både blandingen fra Ørland og løsningen laget på laboratoriet. Løsningen av Betafrost G laget på laboratoriet viste dårligst smelteeffekt av avisingsmidlene. Det er ikke kjent hvorfor løsningene av Betafrost G laget på laboratoriet og Betafrost L Plus, og løsningen av urea granulat laget på laboratoriet og på Ørland viste forskjellig smelteeffekt. Betafrost L Plus og blandingen av urea granulat fra Ørlandet skal inneholde omtrent 50 vekt% betain/urea, men forskjeller i innholdet av avisingsmiddel eller andre tilsetningsstoffer kan være en årsak til at blandingene viste forskjellig smelteeffekt. Målingene av pH og ledningsevne i blandingene indikerte at det var noen forskjeller i de kjemiske egenskapene til løsningene.

Smelteegenskapene for Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland (Urea L) ved $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ er vist i Figur 3.5.



Figur 3.5 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland ved -4 °C. Resultatene er gjennomsnitt av 3-6 tester ± standardavvik.

Alle avisingsmidlene smeltet noe is i løpet av de første 20-30 minuttene av testen ved -6 °C, men etter dette ble det ikke observert noen ytterligere smelting av isen. Aviform L50 viste relativt god smelteeffekt i løpet av de første 30 minuttene, men etter dette ble det målt synkende volum smeltevann i skålene. Etter 1 time var det knapt mer smeltevann i skålene tilført Aviform L50 enn skålene tilført Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland. Det kan være flere årsaker til at volumet smeltevann i skålene tilsynelatende avtok den siste halvdel av testen. Etterhvert som volumet smeltevann i skålene øker, vil konsentrasjonen av avisingsmiddel i smeltevannet avta, som kan gjøre at avisingsmiddelet ikke lenger vil eksistere i høy nok konsentrasjon til å fungere effektivt som avisingsmiddel. Trenden var spesielt tydelig for Aviform L50, som kan forklares med det relativt høye volumet smeltevann etter 30 minutter, som ga en lav konsentrasjon av avisingsmiddel i smeltevannet. De øvrige avisingsmidlene ga lite smeltevann gjennom hele testen. Det er også mulig at noe av smeltevannet samlet seg under isen og dermed ikke ble målt opp. Skålene ble rotert under oppsamlingen for å sikre at så mye som mulig av smeltevannet ble samlet opp.

Som ved -2 og -4 °C, viste Aviform L50 best smelteeffekt av avisingsmidlene ved -6 °C. Den eutektiske temperaturen til kaliumformiat, som Aviform L50 inneholder, indikerer at kaliumformiat kan fungere effektivt som avisingsmiddel ned til svært lave temperaturer. Forskjellen mellom smelteeffekten for Betafrost L Plus og urea ved -6 °C var liten. Alatypö og Jutila (2010b) fant også at smelteeffekten for betain og kaliumformiat var lavere ved -6 °C enn ved -2 °C, spesielt for betain. Forskjellen mellom smelteeffekten var større etter 30 enn etter 10

minutter, slik som også ble observert i våre tester. Nixon et al. (2005) sammenliknet avisingsegenskaper for ulike saltløsninger ved -18, -12, -6 og -1 °C. Saltløsningene i studien av Nixon et al. (2005) er ikke aktuelle som avisingsmidler på rullebaner, men enkelte av resultatene fra testene er likevel interessante. Nixon et al. (2005) fant at mengden is som ble smeltet av avisingsmidlene avtok med temperaturen, og alle avisingsmidlene var mest effektive ved de høyeste temperaturene som ble testet. De fant også at ved de laveste temperaturene var det enkelte av avisingsmidlene som frøys på igjen, slik som også ble observert i våre tester. Videre fant de at smeltemraten generelt var høyest de første 10 minuttene av smeltesten, slik som vi også fant i våre tester.

Gerbino-Bevins et al. (2012) undersøkte hvordan betajuce, acetater og kloridsalter smeltet is ved temperaturer fra -7 til -18 °C. Løsningene med betajuce smeltet generelt minst is av avisingsmidlene i laborietestene, og også felttester viste at betajuce fungerte dårligere enn for eksempel magnesiumklorid. Betain forekommer i store mengder i sukkerbeter (Craig, 2004), men det er usikkert hvor høy konsentrasjonen av betain var i betajuicen undersøkt av Gerbino-Bevins et al. (2012).

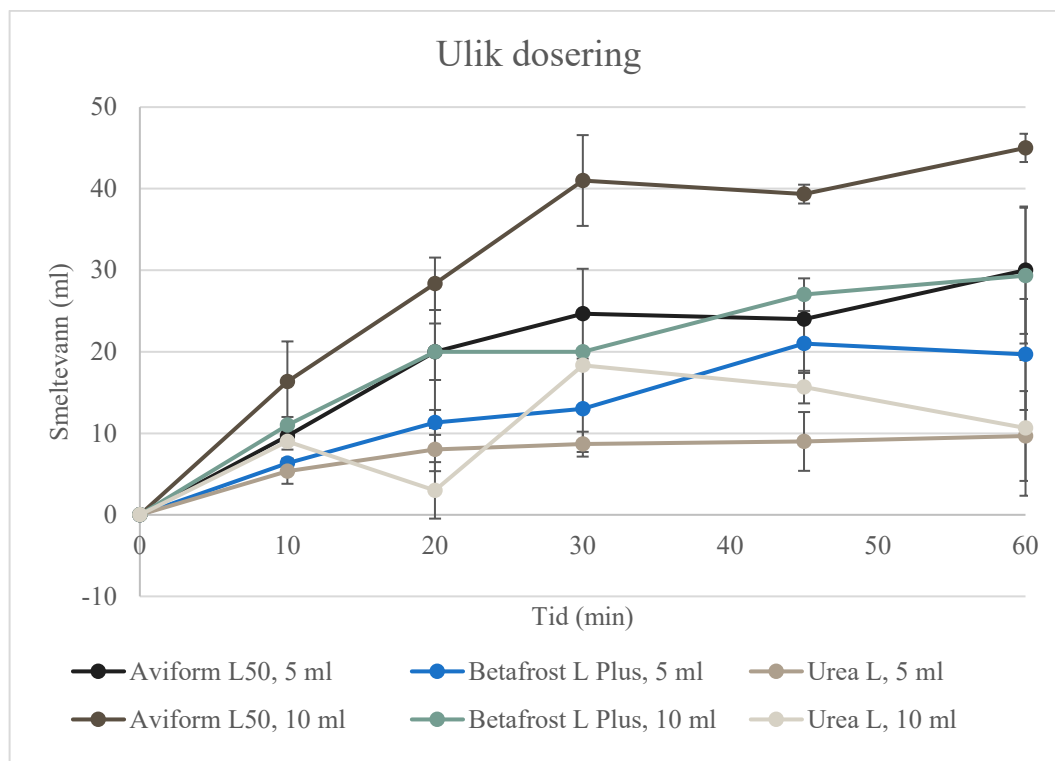
Ved testene som ble utført ved de laveste temperaturene, spesielt -6 °C, var det lite smeltevann i skålene, men i flere av testene ble det observert en del slaps. Dette gjaldt spesielt for testene med Betafrost L Plus og Betafrost G. Da det kun var volum smeltevann som ble målt, framkommer ikke mengden slaps i skålene i resultatene. Smelteeffekten av betain kan være høyere enn det disse testene gir uttrykk for. Under realistiske forhold vil det benyttes mekaniske metoder, som børsting, skraping og feing, for å fjerne is og smeltevann, og ved bruk av slike metoder vil det være enklere å fjerne slaps enn is. Alatyppö og Jutila (2010b) sammenliknet betain og kaliumformiat i laborie- og felttester. De fant ingen signifikant forskjell på effekten av produktene i felttestene, mens effekten av betain var betydelig dårligere enn effekten av kaliumformiat i laborietestene. Felttestene viste at både betain og kaliumformiat ga tilstrekkelig høy friksjon (>0,4) på rullebanen etter børsting (Alatyppö og Jutila, 2010b).

3.2.2 Ulike doseringer

De fleste testene ble utført med 5 ml avisingsmiddel per skål. Skålene hadde en diameter på 19 cm som gir et overflateareal av isen på ca. 280 cm² (0,028 m²). Med 5 ml avisingsmiddel per skål gir dette en dosering på 178 ml/m², som tilsvarer omtrent 120 g/m². Til sammenlikning er maksimal dosering av avisingsmiddel med utleggere på rullebaner på lufthavner 50 g/m² (Alatyppö og Jutila, 2010b, Schweigert og Poissonier, 2016). Ifølge Addcon, produsenten av Aviform, er anbefalt dosering av Aviform L50 ved 0 til -5 °C 15-25 g/m² ved frost eller tynt lag med is (<1 mm), og 30-40 g/m² ved snø eller tykkere lag med is (1-3 mm). Ved -5 til -10 °C, anbefales det å tilføre 25-35 g/m² ved frost eller tynn is og 40-60 g/m² ved snø eller tykkere lag med is (Addcon, 2019). Doseringen i laborietestene var altså betydelig høyere enn doseringen som benyttes på lufthavner.

For å undersøke effekten av å øke mengden avisingsmiddel, ble det utført noen tester der det ble benyttet 10 ml avisingsmiddel per skål, som tilsvarer en dosering på 357 ml/m². Testene ble

utført ved -4 °C. Sammenlikningen av smelteegenskapene ved å bruke 5 og 10 ml av Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland (Urea L) er vist i Figur 3.6.



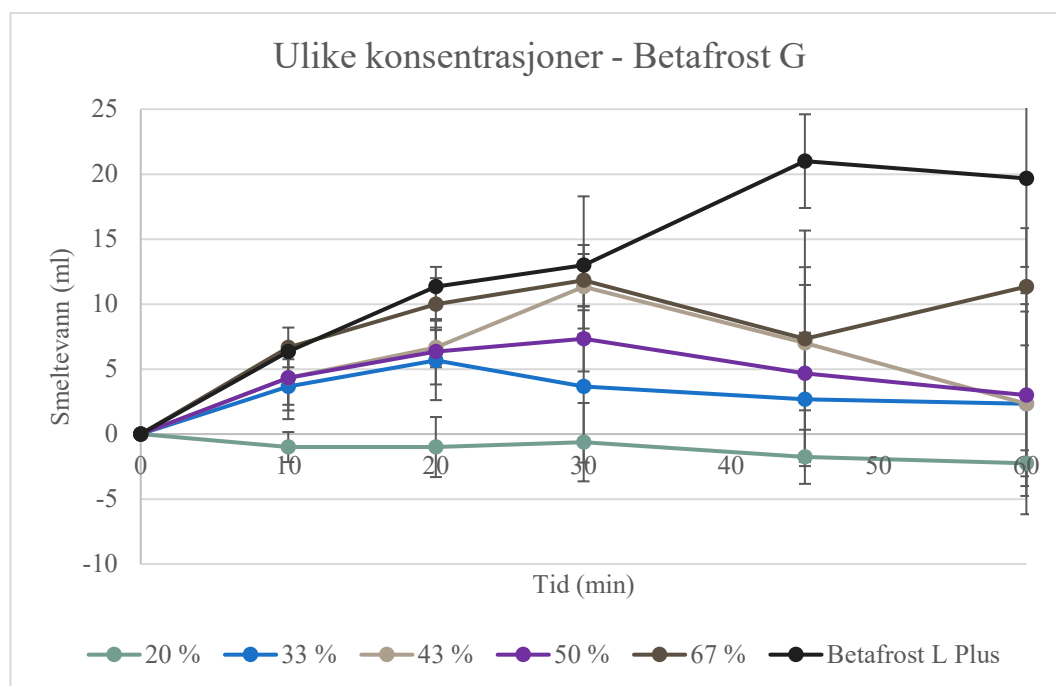
Figur 3.6 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for ulike doseringer av Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland. Resultatene er gjennomsnitt av 3-6 tester \pm standardavvik. Testen ble utført ved -4 °C.

For alle avisingsmidlene økte smelteeffekten ved å øke mengden avisingsmiddel som ble tilsatt skålen. Forskjellen mellom smelteeffekten for de ulike doseringene var størst for Aviform L50. Aviform L50 viste også de beste smelteegenskapene, og størst smelteeffekt ble oppnådd i testen med 10 ml Aviform L50 per skål. Testen med 10 ml Betafrost L Plus viste omtrent tilsvarende smelteeffekt som testen der det ble brukt 5 ml Aviform L50. Resultatene indikerer at Aviform L50 er dobbelt så effektivt som Betafrost L Plus ved -4 °C. Urea viste de dårligste smelteegenskapene av de tre avisingsmidlene i denne testen. Smelteeffekten var høyere i testen der det ble benyttet 10 ml urea enn i testen med 5 ml urea, men store variasjoner i resultatene gjør det vanskelig å konkludere hvor stor forskjellen var.

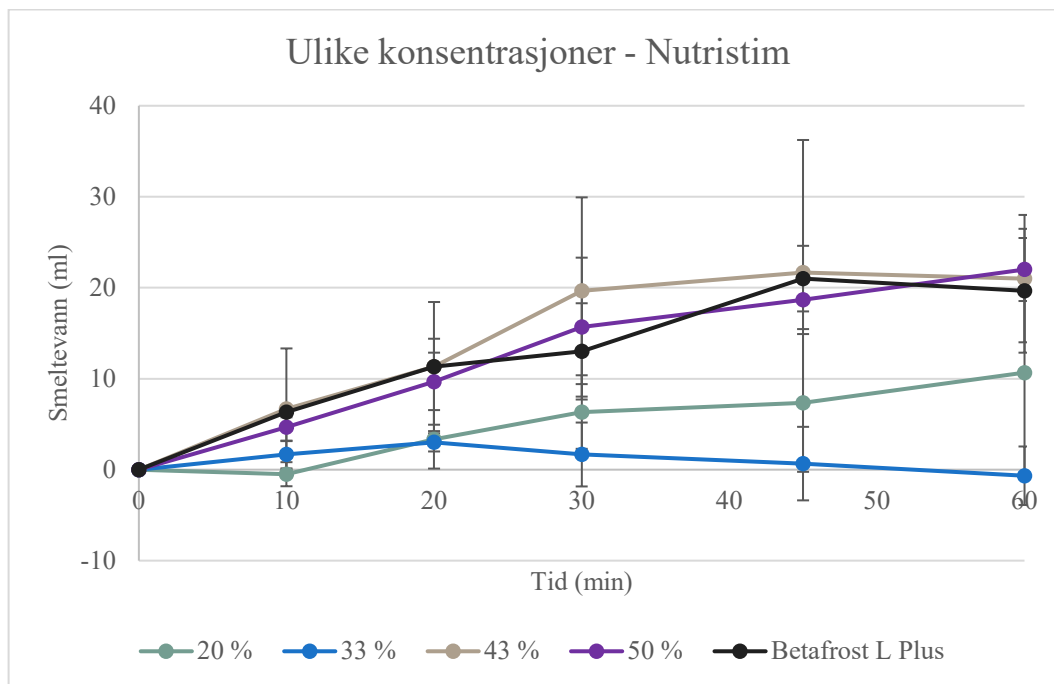
3.2.3 Ulike konsentrasjoner

For avisingsmidlene i fast form, ble det laget blandinger med forskjellige konsentrasjoner av avisingsmiddel. Testene ble utført ved -4 °C. Konsentrasjonen av avisingsmiddel varierte fra 20

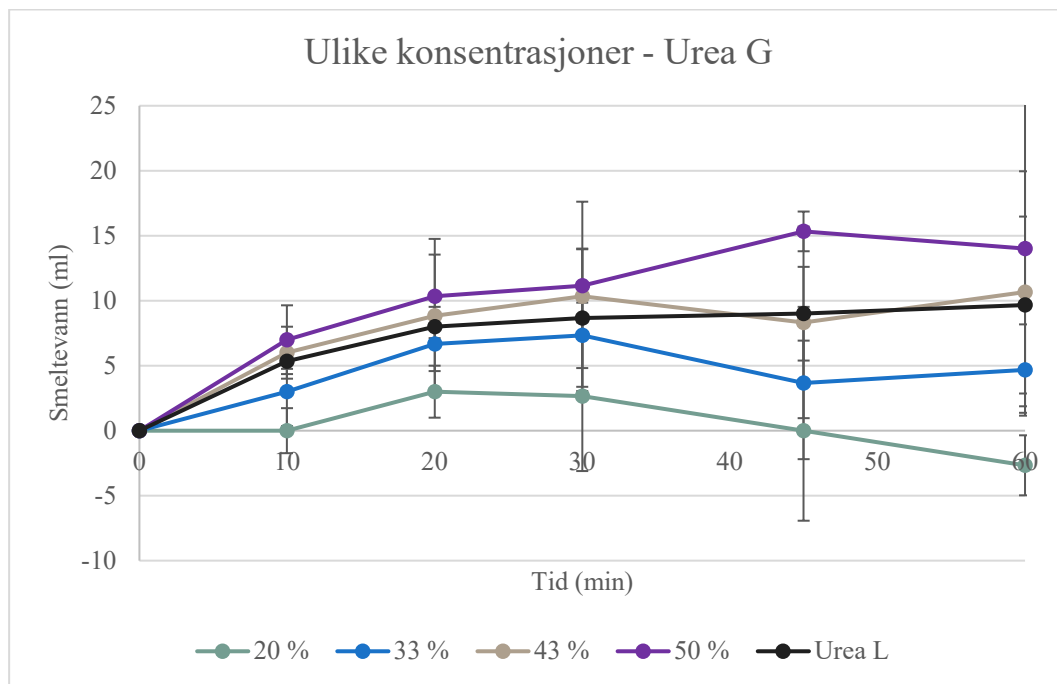
til 67 vekt%. Sammenlikning av smelteegenskapene for de ulike konsentrasjonene er vist i Figur 3.7 for Betafrost G, Figur 3.9 for Nutristim og i Figur 3.9 for urea. Smelteegenskapene til løsningene med Betafrost G og Nutristim ble sammenliknet med Betafrost L Plus og smelteegenskapene til løsningene med urea granulat ble sammenliknet med vannfortynnet urea fra Ørland.



Figur 3.7 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for ulike konsentrasjoner av Betafrost G sammenliknet med Betafrost L Plus. Resultatene er gjennomsnitt av 3-6 tester \pm standardavvik. Testen ble utført ved -4 °C.



Figur 3.8 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for ulike konsentrasjoner av Nutristim sammenliknet med Betafrost L Plus. Resultatene er gjennomsnitt av 3-6 tester \pm standardavvik. Testen ble utført ved -4°C .

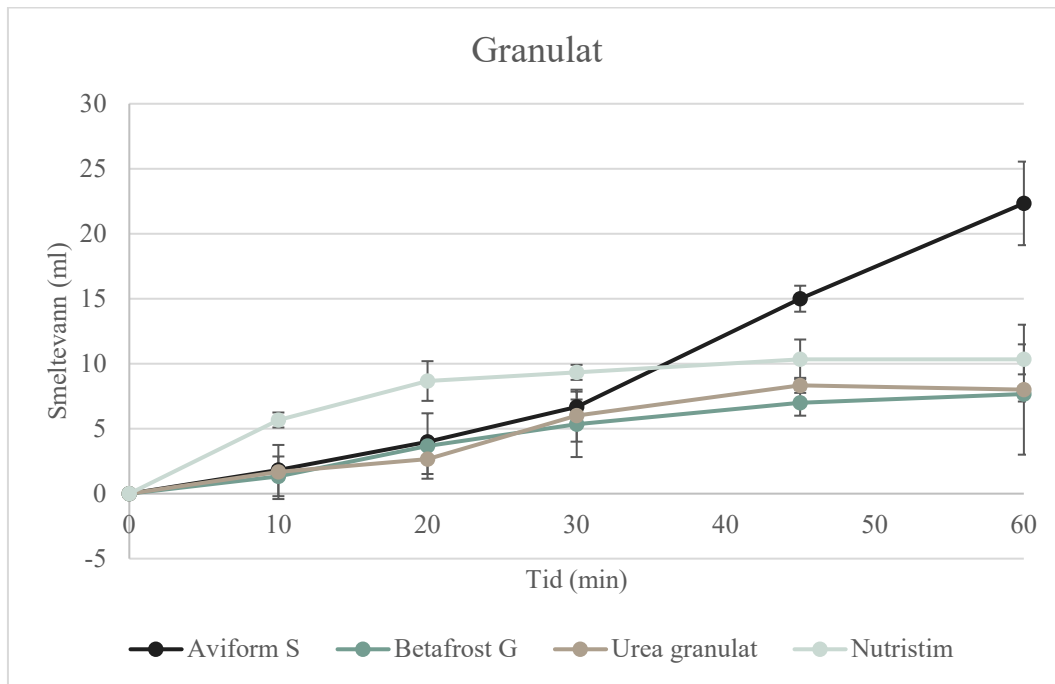


Figur 3.9 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for ulike konsentrasjoner av urea granulat sammenliknet med vannfortynnet urea fra Ørland flystasjon. Resultatene er gjennomsnitt av 3-6 tester \pm standardavvik. Testen ble utført ved -4 °C.

Generelt økte smelteeffekten ved å øke konsentrasjonen av avisingsmiddel i blandingen. For Betafrost G og urea, ble den høyeste smelteeffekten oppnådd for blandingen med høyest konsentrasjon. For Nutristim viste blandingene med 43 og 50 % omtrent like god smelteeffekt, og like god smelteeffekt som Betafrost L Plus (som inneholder ca. 50 % betain). Det er uklart hvorfor blandingen med 33 % Nutristim viste dårligere smelteeffekt enn blandingen med 20 %, men usikkerhet i målingene kan være en årsak. Gerbino-Bevins et al. (2012) fant også at mer konsentrerte løsninger av betajuce smeltet mer is, men det var ikke en lineær sammenheng mellom konsentrasjon og issmeltingskapasiteten.

3.2.4 Avisingsmiddel i fast form

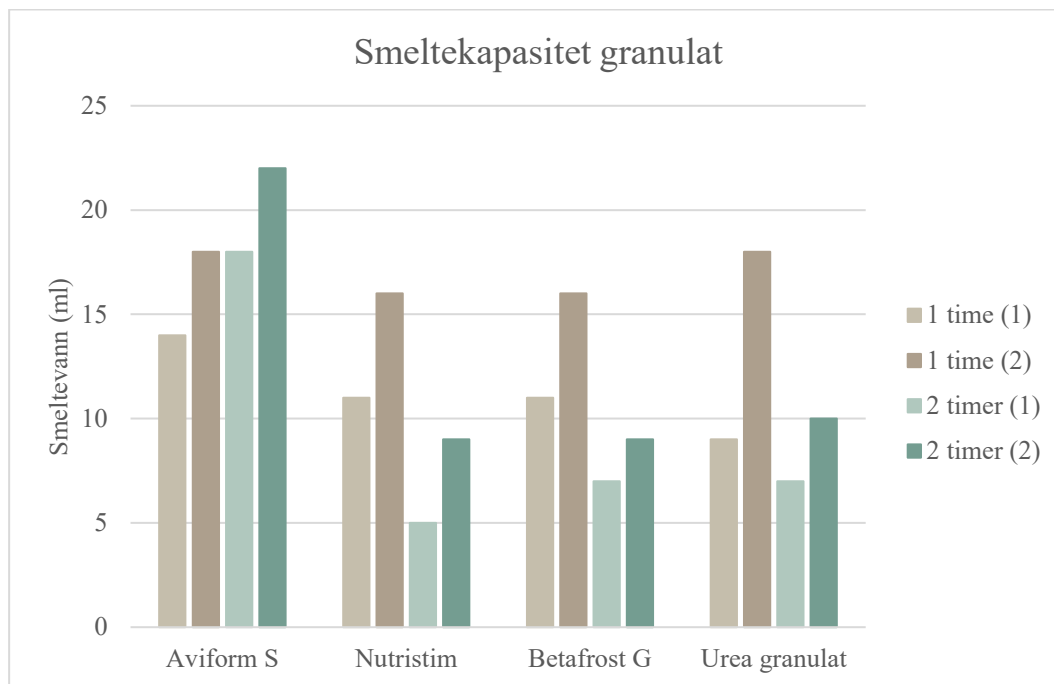
Det er hovedsakelig avisingsmidler i flytende form som benyttes for å avise rullebaner, men det benyttes også noe avisingsmiddel i form av granulat (Avinor, 2019, Kirkhorn et al., 2020). Smelteeffekten til avisingsmidler som ble tilsatt isen som fast stoff er vist i Figur 3.10.



Figur 3.10 Smelteeffekt vist som volum smeltevann samlet opp ved ulike tidsintervaller for avisingsmiddel i fast form. Resultatene er gjennomsnitt av 3 tester \pm standardavvik. Testen ble utført ved -4°C .

Generelt fungerte avisingsmidlene i fast form tregere enn med avisingsmidlene i flytende form. Dette henger sammen med at avisingsmidler i fast form må hydreres før de kan fungere (Schweigert og Poissonier, 2016). Effekten av avisingsmiddel i fast form gjør seg først gjeldende når det har blitt oppnådd et visst volum smeltevann slik at avisingsmiddelet spres over større deler av skålen. For Aviform S økte smelteeffekten over tid, mens de andre avisingsmidlene i fast form viste en utflating i effekten over tid.

Det ble også utført en måling av total smeltekapasitet der smeltevannet ble målt opp etter 1 og 2 timer. Testene ble utført ved -4°C . Det ble utført to tester og resultatene av begge testene er vist i Figur 3.11.



Figur 3.11 Smelteeffekt vist som totalt volum smeltevann målt opp 1 og 2 timer etter at avisingsmidlene var tilført skålene med is. Resultatene av to parallelle tester (markert som (1) og (2)) utført ved -4°C .

Aviform S viste en annen tendens enn Nutristim, Betafrost G og Urea G i testen av total smeltekapasitet enn i testen der både issmeltingsrate og -kapasitet ble målt. For Aviform S var volumet smeltevann etter 1 time noe lavere i testen av total smeltekapasitet enn i testen der smeltevolumet ble målt opp flere ganger, mens det var motsatt for Nutristim, Betafrost G og Urea G. For Aviform S økte volumet smeltevann noe i løpet av den andre timen i testen av total smeltekapasitet, mens for Nutristim, Betafrost G og Urea G ble det målt et lavere volum smeltevann etter 2 timer enn etter 1 time. Resultatene kan indikere at smeltevannet frøys på igjen i løpet av den andre halvdel av testen for isen tilsatt Nutristim, Betafrost G og urea G. Resultatene samsvarer med resultatene i Figur 3.10 som indikerte at for Aviform S økte smeltehastigheten over tid, mens den avtok for Nutristim, Betafrost G og urea granulat. Resultatene skiller seg fra målingen av smeltekapasitet for de flytende avisingsmidlene (se Figur 3.3), der volumet smeltevann økte noe i løpet av den andre timen av testen, for alle avisingsmidlene. Volumet smeltevann var større i parallell 2 enn i parallell 1 for alle avisingsmidlene. De to parallelle testene ble utført samtidig. Større volum smeltevann i parallell 2 kan forklares med at klimaskapet sto delvis åpent mens smeltevann ble målt opp og skålene i parallell 2 sto litt lenger før smeltevannet ble målt opp.

Generelt viste avisingsmidlene i fast form lavere smeltekapasitet enn avisingsmidlene i flytende form. Aviform S viste best smelteeffekt av avisingsmidlene i fast form. Nutristim smeltet isen raskere enn urea og Betafrost G. I motsetning til urea granulat og Betafrost G, foreligger

Nutristim som pulver som gjør at det lettere kan spres utover isen, og det løses i tillegg lettere og raskere opp i smeltevannet som dannes. Jo større overflate det faste avisingsmiddelet har, jo fortere vil smelteprosessen gå (Schweigert og Poissonier, 2016). Dette kan forklare hvorfor Nutristim fungerte raskere i fast form enn Betafrost G og urea granulat.

Avisingsmidlene i fast form ga generelt lavere volum smeltevann etter 1 time enn de samme avisingsmidlene i flytende form. Unntaket var Betafrost G som ga noe høyere volum smeltevann som 50 % løsning, men smelteeffekten til Betafrost G var generelt dårligst av avisingsmidlene, både i fast og flytende form.

3.3 Infiltrasjonsforsøk av betainholdig vann

Konsentrasjonen av TotN, TOC, KOF og BOF i kunstig regnvann med betain ble målt etter at vannet var ført gjennom kolonner med ulike filtermaterialer og kombinasjoner av filtermaterialer. Konsentrasjonen ble sammenliknet med konsentrasjonen i en prøve som ikke var ført gjennom kolonnene. Innholdet av TotN, TOC, KOF og BOF i prøvene varierte en del fra uke til uke (Vedlegg D). Noe av forskjellene skyldes sannsynligvis usikkerhet i målemetodene. Spesielt for KOF var det store variasjoner i resultatene fra uke til uke. Den vanligste metoden for å bestemme innhold av KOF i vannprøver benytter dikromat som oksidasjonsmiddel. Dikromat er ikke i stand til å oksidere betain, og betain gir derfor ikke utslag på innholdet av KOF i vannprøvene. Konsentrasjonen av KOF i prøvene er derfor underestimert (Thalasso et al., 1999). Resultatene for KOF ble vurdert til være så usikre at de ikke ble benyttet til å vurdere effekten av infiltrasjonsforsøkene. Resultatene for KOF i prøvene er gitt sammen med de andre resultatene i vedlegg D.

Reduksjonen i innholdet av TotN, TOC og BOF for vannet med betain som ble ført gjennom de ulike filtermaterialene og kombinasjonene av filtermaterialene i løpet av den 15 uker lange testperioden er vist i Tabell 3.5.

Tabell 3.5 Reduksjon i innhold av TotN, TOC og BOF for vann med betain ført gjennom ulike filtermaterialer. Resultatene viser reduksjonen for hver uke det ble tatt ut prøve, sammenliknet med gjennomsnittlig innhold av parameterne i ufiltrert prøve gjennom hele forsøksperioden. Positive tall er markert i grønt og indikerer at innholdet av TotN/TOC/BOF ble redusert, mens negative tall er markert i rødt og indikerer at innholdet økte, sammenliknet med referanseprøven.

Filtermateriale	Parameter	Uke 1	Uke 2*	Uke 4	Uke 5	Uke 6	Uke 7	Uke 9	Uke 11	Uke 13*	Uke 15
Jord	TotN	0 %	3 %	7 %	2 %	-3 %	0 %	3 %	-3 %	3 %	0 %
	TOC	-3 %	5 %	1 %	-3 %	-7 %	-3 %	5 %	5 %	9 %	5 %
	BOF	-7 %	-1 %	-10 %	-2 %	-9 %	-12 %	4 %	-1 %	-5 %	1 %
Aktivt kull	TotN	74 %	13 %	49 %	33 %	10 %	7 %	7 %	7 %	-10 %	28 %
	TOC	75 %	17 %	41 %	41 %	13 %	13 %	9 %	9 %	-3 %	25 %
	BOF	75 %	11 %	44 %	32 %	13 %	6 %	4 %	1 %	-10 %	18 %
Kvartssand + MnO ₂	TotN	0 %	7 %	5 %	-1 %	-3 %	-3 %	2 %	0 %	3 %	0 %
	TOC	5 %	17 %	9 %	1 %		9 %	5 %	5 %	13 %	5 %
	BOF	-5 %	6 %	-2 %	-2 %	-1 %	1 %	1 %	1 %	3 %	-1 %
Kvartssand	TotN	0 %	3 %	8 %	0 %	-6 %	-1 %	2 %	0 %	3 %	2 %
	TOC	5 %	13 %	5 %	1 %	-3 %		5 %	5 %	9 %	5 %
	BOF	-4 %	9 %	-1 %	3 %	-5 %	-2 %	6 %	-2 %	4 %	-9 %
Aktivert glass	TotN	-3 %	2 %	3 %	0 %	-1 %	-3 %	2 %	-1 %	2 %	-1 %
	TOC	1 %	-3 %	-3 %	-3 %	-7 %	-3 %	1 %	1 %	5 %	1 %
	BOF	-7 %	-2 %	-4 %	-4 %	-14 %	-20 %	-10 %	-1 %	9 %	-7 %
Aktivert glass + MnO ₂	TotN	0 %	3 %	5 %	-1 %	-5 %	3 %	2 %	-3 %	2 %	-8 %
	TOC	-3 %	-3 %	-3 %	-3 %	-3 %	5 %	1 %	5 %	9 %	5 %
	BOF	-7 %	-1 %	-7 %	1 %	-9 %	-2 %	-9 %	-10 %	4 %	-2 %
CaCO ₃	TotN	0 %	3 %	5 %	-1 %	-5 %	-5 %	3 %	2 %	0 %	-1 %
	TOC	1 %	1 %	-3 %	-3 %	-7 %	1 %	1 %	1 %	5 %	1 %
	BOF	-1 %	1 %	-12 %	-2 %	-9 %	-1 %	-1 %	-4 %	-2 %	-4 %
Clinoptilolite	TotN	17 %	13 %	17 %	3 %	2 %	2 %	-1 %	0 %	-1 %	7 %
	TOC	17 %	17 %	13 %	5 %	5 %	1 %	1 %	1 %	5 %	9 %
	BOF	16 %	11 %	4 %	1 %	-1 %	-7 %	-1 %	-7 %	1 %	-1 %
Aktivert glass + Clinoptilolite	TotN	3 %	12 %	10 %	3 %	-3 %	3 %	5 %	3 %	8 %	17 %
	TOC	5 %	13 %	9 %	5 %	-3 %	1 %	5 %	5 %	13 %	13 %
	BOF	4 %	14 %	-1 %	6 %	-17 %	-4 %	3 %	1 %	8 %	4 %

*temperaturen justert til 20 °C

Aktivt kull var det eneste filtermaterialet som viste en god renseeffekt på vannet med betain, men effekten var kortvarig. Løsningen som ble ført gjennom kolonnen med aktivt kull viste reduksjon både i innhold av TotN, TOC og BOF de første ukene. Effekten var spesielt tydelig etter 1 uke da innholdet av disse parameterne var redusert med mellom 70 og 80 %, sammenliknet med referanseprøven. Etter den første uka, avtok renseeffekten av aktivt kull og etter rundt 6 uker var innholdet av TotN, TOC og BOF i vannet som var ført gjennom det aktive kullet omtrent likt som i referanseprøven. Aktivt karbon har en stor overflate som kan binde til seg stoffer, men etter hvert som adsorpsjonssetene på karbonet blir mettet, vil effekten avta (Rattier et al., 2012). Det er mulig at renseeffekten karbon avtok etter rundt 6 uker fordi det aktive karbonet ble mettet.

Effekten av de andre filtermaterialene var forholdsvis lav. Clinoptilolite ga mellom 4 og 17 % reduksjon i innholdet av TotN, TOC og BOF i uke 1 til 4 av forsøket, men deretter avtok effekten. Clinoptilolite i kombinasjon med aktivert glass ga også noe reduksjon i innholdet av TotN og TOC de første ukene av forsøket. Aktivert glass alene og aktivert glass i kombinasjon med mangandioksid ga liten eller ingen renseeffekt, som tydet på at clinoptilolite, og ikke aktivert glass, bidro til renseeffekten som ble observert for kombinasjonen av clinoptilolite og aktivert glass. Clinoptilolite er en naturlig zeolitt. Zeolitt er mineraler av aluminiumsilikater med et stort antall porer som inneholder utbyttbare ioner, som natrium, kalium eller kalsium (Kraljević Pavelić et al., 2018). Renseeffekten til clinoptilolite på vannet med betain kan mulig forklares med at betain bant seg til mineralet. Kraft og Roseth (1996) gjennomførte laborieforsøk med sand, leca (lightweight expanded clay aggregate) og zeolitt for rensing av vann med avisingsmidlene propylenglykol og kaliumacetat. De fant at zeolitt og grovsand ga best renseeffekt, og glykol og acetat i konsentrasjonsområdet 0,1-1 g/l ble effektivt brutt ned i disse filtermaterialene. Pressl et al. (2019) undersøkte nedbrytning av kaliumacetat og urea i blandinger av jord, zeolitt og perlitt, og konkluderte med at disse filtermaterialene reduserte innholdet av TOC i prøvene mellom 76 og 98 %. Perlitt er en vulkansk glassbergart av silisiumdioksid, aluminiumoksid og andre oksider. Perlitt var ikke blant filtermaterialene som ble undersøkt i kolonneforsøkene av FFI, men kvartssand bestående av silisiumdioksid ble undersøkt. Kwartssand, og kvartssand i kombinasjon med mangandioksid ga en lav renseeffekt de første ukene, hovedsakelig for TOC som ble redusert med rundt 6-8 %. Kalsiumkarbonat og stedege jord fra Evenes ga generelt ingen renseeffekt.

Nedbrytning av organisk materiale i filtermaterialer er avhengig av at det dannes en biofilm på filtermaterialene. Alle filtermaterialene var tilsatt stedege jord fra Evenes for å gi grunnlag for dannelse av en biofilm. Det ble observert biofilm på overflaten av filtermaterialene i alle kolonnene da filtermaterialene ble tatt ut etter 15 uker. Dette var spesielt tydelig på overflaten av kolonnene som inneholdt clinoptilolite og clinoptilolite i kombinasjon med aktivert glass, som vist i Figur 3.12. Bilder av de øvrige filtermaterialene og blandingene av filtermaterialer etter de ble tatt ut av kolonnene er vist i Vedlegg D.



Clinoptilolite



Clinoptilolite og aktivert glass

Figur 3.12 Biofilm på overflaten av kolonnene med clinoptilolite og clinoptilolite i kombinasjon med aktivert glass.

Det kan være flere årsaker til at nedbrytning av betain i filtermaterialene tilsynelatende ikke fant sted. Finkornet filtermateriale har en stor overflate og stort potensial for dannelse av biofilm, men filtermaterialet kan også tettes av biofilmen og medføre anaerobe forhold. Anaerob nedbrytning foregår svært sakte ved lav temperatur (Kraft og Roseth, 1996). Mikroorganismer i biofilm trenger tilgang på karbon, nitrogen og fosfor (Kraft, 2000). Betain er en kilde til både karbon og nitrogen, men det er uklart i hvilket grad mikroorganismene utnyttet disse om betain ikke ble brutt ned. Tilgangen på fosfor kan også ha vært begrenset. Det er ikke kjent at Kraft og Roseth (1996) eller Pressl et al. (2019) tilførte næringsstoffer utover avisingsmidlene i sine forsøk.

Ved lave temperaturer er tilgjengeligheten på næringsstoffer en nøkkelfaktor for nedbrytning av organisk materiale av mikroorganismer (Pressl et al., 2019). Økning i temperaturen i uke 2 og 13 av forsøket så ut til å ha en svak positiv effekt på reduksjonen i TotN, TOC og BOF for enkelte av filtermaterialene, som for eksempel kvartssand og aktivert glass, alene og i kombinasjon med andre filtermaterialer.

Betain kan brytes ned under anaerobe betingelser. Thalasso et al. (1999) analyserte anaerob nedbrytning av betain i slam, og brukte ammoniakk, betain og metan som testparametere. Konsentrasjonen av betain i slammet avtok gjennom testperioden, mens konsentrasjonen av ammoniakk og metan økte. Det lyktes ikke FFI å finne et laboratorium som kunne analysere innhold av betain i vannprøvene. Analyse av TotN omfatter både uorganisk og organisk nitrogen, og ammoniakk i prøvene. Det forholdsvis stabile innholdet av nitrogen i prøvene gjennom forsøksperioden tyder på at betain ikke ble brutt ned i kolonnene.

Konsentrasjonen av betain i det kunstige regnvannet var 5 g/l, høyere enn konsentrasjonen av glykol og acetat (0,1-1 g/l) som ble effektivt brutt ned i kolonneforsøkene til Kraft og Roseth (1996). Konsentrasjonen av TOC i vannet med betain (2500 mg/l) var generelt høyere enn konsentrasjonene av TOC (<1000 mg/l) i vannet med urea og acetat som ble effektivt renses i forsøkene til Pressl et al. (2019). Kolonnene i forsøkene til Kraft og Roseth (1996) og Pressl et al. (2019) var betydelig større (>90 cm lange) enn kolonnene brukt i forsøkene ved FFI. Forholdsvis høy konsentrasjon av betain og størrelsen på kolonnene kan ha hatt betydning for nedbrytningen.

4 Oppsummering og konklusjon

Betainbaserte baneavisingmidler kan være et alternativ til de tradisjonelle baneavisingmidlene formiat og urea. Betain er ikke like korrosivt som formiat, og utslipp av betain innebærer en lavere miljøbelastning enn utslipp av urea. Karakterisering av de betainbaserte avisingmidlene Betafrost L Plus, Betafrost G og Nutristim viste at de hadde lik ledningsevne som urea, og betydelig lavere ledningsevne enn det formiatbaserte avisingmiddelet Aviform L50/Aviform S-Solid.

Laboratorietester av issmeltingsraten og -kapasiteten til de flytende avisingmidlene Betafrost L Plus, Aviform L50 og vannfortynnet urea laget ved Ørland flystasjon ved -2, -4 og -6 °C viste at Aviform L50 ga best smelteeffekt ved alle temperaturene, mens Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland viste omtrent like god smelteeffekt. For alle avisingmidlene avtok issmeltingsraten og -kapasiteten med avtagende temperatur. Ved de lavest temperaturene, spesielt -6 °C, var det en tendens til at issmeltingsraten avtok med tiden. Resultatene indikerte at smeltevann kan fryse på igjen. Dette illustrerer at det er viktig å fjerne smeltevann fra rullebanen før det fryser på igjen.

For å spare transportkostnader og behov for lagringsplass, kan det lages løsninger av flytende avisingmiddel direkte ved flyplasser ved å blande avisingmiddel i fast form med vann. En blanding (ca. 50 vekt%) av Nutristim og vann laget i laboratoriet viste omtrent like god smelteeffekt som produktet Betafrost L Plus, mens en blanding (ca. 50 vekt%) av Betafrost G og vann viste dårligere smelteeffekt enn Betafrost L Plus. Blandingen av Betafrost G viste generelt dårligst smelteeffekt av alle de undersøkte avisingmidlene. Løsningen av vannfortynnet urea laget ved Ørland flystasjon viste dårligere smelteeffekt enn en blanding (ca. 50 vekt%) av urea granulat og vann laget i laboratoriet. Forskjeller i konsentrasjonen av avisingmiddel i blandingene kan være en årsak til de ulike resultatene. Ledningsevnen og pH i blandingene indikerte også at det var noen forskjeller mellom blandingene.

Dersom løsninger av avisingmiddelet lages direkte ved flyplassen, kan konsentrasjonen av avisingmiddel i løsningen tilpasses slik at smelteeffekten blir best mulig. Måling av issmeltingsraten og -kapasitet for løsninger med ulike konsentrasjoner av Betafrost G, Nutristim og urea granulat viste at smelteeffekten generelt økte med økende konsentrasjon avisingmiddel. For Nutristim, ga blandingene med ca. 43 og 50 vekt% Nutristim omtrent like god smelteeffekt, og like god smelteeffekt som Betafrost L Plus. Smelteeffekten kan også økes ved å øke mengden avisingmiddel som påføres isen. Aviform L50 og Betafrost L Plus smeltet opptil 50 % mer is når det ble påført dobbelt så mye avisingmiddel. Generelt viste avisingmidlene i fast form lavere smeltekapasitet og fungerte saktere enn avisingmidlene i flytende form. Aviform S viste best issmeltingsrate og -kapasitet av avisingmidlene i fast form. Nutristim smeltet isen raskere enn urea og Betafrost G, som forklares med økt overflateareal av pulveret Nutristim sammenliknet med Betafrost G og urea som foreligger som større granulat.

For å kunne benytte betain som baneavisingmiddel, vil det i mange tilfeller være nødvendig å samle opp eller rense avrenningsvannet fordi betain krever forholdsvis mye oksygen ved

nedbrytning, og i tillegg inneholder nitrogen. Forsøk med å infiltrere avrenningsvann med betain gjennom jord fra Evenes lufthavn, og filtermaterialene aktivt kull, clinoptilolite, aktivert glassfiltermedium, kalsiumkarbonat, kvartssand, mangandioksid og kombinasjoner av disse filtermaterialene, viste at aktivt kull reduserte innholdet av totalt nitrogen, totalt organisk karbon og biokjemisk oksygenforbruk i vannet effektivt i noen uker, men deretter avtok renseseffekten. Clinoptilolite og kvartssand ga også en lav renseseffekt de første ukene, men effekten var kortvarig. Kalsiumkarbonat, aktivert glassfiltermedium og jord fra Evenes viste generelt ingen renseseffekt på vannet med betain.

Denne studien har vist at betainbaserte baneavisingmidler kan være et aktuelt avisningsmiddel å benytte på rullebaner. Smelteeffekten til de betainbaserte baneavisingmidlene var dårligere enn for det formiatbaserte baneavisingmiddelet Aviform, men like god som urea, som har blitt benyttet som avisningsmiddel på flyplasser i stor grad tidligere. Laboratorietester gir en indikasjon på smelteeffekten til avisningsmidler, men resultatene er ikke nødvendigvis direkte relevante for realistiske forhold. Storskala-tester av betainbaserte avisningsmidler på rullebaner vil gi en bedre indikasjon på om slike avisningsmidler fungerer godt under reelle betingelser. Dersom det skal lages blandinger av avisningsmiddel med betain anbefales det å benytte Nutristim da det løses lettere i vann og ga bedre smelteeffekt en blandinger med Betafrost G for like konsentrasjoner av avisningsmiddel. Fast form av Nutristim smeltet også is mer effektivt enn fast form av Betafrost G. Infiltrasjon av vann med betain gjennom filtermaterialene som ble undersøkt i denne studien viste ikke god nok renseseffekt, og ved bytte til betain bør andre renseløsninger for avrenningsvannet utredes nærmere.

Referanser

- Addcon 2012. Sikkerhetsdatablad Aviform L50.
- Addcon 2015. Sikkerhetsdatablad Aviform S-Solid.
- Addcon. 2019. *Aviform L50* [Online]. Tilgjengelig: <https://www.addcon.com/index.php/en/de-icing/aviform/aviform-l50> [Lest: 22.01.20].
- Alatypö, V. & Jutila, K. 2010a. Betafrost - A natural de-icing agent. *Finnish Road & Traffic 2009-2010*.
- Alatypö, V. & Jutila, K. 2010b. Efficiency of runway de-icing chemicals in practice. Paper presented at XIII International Winter Road Congress, Feb. 7-11th, Quebec City, Canada: WSP Finland Ltd.
- Avinor 2019. Environmental report 2019. Avinor Oslo Airport.
- Baker, J. R., Milke, M. W. & Mihelcic, J. R. 1999. Relationship between chemical and theoretical oxygen demand for specific classes of organic chemicals. *Water Research*, 33, 327-334.
- Chappelow, C. C., McElroy, A. D., Blackburn, R. R., Darwin, D., Noyelles, F. G. d. & Locke, C. E. 1992. *Handbook of Test Methods for Evaluating Chemical Deicers*, Washington, DC, Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Corsi, S. R., Booth, N. L. & Hall, D. W. 2001. Aircraft and runway deicers at General Mitchell International Airport, Milwaukee, Wisconsin, USA. 1. Biochemical oxygen demand and dissolved oxygen in receiving streams. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 20, 1474-1482.
- Craig, S. A. 2004. Betaine in human nutrition. *The American journal of clinical nutrition*, 80, 539-549.
- Danilov, V., Frolova, E. & Kondakov, D. 2018. Phase equilibria in the sodium-acetate–sodium-formate–water system at temperatures of from 0 to –22° C and the anti-icing properties of compositions based on these salts. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 52, 859-861.
- Dupont Genencor 2017. Experimental Betafrost L Plus.
- Forsvarsdepartementet 2018. Konseptutvalgutredning Evenes flystasjon (ugradert versjon). Fremskutt operasjonsbase for kampfly og hovedbase for maritime patruljefly.
- Freeman, A. I., Surridge, B. W., Matthews, M., Stewart, M. & Haygarth, P. M. 2015. Understanding and managing de-icer contamination of airport surface waters: A synthesis and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 3, 46-62.
- French, H., Eggestad, H.-O., Øvstedal, J. & Jahren, P.-E. 2010. Climate conditions and consequences for de-icing operations as exemplified by the situation on a motorway and airport at Gardermoen, Norway. *Hydrology Research*, 41, 269-281.
- Frolova, E., Kondakov, D., Nikolaev, V., Tin'gaev, O. & Danilov, V. 2015. Phase equilibria in the sodium formate–potassium formate–water system below 0° c and the anti-icing properties of salt compositions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 49, 719-720.
- Fylkesmannen i Nordland 2019. Endret tillatelse etter forurensningsloven til utslipp av avisingskjemikalier for fly og rullebane, Harstad/Narvik lufthavn Evenes, Evenes kommune.
- Gerbino-Bevins, B., Tuan, C. Y. & Mattison, M. 2012. Evaluation of ice-melting capacities of deicing chemicals. *Journal of Testing and Evaluation*, 40, 952-960.

-
- Huttunen-Saarivirta, E., Kuokkala, V.-T., Kokkonen, J. & Paajanen, H. 2011. Corrosion effects of runway de-icing chemicals on aircraft alloys and coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 126, 138-151.
- Johnsen, I. V. & Aaneby, J. 2021. Alternative baneavisingmidler og -metoder - en litteraturstudie. *FFI-rapport 21/00552*.
- Kirkhorn, S., Karsrud, T. E. & Prydz, P. 2020. Forsvarssektorens miljø- og klimaregnskap for 2019. FFI-report 20/01849.
- Klart Vann AS. 2020. *Filtermedia* [Online]. Tilgjengelig: <https://www.klart-vann.no> [Lest: 20.10.20].
- Kolb, M., Bahadir, M. & Teichgräber, B. 2017. Determination of chemical oxygen demand (COD) using an alternative wet chemical method free of mercury and dichromate. *Water research*, 122, 645-654.
- Kraft, P. & Roseth, R. 1996. Overvann med avisingsmidler på Gardermoen - laboratorieforsøk som grunnlag for prosjektering av jordbasert renseanlegg.
- Kraft, P. I. 2000. Jordbaserte renseanlegg for overvann fra flyplasser - fiasko eller suksess? *Innlegg på fagtreff 27. mars 2000*.
- Kraljević Pavelić, S., Simović Medica, J., Gumbarević, D., Filošević, A., Pržulj, N. & Pavelić, K. 2018. Critical review on zeolite clinoptilolite safety and medical applications in vivo. *Frontiers in Pharmacology*, 9, 1350.
- LNT Solutions 2021. Gen3 High Performance Liquid Runway De-icer. www.lntsolutions.com.
- Lysbakken, K. R. 2019. Salting av veger. Kurs i drift og vedlikehold for ledere av driftskontrakter. Statens vegvesen, Vegdirektoratet.
- Muthumani, A., Fay, L., Akin, M., Wang, S., 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. Ice melting performance for ice-control chemicals. 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2005. Citeseer.
- Pressl, A., Pucher, B., Scharf, B. & Langergraber, G. 2019. Treatment of de-icing contaminated surface water runoff along an airport runway using in-situ soil enriched with structural filter materials. *Science of The Total Environment*, 660, 321-328.
- PubChem. 2021. *National Library of Medicine (NLM), National Center for Biotechnology Information (NCBI). Compound summary* [Online]. Tilgjengelig: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> [Lest: 10.02.21].
- Rattier, M., Reungoat, J., Gernjak, W. & Keller, J. 2012. *Organic micropollutant removal by biological activated carbon filtration: a review*, Urban Water Security Research Alliance.
- Saunes, H., Honne, L. M. & Trandem, J. 2019. Evenes Flystasjon Miljøriskovurdering av avisningskemikalier – tilleggsbelastning ved Forsvarets tilstedeværelse. *Forsvarsbygg rapport 250/2019/KFB*.
- Schweigert, N. & Poissonier, S. 2016. Charactersization of runway deicers. Study report. French civil aviation authority. Civil aviation technical center.
- Shi, X. 2008. Impact of airport pavement deicing products on aircraft and airfield infrastructure. A synthesis of airport practice.: Transportation research board.
- Thalasso, F., van der Burgt, J., O'Flaherty, V. & Colleran, E. 1999. Large-scale anaerobic degradation of betaine. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 74, 1176-1182.

-
- Wåhlin, J., Fjærestad, J. S., Thomsen, K. & Klein-Paste, A. Thermodynamics of deicing chemicals. 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2017.
- Yuan, L., Clevers, S., Couvrat, N., Cartigny, Y., Dupray, V. & Coquerel, G. 2016. Precise Urea/Water Eutectic Composition by Temperature-Resolved Second Harmonic Generation. *Chemical Engineering & Technology*, 39, 1326-1332.

Vedlegg

A Kunstig regnvann

Konsentrasjonen av salter i det kunstige regnvannet som ble benyttet i avisingstestene og infiltrasjonsforsøket er vist i Tabell A.1.

Tabell A.1 Konsentrasjon av salter i kunstig regnvann som ble benyttet til avisingstester og infiltrasjonsforsøk.

Salt	Konsentrasjon (mg/L)
Kaliumsulfat, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1,44
Ammoniumsulfat, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_2$	1,50
Ammoniumklorid, NH_4Cl	1,92
Natriumnitrat, NaNO_3	1,51
Natriumacetat, CH_3COONa	0,32

B Resultater laboratorietester av smelteegenskaper

B.1 Smeltetester -2 °C

Volumet smeltevann som ble samlet opp i smeltetestene med Aviform L50, Betafrost L Plus, løsning av Betafrost G (33 vekt%) og Nutristim (33 vekt%) laget i laboratoriet, vannfortynnet urea fra Ørland flystasjon og løsning av urea granulat (33 vekt%) laget i laboratoriet ved -2 °C er vist i Tabell B.1, Tabell B.2 og Tabell B.3. Alle testene ble utført med 5 ml avisingsmiddel i flytende form. Resultatene i tabellene viser volumet smeltevann som ble målt opp, inkl. volumet av avisingsmiddelet som ble tilført skålene.

Tabell B.1 Forsøk 1-3, 18.09.20, -2 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform L50	Betafrost L Plus	Betafrost G (33 %)
1	10	18	14	8
	20	24	18	11
	30	30	21	12
	45	36	25	13
	60	40	26	15
2	10	18	14	8
	20	27	19	10
	30	34	24	11
	45	44	30	12
	60	55	39	19
	Ca. 150	80	66	54
3	10	21	16	14,5
	20	35	24	19
	30	41	28	24
	45	49	32	28
	60	57	37	29

Tabell B.2 Forsøk 4-6, 28.09.20, -2 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Betafrost L Plus	Betafrost G (33 %)	Nutristim (33 %)
4	10	14	11	11
	20	20	17	16
	30	26	24	22
	45	35	33	29
	60	39	40	35
	Ca. 150	44	46	45
5	10	12	11	12
	20	21	17	18,5
	30	25	19	25
	45	27	23,5	25
	60	32	32	35
6	10	18	12	8
	20	41	20	13
	30	53	26	14
	45	63	30	16
	60	75	32	20

Tabell B.3 Forsøk 7-9, 29.09.20, -2 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform L50	Urea fra Ørland	Urea (33 %)
7	10	18,5	13	14
	20	26	20	23
	30	39	29	31
	45	42	38	41
	60	49	45	48
8	10	30	18	10
	20	47	27	16
	30	57	36	16
	45	64	42,5	18
	60	71	60	23
9	10	22	9	11
	20	28	18	22
	30	39	29	18
	45	53	23	31
	60	45	39	41

B.2 Smeltetester -4 °C

Volumet smeltevann som ble samlet opp i smeltetestene med Aviform L50, Betafrost L Plus, løsning av Betafrost G (33 vekt%) og Nutristim (33 vekt%) laget i laboratoriet, vannfortynnet urea fra Ørland flystasjon og løsning av urea granulater (33 vekt%) laget i laboratoriet ved -4 °C er vist i Tabell B.4 og Tabell B.5. Resultatene for Aviform S (33 og 50 vekt%) er vist i Tabell B.6 og Tabell B.7.

Alle testene ble utført med 5 ml avisingsmiddel i flytende form. Resultatene i tabellene viser volumet smeltevann som ble målt opp, inkl. volumet av avisingsmiddelet som ble tilført skålene.

Tabell B.4 Forsøk 18-20, 01.19.20, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform L50	Betafrost L Plus	Betafrost G (33 %)
18	10	15	11	9
	20	20	18	8
	30	27	20	13
	45	27	25	12
	60	30	30	1
19	10	14	11	6
	20	20	16	10
	30	26	12	11
	45	33	23	2
	60	31	27	6
20	10	15	12	11
	20	35	15	14
	30	36	22	2
	45	27	30	9
	60	44	17	15

Tabell B.5 Forsøk 21-23, 01.10.20, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Urea fra Ørland	Urea (33 %)	Nutristim (33 %)
21	10	12	11	5
	20	11	14	8
	30	14	10	10
	45	15	11	2
	60	9	13	3
22	10	10	7	7
	20	12	10	9
	30	15	12	3
	45	10	13	5
	60	15	6	8
23	10	9	6	8
	20	16	11	7
	30	12	15	7
	45	17	2	10
	60	20	10	2

Tabell B.6 Forsøk 36, 15.01.21, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform S (33 %)	Aviform S (33 %)	Aviform S (33 %)
36	10	15	15	14
	20	22	23	18
	30	26	27	23
	45	20	29	28
	60	25	31	28

Tabell B.7 Forsøk 37, 26.02.21, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform S (50 %)	Aviform S (50 %)	Aviform S (50 %)
37	10	20	20	19
	20	29	30	26
	30	40	38	36
	45	49	49	49
	60	57	57	51

B.2.1 Ulike konsentrasjoner

Volumet smeltevann som ble samlet opp i smeltetestene med ulike konsentrasjoner (vekt%) av Betafrost G, Nutristim og urea granulat ved -4 °C er vist i Tabell B.8, Tabell B.9 og Tabell B.10. Alle testene ble utført med 5 ml avisingsmiddel i flytende form. Resultatene i tabellene viser volumet smeltevann som ble målt opp, inkl. volumet av avisingsmiddelet som ble tilført skålene.

Tabell B.8 Forsøk 24-26, 13.10.20, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Betafrost G (20 %)	Betafrost G (50 %)	Betafrost G (67 %)
24	10	3	11	13
	20	5	14	13
	30	7	10	18
	45	2	12	12
	60	2	16	12
25	10	3	10	10
	20	5	9	15
	30	1	12	18
	45	1	15	7
	60	3	3	16
26	10	5	7	12
	20	1	11	17
	30	4,5	15	14,5
	45	5	2	18
	60	1	5	21

Tabell B.9 Forsøk 27-29, 14.10.20, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)			
		Urea G (20 %)	Urea G (43 %)	Urea G (50 %)	Betafrost G (43 %)
27	10	3	9	14	12
	20	6	17,5	19	10
	30	11	23	13	14
	45	13	5	19	17
	60	1	5	26	17
28	10	6	11	13	7
	20	8	17	13	12
	30	11	8,5	17	20
	45	1	16	20	17
	60	1	20	26	1
29	10	6	13	9	9
	20	10	7	14	13
	30	1	14,5	18,5	15
	45	1	19	22	2
	60	5	22	5	4

Tabell B.10 Forsøk 33-35, 16.11.20, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Nutristim (20 %)	Nutristim (43 %)	Nutristim (50 %)
33	10	5	10	10
	20	7	15	13
	30	12	22	19
	45	7	25	26
	60	15	33	25
34	10	5,5	19	11
	20	12	24	20
	30	15	36	29
	45	21	42	25
	60	27	26	31
35	10	3	6	8
	20	6	10	11
	30	7	16	14
	45	9	13	20
	60	5	19	25

B.2.2 Økt dosering avisingsmiddel

Volumet smeltevann som ble samlet opp i smeltetestene der 10 ml Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland flystasjon ble tilsatt skålene er vist i Tabell B.11. Testene ble utført ved -4 °C. Tabellen viser volumet smeltevann som ble målt opp, inkl. volumet av avisingsmiddelet som ble tilført skålene.

Tabell B.11 Forsøk 30-32, 14.10.20, -4 °C, 10 ml avisingsmiddel tilsatt hver skål.

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform L50	Betafrost L Plus	Urea fra Ørland
30	10	24	21	22
	20	37	32	22
	30	46	30	28
	45	50	37	35
	60	57	42	25
31	10	32	22	18
	20	42	26	2
	30	57	30	33
	45	48	35	12
	60	54	30	25
32	10	23	20	17
	20	36	32	15
	30	50	30	24
	45	50	39	30
	60	54	46	12

B.2.3 Granulat

Volumet smeltevann som ble samlet opp i smeltetestene der avisingsmiddel i form av fast urea granulat, Betafrost G, Nutristim og Aviform S er vist i Tabell B.12 og Tabell B.13. Det ble tilsatt 2,5 g granulat til hver skål. Testene ble utført ved -4 °C. Tabellen viser volumet smeltevann som ble målt opp.

Tabell B.12 Forsøk 33-35, 18.11.20, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Urea G	Betafrost G	Nutristim
33	10	4	1	6
	20	4	1	10
	30	8	3	9
	45	9	6	10
	60	3	7	9
34	10	1	0	6
	20	2	4	9
	30	6	5	10
	45	8	8	9
	60	8	8	11
35	10	0	3	5
	20	2	6	7
	30	4	8	9
	45	8	7	12
	60	13	8	11

Tabell B.13 Forsøk 37, 14.01.20, -4 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform S	Aviform S	Aviform S
37	10	1,5	2	2
	20	4	4	4
	30	7	6	7
	45	15	14	16
	60	26	20	21

B.3 Smeltetester -6 °C

Volumet smeltevann som ble samlet opp i smeltetestene med Aviform L50, Betafrost L Plus, løsning av Betafrost G (33 vekt%) og Nutristim (33 vekt%) laget i laboratoriet, vannfortynnet urea fra Ørland flystasjon og løsning av urea granulat (33 vekt%) laget i laboratoriet ved -6 °C er vist i Tabell B.14, Tabell B.15 og Tabell B.16. Alle testene ble utført med 5 ml avisingsmiddel i flytende form. Resultatene i tabellene viser volumet smeltevann som ble målt opp, inkl. volumet av avisingsmiddelet som ble tilført skålene.

Tabell B.14 Forsøk 11-13, 29.30.09.20, -6 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform L50	Urea fra Ørland	Urea G (33 %)
11	10	10	8	8
	20	15	10	12
	30	15	11	12
	45	22	13	12
	60	21	14	18
12	10	15	8	5
	20	18	7	7
	30	22	5	9
	45	22	5	1
	60	3	9	1
13	10	11	8	7
	20	20	11	2
	30	26	6	7
	45	15	6	9
	60	10	7	10

Tabell B.15 Forsøk 14-15, 30.09.20, -6 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Aviform L50	Betafrost L Plus	Betafrost G (33 %)
14	10	11	10	5
	20	19	11	7
	30	26	15	0
	45	7,5	18	0
	60	17	2	7
15	10	20	11	5
	20	13	17	6
	30	25	4	10
	45	30	4	0
	60	7	18	0

Tabell B.16 Forsøk 16-18, 01.10.20, -6 °C

Forsøk	Tid (min)	Smeltevann (ml)		
		Betafrost L Plus	Betafrost G (33 %)	Nutristim (33 %)
16	10	10	5	6
	20	8	6	1
	30	11	10	6
	45	12	1	3
	60	15	1	1
17	10	11	7	6
	20	9,5	3	12
	30	1	4	16
	45	1	1	7
	60	1	2	1
18	10	8	6	7
	20	10	7	1
	30	17	1	5
	45	4	6	7
	60	5	4	1

B.4 Oppsummerte resultater

Smelteeffekt for alle avisingsmidlene vist som gjennomsnittlig volum smeltevann (fratrasket volumet avisingsmiddel tilført skålene) samlet opp ved ulike tidspunkt i løpet av smeltetestene er vist i dette kapitlet.

Resultatene for avisingsmidlene Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland ved -2, -4 og -6 °C der det ble tilsatt 5 ml avisingsmiddel er vist i Tabell B.17 til Tabell B.19. Resultatene for de samme avisingsmidlene ved -4 °C der det ble tilsatt 10 ml avisingsmiddel er vist i Tabell B.20.

Tabell B.17 Smelteeffekt for avisingsmidlene Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland ved -2 °C. Resultatene er gjennomsnitt ± standardavvik.

Tid (min)	Smeltevann (ml)		
	Aviform L50	Betafrost L Plus	Urea L
10	16 ± 5	9 ± 4	8 ± 5
20	26 ± 9	19 ± 11	17 ± 5
30	35 ± 9	25 ± 14	26 ± 4
45	43 ± 10	31 ± 17	30 ± 10
60	48 ± 11	37 ± 21	43 ± 11
150	80 ± 0	53 ± 29	

Tabell B.18 Smelteeffekt for avisingsmidlene Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland ved -4 °C. Resultatene er gjennomsnitt ± standardavvik.

Tid (min)	Smeltevann (ml)		
	Aviform L50	Betafrost L Plus	Urea L
10	16 ± 5	9 ± 4	8 ± 5
20	26 ± 9	19 ± 11	17 ± 5
30	35 ± 9	25 ± 14	26 ± 4
45	43 ± 10	31 ± 17	30 ± 10
60	48 ± 11	37 ± 21	43 ± 11
150	80 ± 0	53 ± 29	-

Tabell B.19 Smelteeffekt for avisingsmidlene Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland ved -6 °C. Resultatene er gjennomsnitt ± standardavvik.

Tid (min)	Smeltevann (ml)		
	Aviform L50	Betafrost L Plus	Urea L
10	8 ± 4	5 ± 1	3 ± 0
20	12 ± 3	6 ± 3	4 ± 2
30	18 ± 5	5 ± 7	2 ± 3
45	14 ± 8	3 ± 7	3 ± 4
60	7 ± 7	3 ± 8	5 ± 4

Tabell B.20 Smelteeffekt for avisingsmidlene Aviform L50, Betafrost L Plus og vannfortynnet urea fra Ørland ved -4 °C for 10 ml avisingsmiddel tilsatt. Resultatene er gjennomsnitt ± standardavvik.

Tid (min)	Smeltevann (ml)		
	Aviform L50	Betafrost L Plus	Urea L
10	16 ± 5	11 ± 1	9 ± 3
20	28 ± 3	20 ± 3	3 ± 10
30	41 ± 6	20 ± 0	18 ± 5
45	39 ± 1	27 ± 2	16 ± 12
60	45 ± 2	29 ± 8	11 ± 8

Resultatene for ulike konsentrasjoner av avisingsmidlene Betafrost G, Nutristim, urea granulat og Aviform S ved -4 °C er vist i Tabell B.21 til Tabell B.24.

Tabell B.21 Smelteeffekt for løsninger med Betafrost G med ulike konsentrasjoner vist som gjennomsnitt ± standardavvik. Testen ble utført ved -4 °C.

Tid (min)	Smeltevann (ml)				
	Løsning med Betafrost G				
	20 vekt%	33 vekt%	43 vekt%	50 vekt%	67 vekt%
10	-1 ± 1	4 ± 3	4 ± 3	4 ± 2	7 ± 2
20	-1 ± 2	6 ± 3	7 ± 2	6 ± 3	10 ± 2
30	-1 ± 3	4 ± 6	11 ± 3	7 ± 3	12 ± 2
45	-2 ± 2	3 ± 5	7 ± 9	5 ± 7	7 ± 6
60	-2 ± 1	2 ± 7	2 ± 9	3 ± 7	11 ± 5

Tabell B.22 Smelteeffekt for løsninger med Nutristim med ulike konsentrasjoner vist som gjennomsnitt \pm standardavvik. Testen ble utført ved -4 °C.

Tid (min)	Smeltevann (ml)			
	Løsning med Nutristim			
	20 vekt%	33 vekt%	43 vekt%	50 vekt%
10	-1 ± 1	2 ± 2	7 ± 7	5 ± 2
20	3 ± 3	3 ± 1	11 ± 7	10 ± 5
30	6 ± 4	2 ± 4	20 ± 10	16 ± 8
45	7 ± 8	1 ± 4	22 ± 15	19 ± 3
60	11 ± 11	-1 ± 3	21 ± 7	22 ± 3

Tabell B.23 Smelteeffekt for løsninger med urea granulat med ulike konsentrasjoner vist som gjennomsnitt \pm standardavvik. Testen ble utført ved -4 °C.

Tid (min)	Smeltevann (ml)			
	Løsning med urea granulat			
	20 vekt%	33 vekt%	43 vekt%	50 vekt%
10	0 ± 2	3 ± 3	6 ± 2	7 ± 3
20	3 ± 2	7 ± 2	9 ± 6	10 ± 3
30	3 ± 6	7 ± 3	10 ± 7	11 ± 3
45	0 ± 7	4 ± 6	8 ± 7	15 ± 2
60	-3 ± 2	5 ± 4	11 ± 9	14 ± 12

Tabell B.24 Smelteeffekt for løsninger med Aviform S med ulike konsentrasjoner vist som gjennomsnitt \pm standardavvik. Testen ble utført ved -4 °C.

Tid (min)	Smeltevann (ml)	
	Løsning med Aviform S	
	33 vekt%	50 vekt%
10	10 ± 1	15 ± 2
20	16 ± 3	23 ± 3
30	20 ± 2	33 ± 3
45	21 ± 5	44 ± 7
60	23 ± 3	50 ± 7

Resultatene for urea granulat, Nutristim, Betafrost G og Aviform S tilsatt som fast stoff ved -4 °C er vist i Tabell B.25.

Tabell B.25 Smelteeffekt for urea granulat, Nutristim, Betafrost G og Aviform S tilsatt som fast stoff vist som gjennomsnitt ± standardavvik. Testen ble utført ved -4 °C.

Tid (min)	Smeltevann (ml)			
	Urea G	Nutristim	Betafrost G	Aviform S
10	2 ± 2	6 ± 1	1 ± 2	2 ± 0
20	3 ± 1	9 ± 2	4 ± 3	4 ± 0
30	6 ± 2	9 ± 1	5 ± 3	7 ± 1
45	8 ± 1	10 ± 2	7 ± 1	15 ± 1
60	8 ± 5	10 ± 1	8 ± 1	22 ± 3

C Filtermaterialer infiltrasjonsforsøk

Filtermaterielene og blandingene av filtermaterialene som ble tatt ut av kolonnene etter den 15 uker lange forsøksperioden er vist i Figur- C.1. Alle blandingene var tilsatt jord.



Kolonne 1: *Jord*



Kolonne 2: *Aktivt kull*



Kolonne 3: *Kvarts + MnO₂*



Kolonne 4: *Kvartssand*



Kolonne 5: *Aktivert glass*



Kolonne 6: *Aktivert glass + MnO₂*



Kolonne 7: *CaCO₃*

Figur- C.1 *Filtermaterielene og blandingene av filtermaterialer som ble tatt ut av kolonnene etter avslutning av forsøket.*

D Analyseresultater infiltrasjonsforsøk

Analyseresultatene for TotN, TOC, KOF og BOF for prøvene fra infiltrasjonsforsøkene er gitt i Tabell D.1.

Tabell D.1 Analyseresultater infiltrasjonsforsøk.

Uke	Dato	Kolonne	Beskrivelse	Prøvenr.	Konsentrasjon (mg/l)			
					TotN	TOC	KOF	BOF
1	30.07.20	-	Referanse	20-483	600	2600	310	5900
		1	Jord	20-474	610	2600	260	6500
		2	Aktivt kull	20-475	160	620	53	1500
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-476	610	2400	150	6400
		4	Kvartssand	20-477	610	2400	270	6300
		5	Aktivert glass	20-478	630	2500	270	6500
		6	Aktivert glass + MnO ₂	20-479	610	2600	150	6500
		7	CaCO ₃	20-480	610	2500	150	6100
		8	Clinoptilolite	20-481	510	2100	310	5100
		9	Aktivt glass + clinoptilolite	20-482	590	2400	290	5800
2**	05.08.20	-	Referanse	20-493	600	2600	200	5800
		1	Jord	20-484	590	2400	230	6100
		2	Aktivt kull	20-485	530	2100	260	5400
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-486	570	2100	220	5700
		4	Kvartssand	20-487	590	2200	300	5500
		5	Aktivt glass	20-488	600	2600	190	6200
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-489	590	2600	260	6100
		7	CaCO ₃	20-490	590	2500	180	6000
		8	Clinoptilolite	20-491	530	2100	250	5400
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-492	540	2200	180	5200
4	19.08.20	-	Referanse	20-503	590	2700	330	6500
		1	Jord	20-494	570	2500	300	6700
		2	Aktivt kull	20-495	310	1500	160	3400
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-496	580	2300	260	6200
		4	Kvartssand	20-497	560	2400	230	6100
		5	Aktivt glass	20-498	590	2600	280	6300
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-499	580	2600	230	6500
		7	CaCO ₃	20-500	580	2600	270	6800
		8	Clinoptilolite	20-501	510	2200	280	5800
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-502	550	2300	260	6100

Forts. Tabell D.1 Analyseresultater infiltrasjonsforsøk.

Uke	Dato	Kolonne	Beskrivelse	Prøvenr.	Konsentrasjon (mg/l)			
					TotN	TOC	KOF	BOF
5	26.08.20	-	Referanse	20-513	620	2600	290	5400
		1	Jord	20-504	600	2600	330	6200
		2	Aktivt kull	20-505	410	1500	210	4100
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-506	620	2500	300	6200
		4	Kvartssand	20-507	610	2500	300	5900
		5	Aktivt glass	20-508	610	2600	290	6300
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-509	620	2600	260	6000
		7	CaCO ₃	20-510	620	2600	300	6200
		8	Clinoptilolite	20-511	590	2400	310	6000
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-512	590	2400	280	5700
6	02.09.20	-	Referanse	20-523	600	2400	270	5600
		1	Jord	20-514	630	2700	390	6600
		2	Aktivt kull	20-515	550	2200	230	5300
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-516	630	5500*	150	6100
		4	Kvartssand	20-517	650	2600	260	6400
		5	Aktivt glass	20-518	620	2700	300	6900
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-519	640	2600	300	6600
		7	CaCO ₃	20-520	640	2700	280	6600
		8	Clinoptilolite	20-521	600	2400	310	6100
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-522	630	2600	310	7100
7	09.09.20	-	Referanse	20-533	620	2500	280	6300
		1	Jord	20-524	610	2600	370	6800
		2	Aktivt kull	20-525	570	2200	140	5700
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-526	630	2300	140	6000
		4	Kvartssand	20-527	620	5100*	140	6200
		5	Aktivt glass	20-528	630	2600	250	7300
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-529	590	2400	220	6200
		7	CaCO ₃	20-530	640	2500	250	6100
		8	Clinoptilolite	20-531	600	2500	290	6500
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-532	590	2500	230	6300
9	23.09.20	-	Referanse	20-597	620	2400	280	6400
		1	Jord	20-588	590	2400	450	5800
		2	Aktivt kull	20-589	570	2300	230	5800
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-590	600	2400	260	6000
		4	Kvartssand	20-591	600	2400	250	5700
		5	Aktivt glass	20-592	600	2500	240	6700
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-593	600	2500	240	6600
		7	CaCO ₃	20-594	590	2500	280	6100
		8	Clinoptilolite	20-595	620	2500	280	6100
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-596	580	2400	250	5900

Forts. Tabell D.1 Analyseresultater infiltrasjonsforsøk.

Uke	Dato	Kolonne	Beskrivelse	Prøvenr.	Konsentrasjon (mg/l)			
					TotN	TOC	KOF	BOF
11	08.10.20	-	Referanse	20-630	640	2500	280	6600
		1	Jord	20-621	630	2400	490	6100
		2	Aktivt kull	20-622	570	2300	260	6000
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-623	610	2400	240	6000
		4	Kvartssand	20-624	610	2400	240	6200
		5	Aktivt glass	20-625	620	2500	280	6100
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-626	630	2400	280	6700
		7	CaCO ₃	20-627	600	2500	250	6300
		8	Clinoptilolite	20-628	610	2500	290	6500
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-629	590	2400	260	6000
13**	22.10.20	-	Referanse	20-640	590	2400	260	5900
		1	Jord	20-631	590	2300	720	6400
		2	Aktivt kull	20-632	670	2600	260	6700
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-633	590	2200	290	5900
		4	Kvartssand	20-634	590	2300	370	5800
		5	Aktivt glass	20-635	600	2400	210	5500
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-636	600	2300	230	5800
		7	CaCO ₃	20-637	610	2400	250	6200
		8	Clinoptilolite	20-638	620	2400	320	6000
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-639	560	2200	330	5600
15	05.11.20	-	Referanse	20-699	620	2500	170	6600
		1	Jord	20-690	610	2400	620	6000
		2	Aktivt kull	20-691	440	1900	230	5000
		3	Kvartssand+MnO ₂	20-692	610	2400	220	6100
		4	Kvartssand	20-693	600	2400	400	6600
		5	Aktivt glass	20-694	620	2500	280	6500
		6	Aktivt glass + MnO ₂	20-695	660	2400	280	6200
		7	CaCO ₃	20-696	620	2500	330	6300
		8	Clinoptilolite	20-697	570	2300	320	6100
		9	Aktivt glass + Clinoptilolite	20-698	510	2200	290	5800

*utelatt fra beregningene av renseeffekt

**temperaturen økt til 20 °C (fra 4 °C)

About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFIs FORMÅL

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

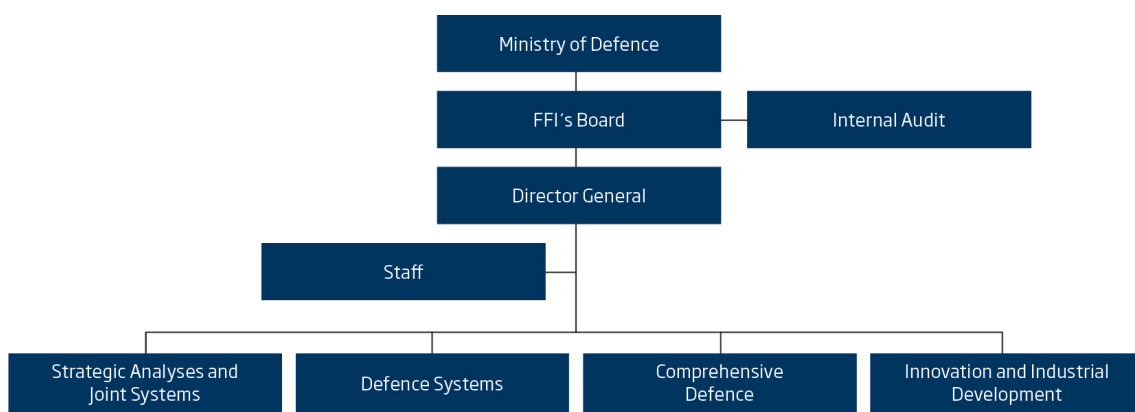
FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

FFI's organisation



Forsvarets forskningsinstitutt
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Instituttveien 20
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00
Telefaks: 63 80 71 15
Epost: ffi@ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
P.O. Box 25
NO-2027 Kjeller

Office address:
Instituttveien 20
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00
Telefax: +47 63 80 71 15
Email: ffi@ffi.no