



Norwegian  
Meteorological  
Institute

**MET**report

No. 20/2015  
ISSN 2387-4201  
Climate

# Varmere og våtere svalbardvintre: konsekvenser for natur og samfunn

Sluttrapport til Svalbards miljøvernfond prosjekt 13/74  
Brage B. Hansen (NTNU), Ketil Isaksen, Leif E. Loe (NMBU), Jan  
E. Haugen, Rasmus Benestad, Jos Milner (Univ. Aberdeen), René  
van der Wal (Univ. Aberdeen), Øystein Varpe (Akvaplan-niva/UNIS)



Foto: Ø. Varpe



SVALBARDS  
MILJØVERN FOND





<b>Title</b> Varmere og våtere svalbardvintre: konsekvenser for natur og samfunn	<b>Date</b> 2015-06-30
<b>Section</b> Model and Climate Analysis	<b>Report no.</b> No. 20/2015
<b>Author(s)</b> Brage B. Hansen (NTNU), Ketil Isaksen, Leif E. Loe (NMBU), Jan E. Haugen, Rasmus Benestad, Jos Milner (Univ. Aberdeen), René van der Wal (Univ. Aberdeen), Øystein Varpe (Akvaplan-niva/UNIS)	<b>Classification</b> <input checked="" type="radio"/> Free <input type="radio"/> Restricted
<b>Client(s)</b> Svalbards miljøvernfond	<b>Client's reference</b> Prosjekt 13/74
<b>Abstract</b> Prosjektet «Vinterregn», et tverrfaglig samarbeidsprosjekt finansiert av Svalbards miljøvernfond, har hatt som mål å dokumentere og predikere endringer i vinterklima på Svalbard samt evaluere noen av konsekvensene for naturmiljø, samfunn og økosystem. Prosjektet baserer seg på et sett av «case studies» og data fra en ekstremværhendelse i 2012. Svalbardvinteren har blitt varmere og mer regnfull. Varmebølger og kraftig regnvær midtvinters kan føre til økt permafrosttemperatur, sørpeskred og bakkeising. Disse endringene i naturmiljøet har negative effekter på både infrastruktur, samfunn og plante- og dyreliv. Beregninger fra nedskalerte klimaframskrivninger tilsier at svalbardvinteren vil bli betraktelig varmere og mer regnfull i løpet av dette århundret, med potensielt store konsekvenser for natur og samfunn.	
<b>Keywords</b> ising, klimaendringer, klimaeffekter, permafrost, Svalbard, vinterregn	

## Abstract

Svalbardvinteren har blitt varmere og mer regnfull, en trend som har forsterket seg det siste tiåret. Prosjektet Vinterregn er et tverrfaglig samarbeidsprosjekt mellom flere norske og internasjonale institusjoner med hovedmål å dokumentere og predikere endringer i svalbardvinteren og evaluere noen av konsekvensene for naturmiljø, samfunn og økosystem. Prosjektet baserer seg på et sett av «case-studies» som sammen gir et innblikk i hvordan mildere og mer regnfullt vintervær, og spesielt ekstremepisoder, kan ramme bredt på tvers av natur og samfunn. Data innsamlet i forbindelse med en ekstremværhendelse midtvinters i 2012 utgjorde foranledningen til prosjektet. Normaltemperaturen ved Svalbard lufthavn ligger i denne perioden på -15 °C. Under den to uker lange varmebølgen i januar-februar 2012 ble det satt rekorder for både temperatur og nedbør, med blant annet 7,8 °C som maksimumstemperatur på Akseløya og 98 mm regn (25 % av normalen for et år) i løpet av ett døgn i Ny-Ålesund. Våre målinger viser at en slik værtype i høy-Arktis kan føre til store endringer i naturmiljøet gjennom økt permafrost- og bakketemperatur, store sørpeskred og dannelse av bakkeis som kan være tykkere enn 15 cm. Både sørpeskred og ising over store områder rammet samfunnet hardt i 2012, blant annet ved at ei gangbru ble ødelagt av skred og at veier og flyplasser ble stengt i lengre perioder. Isinga vanskeliggjorde også ferdsel i terrenget, og tall fra reiselivsnæringen tyder på en nedgang i både turismeaktivitet og hotellovernattinger etter ekstremhendelsen. Kraftig ising kan også påvirke planteetende dyrearter som reinsdyr og rype negativt. Data fra ekstremvinteren 2012 gir en sjelden empirisk støtte for dette, blant annet i form av svært lave fangsttall under den påfølgende rypehøsten og ved at reinsdyrdødeligheten var høy i alle de overvåkede bestandene. Ved hjelp av et felteksperiment som simulerte kraftig regnvær og bakkeising, viser vi også for første gang hvordan ising påvirker planter i høy-Arktis, i dette tilfellet kantlyng. Nediset kantlyng hadde blant annet mindre blomstringsgrad og høyere skuddødelighet enn kontrollplanter sommeren etter eksperimentet. Våre resultater har stor relevans i et framtidig endret klima. En analyse av nedskalerte klimaframskrivninger for Svalbard lufthavn og Ny-Ålesund tilsier at svalbardvinteren med stor sannsynlighet vil bli betraktelig varmere og mer regnfull i løpet av dette

århundret. Enkeltsimuleringer fra de mest moderate scenariene tilsier at «medianvinteren» i 2021-2050 (MPI92b, utslippsscenario MPI92a) og 2071-2100 (MPIB2, utslippsscenario SRES B2) vil kunne ha omtrent samme gjennomsnittstemperaturer i desember-februar som under rekordvinteren 2013-14 (-4,6 °C ved Svalbard lufthavn), sammenlignet med henholdsvis -12 °C (MPI92a, 1981-2010) og -13 °C (MPICN, 1961-1990) i simuleringer av kontrollperiodene. Enkeltsimuleringer basert på andre klimaframskrivninger predikerer at medianvinteren på slutten av århundret vil ha betraktelig høyere gjennomsnittstemperaturer (over 3 °C ved Svalbard lufthavn) og over 150 mm regn i desember-februar i Ny-Ålesund (scenario HADA1c, utslippsscenario SRES A1B), sammenlignet med henholdsvis -12 °C og 8 mm i kontrollperioden (HADCN, 1961-1990). Det aller meste av nedbøren midtvinters vil i så fall komme som regn. Både moderate og mindre moderate framskrivninger peker mot at vi må forvente økt permafrosttemperatur, større skredfare og hyppigere bakkeising (inntil eventuelle terskelverdier blir nådd), med store utfordringer for samfunn og infrastruktur og endringer i plante- og dyrelivet på Svalbard.

The winter climate in Svalbard is increasingly warmer and rainier. Project Vinterregn is an interdisciplinary collaboration project between several Norwegian and foreign institutions aiming to document and predict changes in the Svalbard winter climate and evaluate some of the consequences for the environment, the society and the ecosystem. The project is based on a set of case studies providing insights into how milder and rainier winter weather, and particularly extreme events, may have broad environmental and societal implications. Data collected during and after an extreme event in mid-winter 2012 was particularly essential for the project. In the standard normal period 1961-1990, average temperature during this time of year (January – February) is -15 °C. During the two week long warm spell, we measured record high temperatures and record breaking amounts of precipitation, with e.g. 7.8 °C as maximum temperature at Akseløya and 98 mm rain during one day in Ny-Ålesund (25 % of the mean annual precipitation). Our results suggest that such weather patterns in the high Arctic can generate large changes in the natural environment, including elevated permafrost and ground surface temperatures, large slush avalanches and the formation of thick (often 15 cm) solid ground ice covering large continuous areas. Slush avalanches and icing had large implications for the society. For instance, avalanches destroyed a pedestrians' bridge and closed nearly all roads, and the airports were closed for several days due to slippery runway. The icing also made scooter driving and hiking difficult, and statistics from the tourism industry indicate a negative effect of the extreme event throughout winter. Heavy icing can also affect herbivorous animals such as reindeer and ptarmigan, and this study provides rare empirical support for this, for instance through reduced ptarmigan harvest levels and high mortality across the monitored reindeer populations. Based on an icing experiment where we simulated heavy rainfall in mid-winter (during a winter with no natural icing), we also show for the first time how high Arctic vegetation may respond to such events. In the following summer, specimens of the perennial plant *Cassiope tetragona* that were subject to the icing treatment had lower

flowering success and higher shoot mortality than control plants. These effects of warm spells and rainy winter weather on the environment, society and ecosystem components have great future relevance. Analyses of downscaled climate scenarios for Svalbard airport and Ny-Ålesund suggest that future winters are likely to be even warmer and rainier than what is currently observed. Single simulations from the most moderate scenarios indicate that the median winter during 2021-2050 (MPI92b, emission scenario MPI92a) and 2071-2100 (MPIB2, emission scenario SRES B2) will have about the same average temperature in December-February as during the record winter of 2013-14 (-4.6 °C at Svalbard airport), with -12 °C (MPI92a, 1981-2010) and -13 °C (MPICN, 1961-1990) in the simulations for the respective control periods. Single simulations based on other scenarios predict that the median winter at the end of this century may have substantially higher average temperatures ( $> 3$  °C at Svalbard airport) and more than 150 mm rain in December-February in Ny-Ålesund (scenario HADA1c, emission scenario SRES A1B), compared with -12 °C og 8 mm in the control period simulation (HADCN, 1961-1990). According to these simulations, nearly all precipitation events in mid-winter will be in the form of rain. Accordingly, both moderate and less moderate future scenarios indirectly suggest increased permafrost temperatures and more frequent slush avalanches and icing episodes (until some unknown threshold point), with associated challenges for society and ecosystems.

# Innhold

<b>1 Innledning</b>	<b>8</b>
<b>2 Varmere og mer regnfulle svalbardvintre</b>	<b>10</b>
2.1 Historiske endringer	10
2.2 Ekstremværet i januar-februar 2012	12
<b>3 Effekter på naturmiljø, samfunn og økosystem</b>	<b>14</b>
3.1 Bakketemperatur og permafrost	14
3.2 Ising	16
3.3 Samfunn og infrastruktur	18
3.4 Dyr og planter	20
<b>4 Framtidas svalbardvinter</b>	<b>25</b>
<b>5 Sammenfattende diskusjon</b>	<b>29</b>
<b>6 Referanser</b>	<b>31</b>
<b>Takksigelser</b>	<b>35</b>



# 1 Innledning

Været på Svalbard endrer seg raskt, både fra dag til dag og fra år til år. Basert på lange observasjonsserier fra ulike målestasjoner på Spitsbergen er det etablert en kvalitetssikret temperaturserie på Svalbard lufthavn som går helt tilbake til slutten av 1800-tallet (Nordli m.fl. 2014). Analyser av temperaturserien viser at det er store naturlige temperaturvariasjoner fra år til år og fra tiår til tiår, men også at det er en svært klar oppvarmingstrend. Fra målingene startet i 1899 og fram til 2014 har årsmiddeltemperaturen økt med hele 3 grader (Nordli m.fl. 2014). Spesielt tydelig er oppvarmingen de siste 30 år. Svalbard er nå inne i den klart varmeste perioden som er observert på øygruppa. I vinterhalvåret kan disse endringene særlig merkes i form av kraftigere varmebølger og regnvær midtvinters (Hansen m.fl. 2014), da normaltemperaturen på Svalbard lufthavn ligger rundt  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . I Arktiske strøk vil slike værhendelser, og spesielt kraftig regnvær, potensielt medføre betydelige endringer i naturmiljøet gjennom en oppvarming av det øverste jordlaget (Putkonen & Roe 2003) og permafrostlaget (Isaksen m.fl. 2007a), økt skredfare (Conway & Raymond 1993; Stimberis & Rubin 2011), og dannelse av tykke islag i snøen eller på bakken (Putkonen & Roe 2003; Hansen m.fl. 2010). Disse endringene kan forventes å påvirke både samfunn og økosystemer. For eksempel vil økt bakketemperatur i verste fall kunne redusere stabiliteten av permafrosten og på sikt gjøre grunnen mer ustabil i fjellskråninger, under veier, bygninger og annen infrastruktur. Ising kan ha negative konsekvenser for overvintrende dyrearter (Hansen m.fl. 2013), og da spesielt reinsdyr, som opplever matmangel på grunn av «låste vinterbeiter».

Selv om kraftig regnvær midtvinters fortsatt kan karakteriseres som en sjelden eller til og med «ekstrem» værhendelse over det meste av Arktis, er fenomenet generelt forventet å øke i både omfang og hyppighet under global oppvarming (Rennert m.fl. 2009). Grunnlaget for å forstå og predikere effektene av disse endringene på samfunn og økosystemer er fortsatt mangelfullt (IPCC 2013a), dels nettopp fordi de skjer sjeldent og er vanskelig å dokumentere. Svalbard representerer i så måte en «hotspot», med sin beliggenhet midt i Nordishavet, et oseanisk klima og relativt hyppige varmebølger og regnværsepisoder vinterstid (Rennert m.fl. 2009; Serreze m.fl. 2015).

Høyere vintertemperaturer øker sannsynligheten for at nedbør faller som regn i stedet for snø. I januar-februar 2012 falt det rekordstore regnmengder på Svalbard (Hansen m.fl. 2014), og under deler av den to uker lange varmebølgen var Longyearbyen varmest i hele Norge (Fig. 1). Svalbards befolkning opplevde at sørpeskred midt i Longyearbyen og ising på



bakken førte til store problemer for trafikk og annen ferdsel. I kombinasjon med Svalbards unike muligheter som forskningsarena året rundt, genererte dette ekstremværet en sjelden anledning til å studere slike værtyper og hvordan de påvirker naturmiljø, samfunn og viktige økosystemkomponenter. Data innsamlet fra hendelsen i 2012 utgjorde noe av bakgrunnen for etableringen av prosjektet «Vinterregn» - et tverrfaglig samarbeidsprosjekt mellom flere norske og internasjonale institusjoner. Målet med prosjektet, som er finansiert av Svalbards miljøvernfond, er å dokumentere og predikere endringer i svalbardvinteren og evaluere noen av konsekvensene på tvers av natur og samfunn. Vi spør: Har svalbardvinteren blitt varmere og mer regnfull siden værmålingene startet, og hvilke framtidige endringer kan man vente seg? Hvordan påvirker ekstreme varmeepisoder og regnvær vinterstid naturmiljøet? Og hva er effektene på samfunn og økosystem?



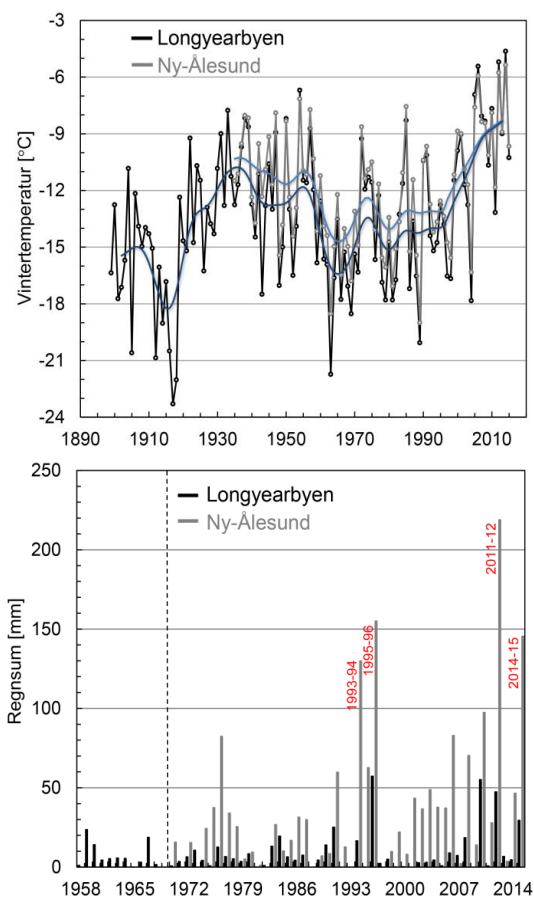
*Figur 1. Varmerekord og kraftig regnvær i Longyearbyen under mørketida (januar-februar) 2012. Foto: Ø. Varpe.*

## 2 Varmere og mer regnfulle svalbardvintre

### 2.1 Historiske endringer

Svalbard (74-81°N, 10-35°E) har betydelig mellomårsvariasjon i lufttemperatur (Nordli m.fl. 2014). Ved den meteorologiske stasjonen på Svalbard lufthavn ved Longyearbyen er temperatur- og nedbørnormalen (1961-1990) for året på på -6,7 °C og 190 mm. Vinterstid, her definert som november-april, ligger normalen på -12,7 °C og 113 mm nedbør, men varmebølger og plussgrader forekommer relativt hyppig for breddegraden. På grunn av plasseringen i Nordishavet påvirkes lufttemperatur og nedbørsmønster av koblingene mellom hav-sjøis-atmosfære (Benestad m.fl. 2002), og varmebølger vinterstid ser ut til å sammenfalle med fravær av fjordis (Isaksen m.fl. 2007a).

Meteorologisk institutt har to helårsbemannede værstasjoner som måler nedbør på Spitsbergen; Svalbard lufthavn (stasjonsnummer 99860) og Ny-Ålesund (99910). Svalbard lufthavn har (i kombinasjon med Longyearbyen) temperatur- og nedbørmålinger siden henholdsvis 1898 og 1957 og representerer en av svært få målestasjoner i Arktis med >100 år lange tidsserier. Ny-Ålesund har temperatur- og nedbørmålinger siden henholdsvis 1934 og 1969. I tillegg er en tidsserie med daglige verdier av både temperatur og nedbør



Figur 2. Årlig gjennomsnittstemperatur og regnmengde i desember-februar ved Svalbard lufthavn (Longyearbyen) og Ny-Ålesund. Merk at tidsaksene er forskjellig. Modifisert fra Hansen m.fl. (2014).

tilgjengelig for Barentsburg (<http://en.tutiempo.net/climate/07-1973/ws-201070.html>).

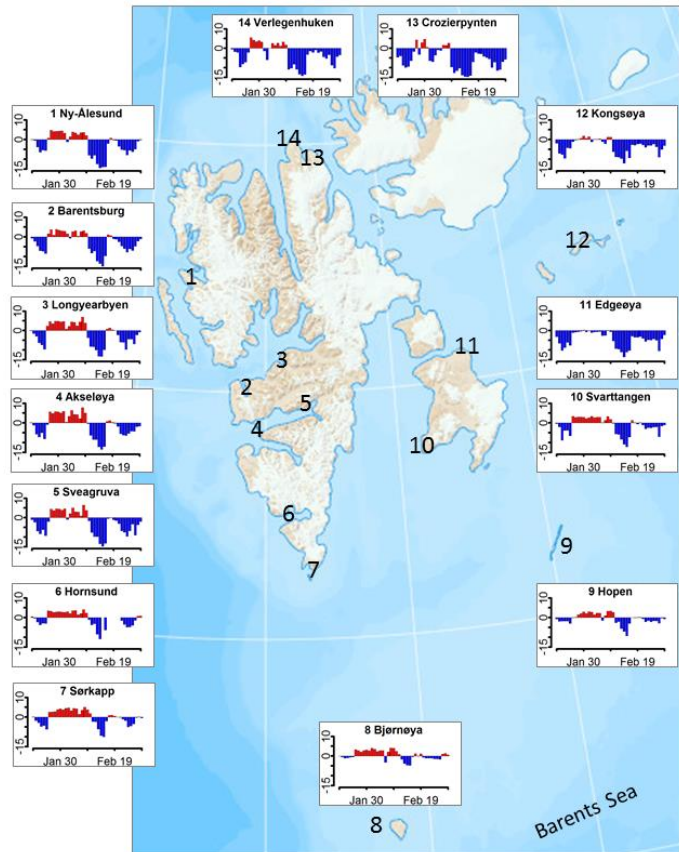
I Hansen m.fl. (2014) beregnet vi historiske endringer i temperatur og regn målt ved Svalbard lufthavn og i Ny-Ålesund for perioden desember-februar, det vil si «midtvinters». En oppdatering av beregningene er gitt i Figur 2a, som viser hvordan temperaturen midtvinters varierer sterkt mellom år (Svalbard lufthavn: kaldest i 1917 [-23,3 °C], varmest i 2012 [-4,6 °C]), med historisk høye nivåer de siste par tiåra. Spesielt kan man merke seg at temperaturrekordene for både Svalbard lufthavn og Ny-Ålesund har blitt slått ikke mindre enn tre ganger (2005-06, 2011-12, og seinest i 2013-14) det siste tiåret. Dette sammenfaller med betydelig redusert fjordisutbredelse (Isaksen m.fl. 2007a) og redusert isutbredelse nord for Svalbard, som hovedsakelig ser ut til å være forårsaket av varmere Atlanterhavsvann (Onarheim m.fl. 2014). Fra og med 2004-05 har alle vintre på begge stasjoner ligget godt over normalen (-15,0 °C og -13,7 °C ved henholdsvis Svalbard lufthavn og Ny-Ålesund). Trendanalyser viser en statistisk signifikant temperaturøkning for Svalbard lufthavn siden komposittserien starter i 1898 (stigningstall 0,34 °C per tiår:  $t = 3,46$ ,  $P < 0,001$ ). For Ny-Ålesund er det ingen statistisk signifikant endring i midtvintertemperatur (stigningstall 0,15 °C per tiår:  $t = 1,01$ ,  $P = 0,3$ ) for hele tidsserien, som for denne stasjonen starter under den relativt varme perioden på 1930-tallet. Temperaturene etter normalperioden (1991-2015; -10,6 °C) var dog i gjennomsnitt høyere enn under normalperioden (1961-90; -13,7 °C) ( $t = 4,05$ ,  $P < 0,001$ ).

Regnmengde ble beregnet basert på WMO protokollkoder 4677 (WW) og 4561 (W1), og kun nedbørsepisoder med målt 12-t nedbør >0mm, visuelt klassifisert som yr (WW = 50-59) og regn (WW = 60-67), ble inkludert. Regnmengde midtvinters har økt parallelt med de siste tiårs stigende temperaturnivå (Fig. 2b). I Ny-Ålesund falt spesielt store regnmengder vintrene 1993-94, 1995-96, 2011-12 og 2014-15, mens Svalbard lufthavn hadde mest regn i 1995-96, 2009-10, 2011-12 og 2014-15. På grunn av datafordelingen er tidsseriene på regn uegnet til lineære trendanalyser. Ikke-parametriske tester viser en statistisk signifikant økning fra normalperioden 1961-1990 til perioden etter for Ny-Ålesund (Wilcoxon  $W = 142$ ,  $P < 0,01$ ), men ikke for Svalbard lufthavn (Wilcoxon  $W = 383$ ,  $P = 0,9$ ). For sistnevnte stasjon er det derimot også tydelig at de mest regnfulle vintrene forekommer i siste halvdel av tidsserien.

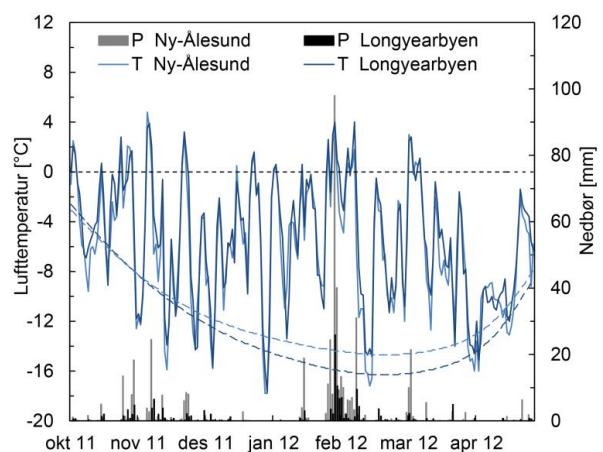
## 2.2 Ekstremværet i januar-februar 2012

Været midtvinters 2011-12 var preget av en sterk positiv temperaturanomali over det meste av Barentshavet (Hansen m.fl. 2014). I januar-februar dirigerte et langvarig høytrykk over nordlige Skandinavia flere lavtrykksystemer med mild og fuktig luft mot Svalbard. De kraftigste lavtrykkene var knyttet til stor atmosfærisk vanntransport via såkalte atmosfæriske "elver" som er knyttet til sykloner ved midlere breddegrader (Serreze m.fl. 2015). Lavtrykkene medførte en to uker lang varmebølge (cirka 26. jan - 9. feb) med både ekstrem varme (Fig. 3) og ekstrem nedbør i form av regn (Fig. 4). Varmegrader ble målt over hele øygruppa (Fig. 3), men varmebølgen var mest tydelig på vest-Spitsbergen. Ved Svalbard lufthavn var gjennomsnittstemperaturen 30. januar hele 4,0 °C, det vil si omtrent 20 °C over normalen og høyere enn noen andre norske værstasjoner denne dagen. Den 8. februar ble maksimumstemperaturen på Akseløya målt til hele 7,8 °C, den høyeste temperaturen noensinne målt på Svalbard i februar. Over hele Svalbard ble varmebølgen etterfulgt av en betydelig kaldere periode.

Ved alle de tre bemannede værstasjonene ble det målt kraftig nedbør i form av regn. Det kraftigste regnet falt i Ny-Ålesund (Fig. 4), hvor det i løpet av ett døgn (30. januar, maksimumstemperatur 4,3 °C) falt hele 98 mm, den kraftigste døgngnedbøren målt noensinne på Svalbard. En slik døgngnedbør har en returperiode (jfr. Førland 1992) på >500 år og tilsvarende 25 % av normalen for et helt år. I løpet av hele varmeperioden falt det til sammen 272 mm nedbør (71 % av årsnormalen) i Ny-Ålesund, det meste som regn. Tilsvarende ble det på Svalbard lufthavn målt 70,3 mm nedbør (37 % av årsnormalen) i løpet av varmebølgen, med maksimum døgngnedbør 25,9 mm (14 %), og i Barentsburg ble det målt 136 mm med maksimum døgngnedbør 27,2 mm.



Figur 3. Temperaturmålinger på Svalbard før, under og etter varmebølgen i januar-februar 2012. Blå og rød søyler viser temperaturer henholdsvis under og over 0 °C. Modifisert fra Hansen m.fl. (2014).



Figur 4. Døgntemperatur (T) og -nedbør (P) i Ny-Ålesund og Longyearbyen (Svalbard lufthavn) gjennom vinteren 2011-12. Stiplede linjer viser normaltemperaturen (1961-90). Modifisert fra Hansen m.fl. (2014).

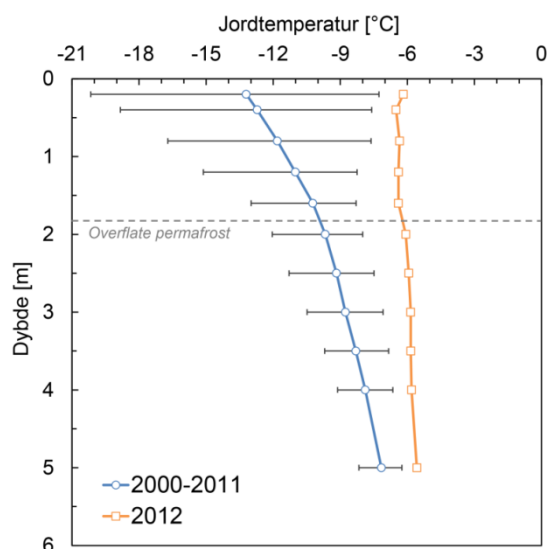


## 3 Effekter på naturmiljø, samfunn og økosystem

### 3.1 Bakketemperatur og permafrost

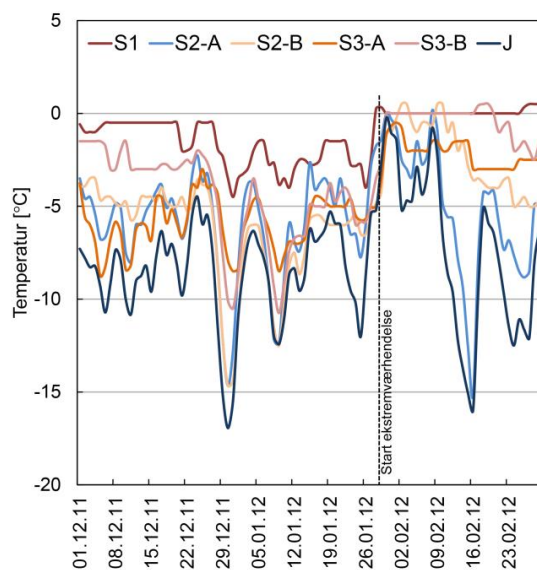
Svalbard har kontinuerlig permafrost (Liestøl 1976). I 1998 ble to borehull (15 og 102 m dype) for permafrostmålinger etablert på Janssonhaugen, cirka 20 km øst for Longyearbyen (Sollid m.fl. 2000). Denne permafroststasjonen, som er den nordligste av stasjonene i et europeisk transekt av dype borehull etablert under EU-prosjektet PACE (Harris m.fl. 2001b), ble boret i sandstein med lavt isinnhold og med et tynt forvittringslag på bakkeoverflaten. Bakkeoverflaten er nærmest vegetasjonsfri, og snødekket er tynt eller fraværende i lengre perioder om vinteren som følge av sterk vind. Stasjonen er representativ for fjell og fjellsider rundt Longyearbyen og sentrale deler av Nordenskiöldland på Spitsbergen. Tidligere studier har vist at permafrosten ved Janssonhaugen har blitt betydelig varmere siden målingene startet (Isaksen m.fl. 2000; Isaksen m.fl. 2007b). En signifikant temperaturøkning kunne detekteres ned til minst 60 m dybde (Isaksen m.fl. 2007b), og den gjennomsnittlige temperaturøkningen ved permafrostoverflaten (cirka 2 m dybde) var på 0,07 °C. Effektene av den rekordmilde vinteren 2011-12 og spesielt ekstremværet i januar-februar 2012 (se over) kom på toppen av denne gradvise oppvarmingen (Fig. 5). I en 30-dagers periode sentrert i slutten av januar var temperaturen rett under bakken (0,2 m) og ved permafrostoverflaten (2,0 m) henholdsvis 7,0 °C og 3,6 °C over gjennomsnittet for perioden 2000-11, og hele 1,3 °C og 1,9 °C høyere enn tidligere målte maksimumstemperaturer for samme tidsintervall.

Ved hjelp av et omfattende nettverk av temperaturloggere i Adventdalen (inkludert Janssonhaugen), Colesdalen, Semmeldalen og Reindalen (totalt  $n = 165$  loggere) kunne vi



Figur 5. Gjennomsnittlig bakketemperatur ved forskjellig dybder på Janssonhaugen i 2012 sammenlignet med perioden 2000-2011. Temperaturene er gjennomsnitt for en 30-dagers periode sentrert ved 30. januar (justert suksessivt med dybde jfr. Isaksen m.fl. 2000). Modifisert fra Hansen m.fl. (2014).

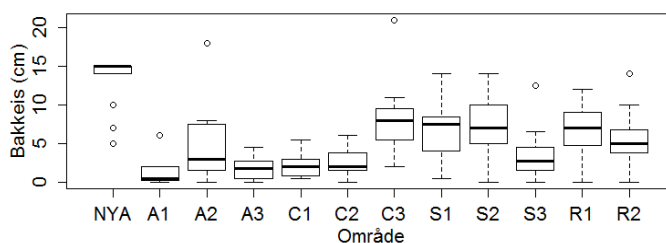
også registrere hvordan ekstremværet i januar-februar 2012 gjorde utslag på bakketemperaturer over store deler av sentral-Spitsbergen (Hansen m.fl. 2014). Loggerne av type UTL-3 (Geotest AG) og iButtons 1921G (Maxime Integrated) er på størrelse med et kronestykke og detekterer og logger temperaturen ved ca 1 cm dybde. Mildværet med tilhørende regn og smeltevann førte til at temperaturen i de fleste målepunkter krøp opp mot 0 °C i slutten av januar (Fig. 6), mens det var stor lokal variasjon i når temperaturen sank igjen etter varmebølgen. I permafrostområder som Svalbard vil temperaturresponsen til slike ekstremhendelser avhenge av snødybde, vegetasjon, jordtype (vanninnhold og porøsitet), og ikke minst regnmengde (Westermann m.fl. 2011). Våre målinger tyder på at regionale ekstremhendelser som den i januar-februar 2012 kan gi utslag i økt bakketemperatur over store sammenhengende områder.



Figur 6. Bakketemperaturer ca 1 cm under overflaten på rabber på sentral-Spitsbergen vinteren 2011-12. S = Semmeldalen, J = Janssonhaugen. Modifisert fra Hansen m.fl. (2014).

## 3.2 Ising

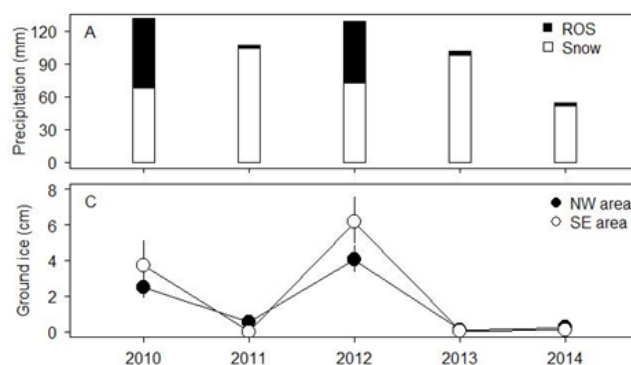
Islag kan dannes i snølaget eller på bakken som følge av episoder med tining-frysing, regn på bar bakke eller regn på snø (Putkonen & Roe 2003; Grenfell & Putkonen 2008; Putkonen m.fl. 2009; Hansen m.fl. 2010). Regn påvirker snøens varmebudsjett helt ned til bakkenivå, og både regnvannet og smeltet snø bidrar til akkumulering av vann eller våt snø (sørpe). I møte med den dypfryste bakken avgir dette smeltevannet latent varme, og det kan bygge seg opp et tykt lag med stålis (Putkonen & Roe 2003) som mer eller mindre dekker den lavtvoksende vegetasjonen (Hansen m.fl. 2010). Våt snø og påfølgende ising i snølaget har blitt påvist på regional skala ved hjelp av satellittbilder (Bartsch m.fl. 2010), men det finnes svært lite empirisk og feltvalidert dokumentasjon på romligtemporær variasjon i bakkeising, og hvilke vær fenomener som kan skape dette (men se Kohler & Aanes 2004; Hansen m.fl. 2010; Hansen m.fl. 2011).



Figur 7. Istykkelser målt i mars-april 2012 etter ekstremværet i januar-februar. NYA = Ny-Ålesund (kun målt ned til 15 cm dypde), A = Adventdalen, C = Colesdalen, S = Semmeldalen, R = Reindalen. Modifisert fra Hansen m.fl. (2014). Foto: Ø. Varnø.

Vi benyttet den unike situasjonen som oppstod på grunn av ekstremværet i januar-februar 2012 til å måle tykkelse på bakkeisen i flere studieområder spredt over Spitsbergen (Hansen m.fl. 2014). Mange av målepunktene var knyttet til de nevnte bakketemperaturloggerne (se over), som i hovedsak var plassert i rabbevegetasjon. Målingene, som ble gjort i mars-april, viste at det meste av landskapet under 100 m.o.h. ved Ny-Ålesund var dekket av et islag i størrelsesorden 15 cm eller tykkere (Fig. 7). Dette islaget var fortsatt til stede i cirka halvparten av målepunktene i midten av juni. På sentral-Spitsbergen var islaget generelt tynnere, men vi fant  $\geq 1$  cm bakkeis i  $n = 114$  av 128 punkter i rabbevegetasjon i Colesdalen, Semmeldalen og Reindalen, og i  $n = 19$  av 31 målepunkter i rabbevegetasjon i Adventdalen ved Longyearbyen (Fig. 7).

Kraftig bakkeising har også blitt dokumentert eller anekdotisk rapportert i og ved Ny-Ålesund i 1993-94, 1995-96, 2005-06 (Kohler & Aanes 2004; Hansen m.fl. 2010) og 2009-10



Figur 8. Årlige vinternedbørsmengder i form av regn (ROS) og snø og tilsvarende variasjon i bakkeistykkelse i rabbevegetasjon i Colesdalen (NW) og Reindalen (SE). Fra Loe et al. upubl.



(Hansen & Aanes 2012), det vil si de mest regnfulle vintrene sett bort fra 2011-12 i beregningene ovenfor (Fig. 4). Likeledes var de fleste bakketemperaturloggere i Colesdalen og Reindalen isdekket etter regnværet i 2009-10 (Fig. 8), mens det var lite eller ingen is i de regnfattige vintrene 2010-11, 2012-13 og 2013-14. Bakkeising er altså ikke unormalt på deler av Svalbard, men dette er det første studiet som gir et empirisk innblikk i variasjon og omfang i tid og rom, og hvilke isforhold man kan forvente når vinterværet er på det mest ekstreme.

### 3.3 Samfunn og infrastruktur

Varmebølgen i januar-februar 2012 utløste flere sørpeskred i og ved Longyearbyen, som ligger i en U-formet dal (Longyeardalen) med bratte fjellsider mot øst og vest. Et større sørpeskred i sentrum av Longyearbyen traff og ødela ei gangbru etter et kraftig regnvær den 30. januar, og alle veiene i Longyearbyen var stengt i kortere eller lengre perioder på grunn av andre skred (Fjellestad 2012b). Historisk har sørpeskred av slike dimensjoner i Longyearbyen først og fremst skjedd under snøsmeltinga på våren (men se Eckerstorfer 2013), slik som i juni 1953 da et stort skred ødela sykehuset og flere andre bygninger, noe som medførte tre dødsfall og 30 skadde personer. Siden mange bygninger og andre installasjoner på Svalbard er konstruert uten noen forhåndsevaluering av skredfare, er en stor del av infrastrukturen potensielt eksponert for slike sørpe- og jordskred.



Figur 9. Faksimile fra Svalbardposten 05/2012.

Det kraftige regnværet førte også til ising på byens radioantenner og satte disse ut av spill (Fjellestad 2012b), og bakkeis bygde seg opp i og rundt byen (Fig. 1, 9). Dette hadde flere negative konsekvenser. Glatt rullebane førte til at ingen fly kunne ta av eller lande ved Svalbard lufthavn 29. og 31. januar, og flere andre avganger/ankomster ble utsatt opptil flere dager (Morten Ulsnes, Avinor, pers. komm.). Det samme skjedde i Ny-Ålesund (Elisabeth Melø, Kings Bay, pers. komm.). På grunn av de sjeldne flyavgangene med cirka ett passasjerfly daglig ved Svalbard lufthavn og to fly ukentlig i Ny-Ålesund, har slike kanselleringer stor betydning for befolkning og samfunn. Merk dog at glatt rullebane og utsatt flytrafikk ikke er et direkte sjeldent fenomen på Svalbard vinterstid.

En betydelig del av Longyearbyens økonomi er direkte eller indirekte relatert til turisme og reiseliv. Under og etter varmebølgen og regnværet i januar-februar var det svært begrensede muligheter for snøscooterkjøring, hundesledekjøring (Fig. 10) og turaktivitet generelt. Bakkeisen gjorde spesielt snøscooterkjøring vanskelig til langt ut på sesongen, noe som medførte kanselleringer og endringer i aktiviteten til turselskapene (Fjellestad 2012a). Selv om årsakssammenhenger vanskelig kan konstateres, tyder tallmaterialet fra reiselivsbransjen på at de ekstreme forholdene under og etter varmebølgen i 2012 hadde negativ betydning. For eksempel var antall guidede snøscooterdager i 2012 28 % lavere enn året før og lavest siden de kontinuerlige registreringene startet i 2001 (Ronny Brunvoll, Visit Svalbard AS, pers. komm.). Guidede isgrotteturer falt med 62 % (300 feltdager), og brevdringsturer med 57 % (19 feltdager). Totalt antall hotellovernattinger Longyearbyen var redusert i både februar (2 % reduksjon til 4800), mars (12 % til 8300), april (5 % til 11300) og mai (13 % til 7600) sammenlignet med samme måned året før ([www.ssb.no](http://www.ssb.no)). Dette står i

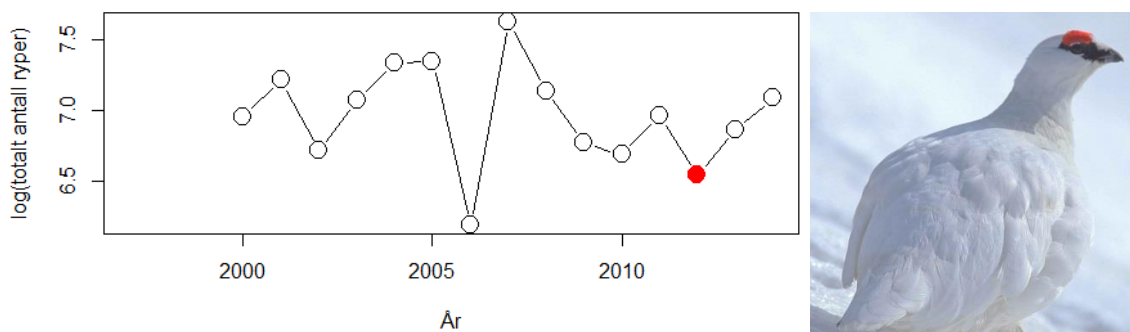


Figur 10. Hundekjøring ved Ny-Ålesund. Ferdslen på Svalbard var til dels utfordrende i flere måneder på grunn av isinga som oppstod etter varmebølgen og regnværet midtvinters 2012. Foto: E.B. Råstad.

kontrast til den økte overnattingsaktivitet i perioden før værhendelsen – både november (8 % økning til 1900), desember (2 % til 2100) og januar (76 % til 2100) hadde høyere overnattingstall enn året før.

### 3.4 Dyr og planter

Et økende antall studier tyder nå på at ising som følge av varmebølger og regnvær vinterstid kan ha negative effekter på bestandsutviklingen til planteetere i Arktis (f.eks. Forchhammer & Boertmann 1993; Ims m.fl. 2008; Kausrud m.fl. 2008; Gilg m.fl. 2009; Hansen m.fl. 2011; Stien m.fl. 2012; Hansen m.fl. 2013). I høy-Arktis er vegetasjonen såpass lavtvoksende (sjelden høyere enn 5-10 cm) at den potensielt kan bli fullstendig dekket av bakkeis. Spesielt øybestander av reinsdyr, med få eller ingen migrasjonsmuligheter, vil kunne rammes hardt av slike forhold. Dette så man et eksempel på den regnfulle vinteren 1993-94 i Ny-Ålesund, hvor bestanden av svalbardrein, en vill underart av reinsdyr som er endemisk for Svalbard, ble dramatisk redusert fra cirka 360 til 80 individer (Kohler & Aanes 2004). Seinere studier tyder også på at bestandsdynamikken til andre overvintrende planteetere på Svalbard, inklusive svalbardrypa, påvirkes negativt av regn vinterstid (Stien m.fl. 2012; Hansen m.fl. 2013). Dette er sannsynligvis på grunn av ising, en slutning som blant annet styrkes av fangststatistikken for rypa i 2012 sammenlignet med andre år (Fig. 11).

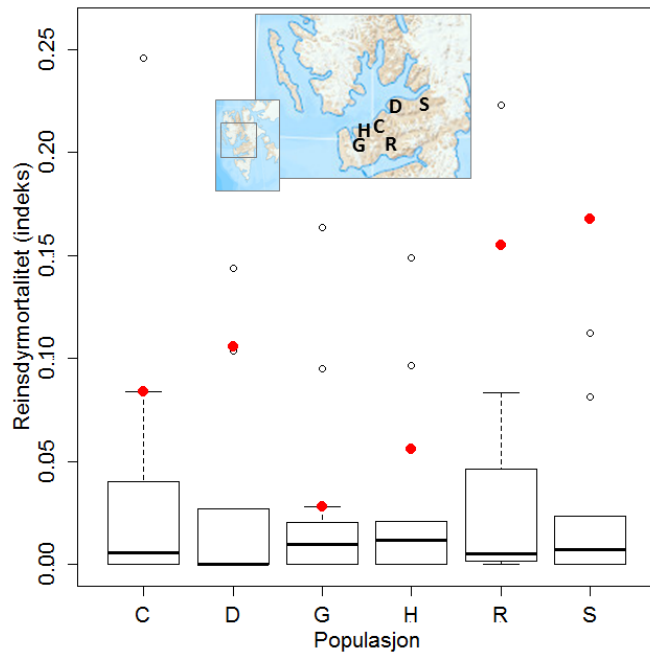


Figur 11. Totalt antall ryper skutt på Svalbard per sesong (log-transformert), med fangsthøsten 2012 merket i rødt. Merk at det ikke er tatt høyde for årlig variasjon i fangstmannaktivitet. Datakilde: Sysselmannen. Foto: B.B. Hansen.

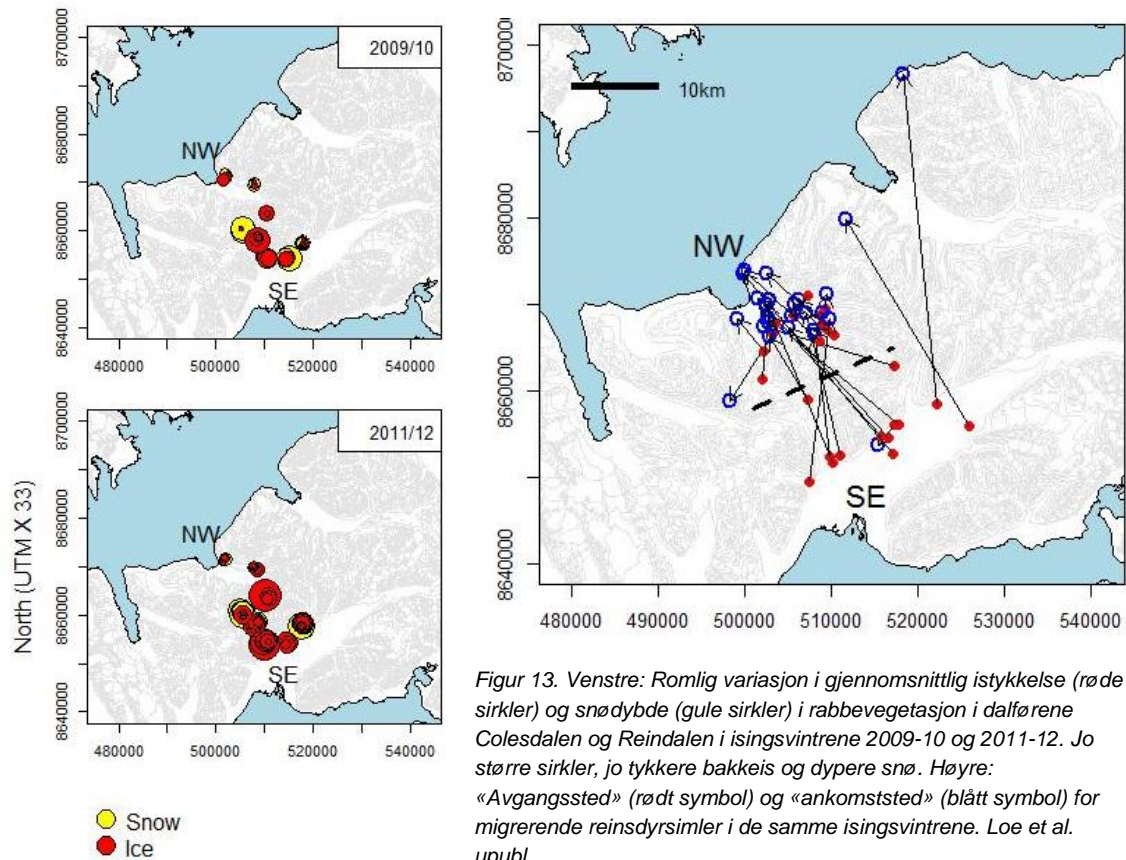
En viktig del av prosjekt Vinterregn var å dokumentere hvordan isinga som oppstod under «ekstremvinteren» 2011-12 påvirket reinsdyr på Svalbard. Basert på helikoptertellinger av levende og døde dyr (kadaver fra sist vinter er lett observerbare i terrenget) utført av Sysselmannen hvert år i august, kunne vi estimere en årlig dødelighetsindeks. I alle de overvåkede områdene på sentral-Spitsbergen var dødeligheten vinteren 2011-12 atskillig høyere enn normalen (Fig. 13), spesielt i indre dalstrøk som Reindalen og Sassendalen, og det samme var tilfelle i Ny-Ålesund (Hansen m.fl. 2014). Dette antyder at isingsepisoden, på tross av at den skjedde relativt seint (februar) og etter en ellers god vintersesong, hadde en betydelig negativ effekt på reinen over et stort område.

Et viktig og i stor grad ubesvart spørsmål i forskningen på økologiske klimaendringseffekter er hvordan dyrestander er i stand til å bufre negative effekter av klimaendringer gjennom evolusjonære eller atferdsmessige tilpasninger (Parmesan 2006). Gjennom et såkalt fangst-gjenfangst-studie av reinsdyr i Reindalen og Colesdalen og GPS-merking av simler har vi kunnet dokumentere hvordan dyrene responderer til isingsepisoder

(Loe et al. unpubl.). I kombinasjon med bakkemålinger av isingsgrad og hvordan dette varierer mellom områder finner vi at en stor andel av simlene migrerer fra ett dalføre til et annet (se også Stien m.fl. 2010) som en umiddelbar respons til varmebølger, regnvær og tilhørende ising (Fig. 12). Dette skjer nærmest utelukkende i isingsvintre og langs en romlig isingsgradient som gir de migrerende dyra bedre beitebetingelser, i dette tilfellet ved å migrere fra Reindalen via Semmeldalen og Skiferdalen til kystnære Colesdalen. Mye tyder på at dette gir en gevinst i form av høyere overlevelse og større sannsynlighet for å få kalv sammenlignet med å bli værende i de mest nedsette områdene, som Reindalen (Loe et al. unpubl.). Vi har tidligere vist hvordan svalbardrein også kan endre sin adferd under isingsvintre ved å beite tang (Hansen & Aanes 2012) eller oppsøke høytliggende fjellområder (Hansen m.fl. 2010). I hvilken grad slike atferdsmessige responser bufrer den negative effekten av varmere og mer regnfulle vintre på bestandsnivå er fortsatt uvisst men vil muligens kunne besvares ved intensivering av fangst-gjengfangst-studiene kombinert med den årlige bestandsovervåkingen.



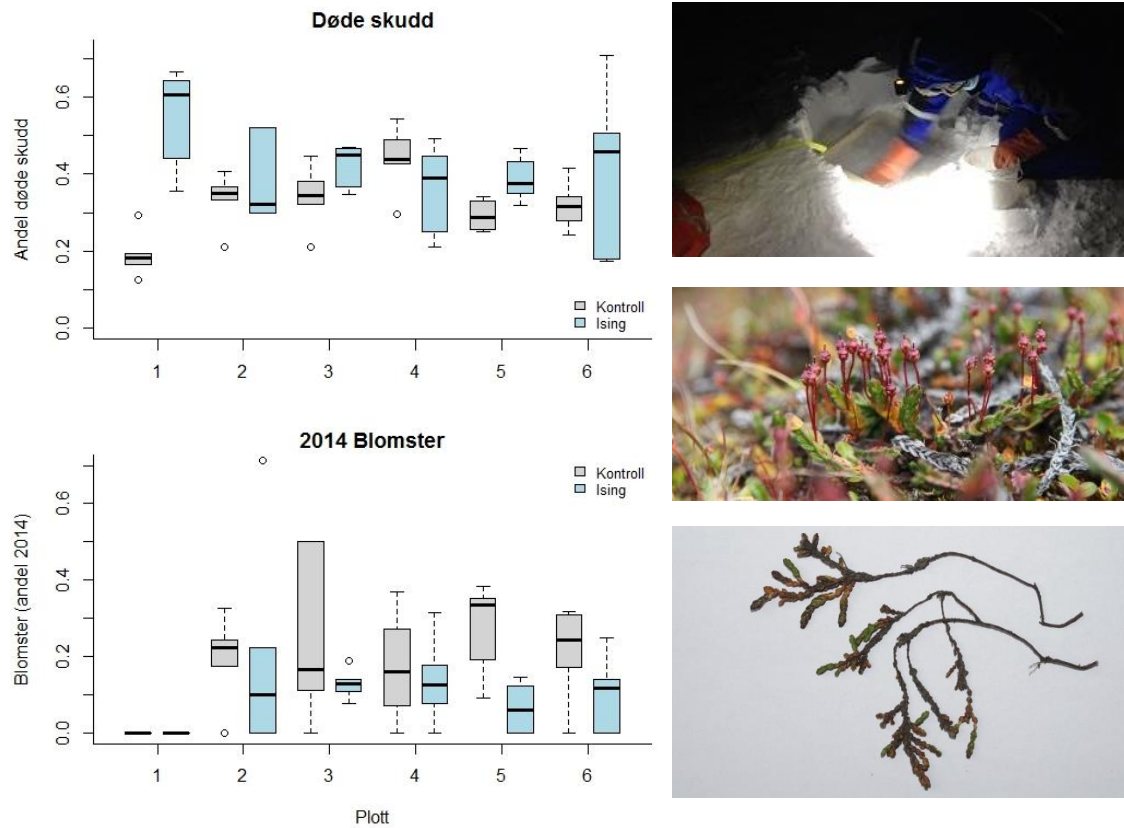
Figur 12. Boksplott av årlig variasjon i mortalitetsindekser for bestander av svalbardrein i perioden 1997-2014, beregnet som antall telte kadaver delt på antall levende rein telt året før. Rødt symbol viser data for isingsvinteren 2011-12, mens boksene viser interkvartiler med medianverdi som tykk horisontal linje. C = Colesdalen, D = Diabas, G = Grønndalen, H = Hollenderdalen, R = Reindalen, S = Sassendalen. Datakilde: Sysselmannen. Foto: B.B. Hansen. Modifisert fra Hansen m.fl. (2014).



Figur 13. Venstre: Romlig variasjon i gjennomsnittlig istykkelse (røde sirkler) og snødybde (gule sirkler) i rabbevegetasjon i dalførene Colesdalen og Reindalen i isingsvintrene 2009-10 og 2011-12. Jo større sirkler, jo tykkere bakkeis og dypere snø. Høyre: «Avgangssted» (rødt symbol) og «ankomststed» (blått symbol) for migrerende reinsdyrsimler i de samme isingsvintrene. Loe et al. unpubl.

Bakkeising påvirker altså planteeterne negativt ved at maten deres blir utilgjengelig, men vi vet svært lite om hvordan plantene selv responderer. Noen eksperimentelle studier fra lav-Arktis viser sprikende resultater på isingseffekter (Bjerke 2011; Bokhorst m.fl. 2011; Cooper 2014) som er vanskelig overførbare til høy-Arktis. På Svalbard ble det nylig rapportert at varmeepisoder vinterstid påvirker blomstring hos noen arter men at dette var relatert til avsmelting, økt eksponering og manglende isolering mot kulde heller enn ising (Semenchuk m.fl. 2013). For å bedre kunne forstå isingseffekter, gjennomførte vi derfor i januar 2014 et eksperiment i Bolterdalen ved Longyearbyen, hvor vi simulerte kraftig regn og bakkeising i kantlyngvegetasjon. Kantlyng er en flerårig plante hvis tidligere års vekst og blomstring kan måles, nærmest som i treringanalyser (Callaghan m.fl. 1989). Seks trerammer (50 x 50 x 13 cm) ble plassert ut og gradvis fylt med vann og sørpe som dekket kantlyngplantene med et cirka 10 cm tykt lag med stålis. Sommeren etter foretok vi målinger av plantene som hadde vært nediset og sammenlignet med planter fra kontrollpunkter like ved. Terrenget ved vårt eksperiment hadde ikke naturlig bakkeis dette året. Foreløpige resultater tyder på at det simulerte regnet og isinga hadde en betydelig negativ effekt på blomstringsgraden og førte til økt skuddødelighet (Fig. 14, Milner et al. unpubl.). Noe overraskende fant vi at levende skudd på nedisete planter hadde større vekst i 2014 (sommeren etter isingseksperimentet) sammenlignet med skudd hos kontrollplanter, noe som muligens kan forklares ved at ressursene allokteres til færre skudd dersom skuddødeligheten er høy, slik som i vårt eksperiment. De negative effektene av simulert

regn midtvinters har potensielt stor økosystemrelevans gitt framtidige klimaframskrivninger (se under), og dette første studiet på isingseffekter på høy-arktiske planter bør derfor følges opp av mer detaljerte studier på både kantlyng og arter som er viktige i dietten til planteeterne.



Figur 14. Boksplott av andel døde skudd (øvre figur) og blomstringsgrad (nedre figur) for kantlyng som har vært utsatt for eksperimentelt vinterregn og bakkeising (blå) sammenlignet med kontrollplanter som ikke ble utsatt for behandlingen (grå). Blomstringsgrad er beregnet som antall blomster produsert i 2014 (etter eksperimentet) delt på totalt antall blomster. De forskjellige boksene er for forskjellige plott. Milner et al. upubl. Foto: B.B. Hansen, J. Milner.





## 4 Framtidas svalbardvinter

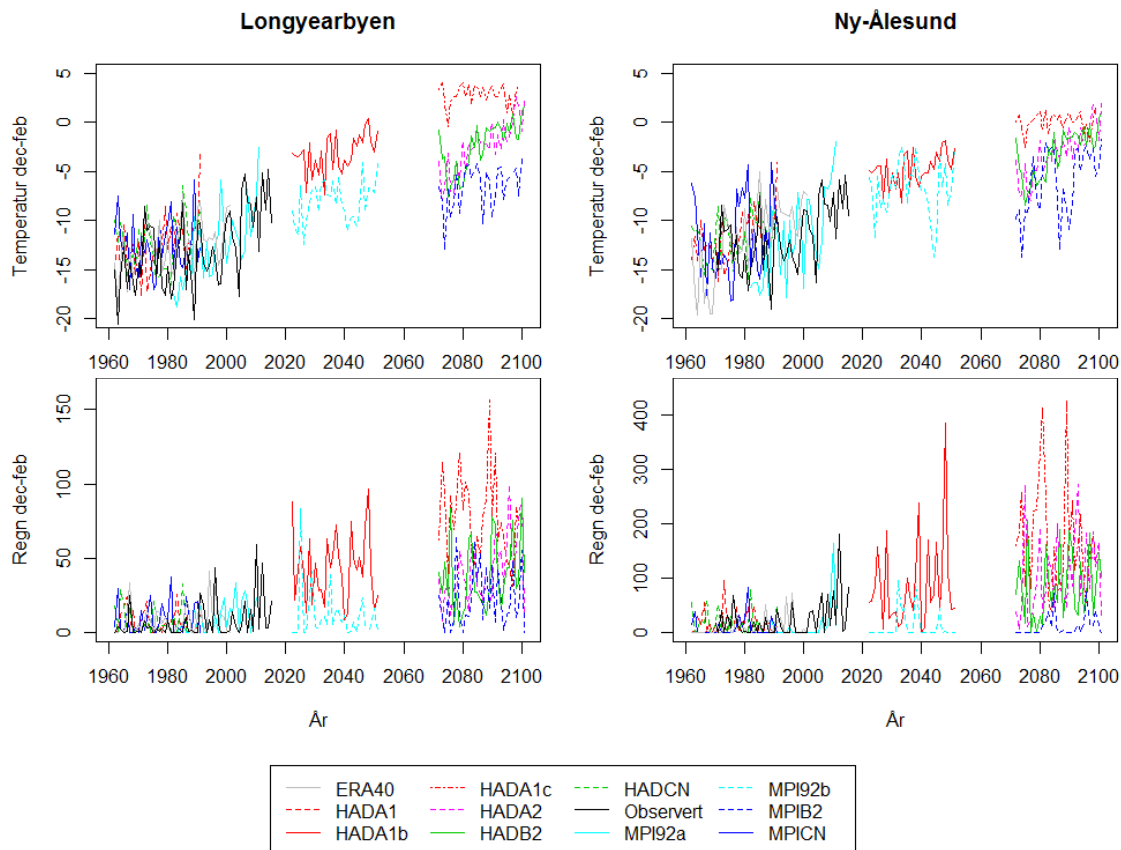
For bedre å kvantifisere utviklingen av klimaparametere i nordisk Arktis, har MET produsert en rekke simuleringer med den regionale klimamodellen HIRHAM innenfor prosjektet NORACIA (Førland m.fl. 2009). Modellen simulerte klimaet for utvalgte 30-års perioder i tidsrommet 1961-2100 med en romlig nøyaktighet på 25x25 km<sup>2</sup>. For å få en bedre oversikt over sannsynlig utfallsrom ble det benyttet 6 ulike beregninger (ensembles) for fremtidig klimautvikling. Disse tar hensyn til ulike utslippsscenarioer for klimagasser, naturlig klimavariabilitet og ulike globale klimamodeller. Disse er listet opp i Tabell 1, som beskriver hvilken global modell som ble brukt for å drive den regionale HIRHAM modellen, utslippsscenarioer for klimagasser og hvilke 30 års-perioder dataene dekker. I tillegg ble det produsert en 40-års simulering for 1961-2000 der HIRHAM ble drevet av globale reanalyse-data (Uppala m.fl. 2005). Denne viser hvordan HIRHAM gjenskaper fordelingen av klimaparametere i denne perioden, sammenlignbart med observerte data. Se for øvrig Førland m.fl. (2011) for mer dokumentasjon og anvendelse av de regionale klimadataene.

I dette studiet ble dataene interpolert fra modellens gitter til posisjonene for Longyearbyen og Ny-Ålesund, der det finnes historiske målinger av temperatur og nedbør. Målingene ble brukt for å korrigere fordelingen av modelldataene før videre analyse med metoden «kvantilmapping» (Gudmundsson m.fl. 2012). Korrigeringen baserer seg på en trening som gir lik fordeling av modelldata og målinger i kontrollperioden (1961-1990 eller 1981-2010), og resultatet av treningen blir brukt for å korrigere dataene i scenarioperiodene (2021-2050 og 2071-2100). Metoden tillater en ekstrapolasjon av verdier utover målingenes minste og største verdi for bl.a. å bevare klimasignalet i høye nedbørverdier. For temperatur tar metoden hensyn til midlere temperaturendring (klimasignalet) før eventuell korrigerende av fordelingen.

Tabell 1. Regionale klimasimuleringer fra HIRHAM-modellen. Medianverdier (kontrollperiode/scenarioperiode) for årlig temperatur og regnmengde (beregnet som nedbør  $\geq 1$  °C) midtvinters (desember-februar) for enkeltsimuleringene vist i Figur 15 er også oppgitt.

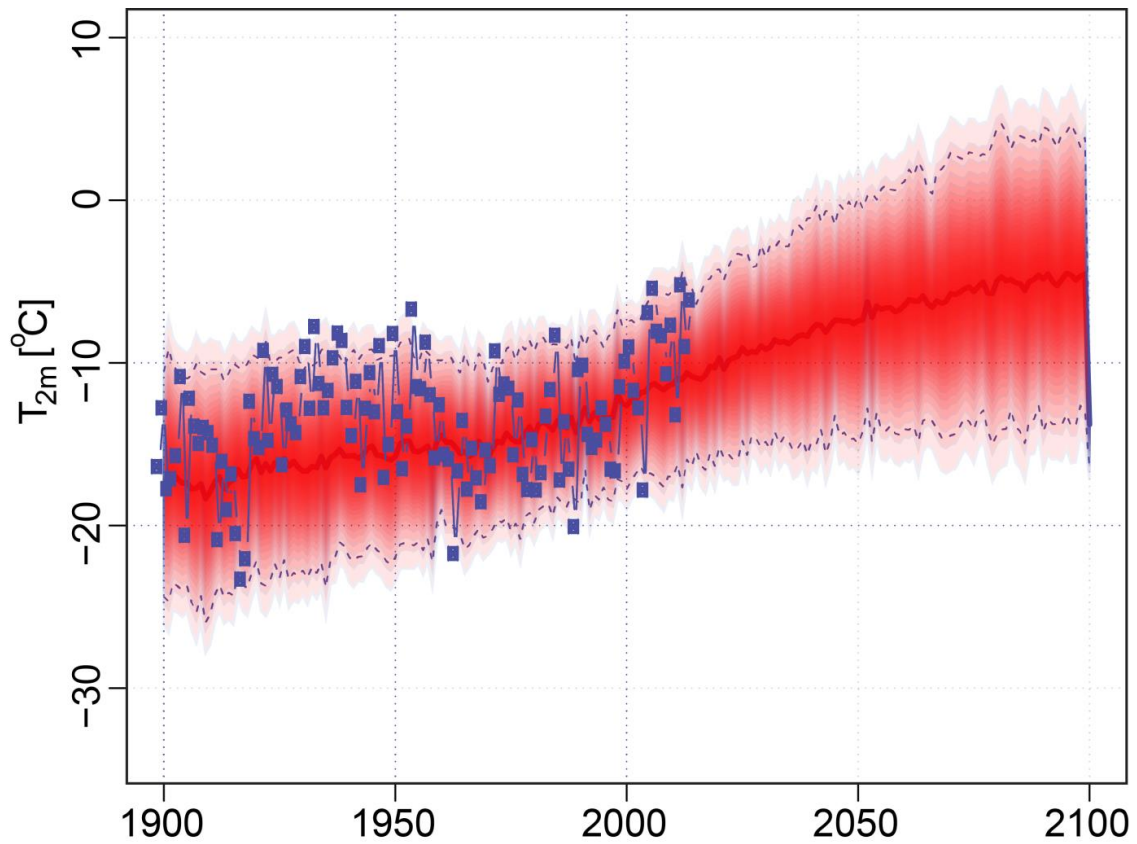
Global modell	Utslipps-scenario	Kontroll		Scenario		Svalb. lufthavn		Ny-Ålesund	
		Periode	Acronym	Periode	Acronym	Temp.	Regn	Temp.	Regn
Max-Planck Inst.	IS92a	1981-2010	MPI92a	2021-2050	MPI92b	-12/-8 °C	7/5 mm	-12/-7 °C	0/0 mm
ECHAM4	SRES B2	1961-1990	MPICN	2071-2100	MPIB2	-13/-6 °C	4/14 mm	-12/-5 °C	0/1 mm
Hadley Centre	SRES A2	1961-1990	HADCN	2071-2100	HADA2	-12/-2 °C	2/36 mm	-11/-3 °C	4/83 mm
HadAM3H	SRES B2	1961-1990	HADCN	2071-2100	HADB2	-12/-2 °C	2/30 mm	-11/-2 °C	4/75 mm
Hadley Centre	SRES A1B	1961-1990	HADA1	2021-2050	HADA1b	-12/-3 °C	4/43 mm	-12/-5 °C	8/57 mm
HadCM3	SRES A1B	1961-1990	HADA1	2071-2099	HADA1c	-12/3 °C	4/76 mm	-12/0 °C	8/158 mm
ECMWF ERA40	Re-analyse	1961-2000	ERA40						

Figur 15 og Tabell 1 viser at simuleringer fra forskjellige modeller kan gi svært forskjellige framskrivinger for årlige gjennomsnittstemperaturer og regnmengder (beregnet som nedbør  $\geq 1$  °C), noe som gjenspeiler usikkerheten forbundet med naturlige variasjoner generelt (Deser m.fl. 2012) og klimasimuleringer spesielt (IPCC 2013b). Det er derimot klart at alle simuleringer predikerer en sterk framtidig økning i vintertemperatur på Svalbard i begge scenarioperiodene sammenlignet med de respektive historiske kontrollperiodene. Alle simuleringer bortsett fra MPI92b-simuleringen (utslippsscenario IS92a) gir også større medianverdi av regnmengde i scenariet sammenlignet med respektiv kontrollperiode (Tabell 1). Enkeltsimuleringer fra de mest moderate scenariene tilsier at medianvinteren ved Svalbard lufthavn i 2021-2050 (MPI92b) og 2071-2100 (MPIB2, utslippsscenario SRES B2) vil kunne ha omtrent samme gjennomsnittstemperaturer i desember-februar som under rekordvinteren 2013-14 (-4,6 °C), sammenlignet med henholdsvis -12 °C (MPI92a) og -13 °C (MPICN) i simuleringer av kontrollperiodene. Enkeltsimuleringer basert på scenario HADA1c (utslippsscenario SRES A1B) predikerer at medianvinteren på slutten av århundret vil ha betraktelig høyere gjennomsnittstemperaturer og større regnmengder, det vil si over 3 °C og 76 mm regn ved Svalbard lufthavn og over 0 °C og 158 mm regn i Ny-Ålesund. Til sammenligning er medianverdiene i kontrollperioden (HADCN) på henholdsvis -12 °C og 8 mm. For de samme scenariene vil hele 97 % (Svalbard lufthavn) og 83 % (Ny-Ålesund) av nedbøren i desember-februar falle som regn, gitt vår terskelverdi på 1 °C.



Figur 15. Årlige gjennomsnittstemperaturer og regnmengder midtvinters i Longyearbyen (Svalbard lufthavn) og Ny-Ålesund basert på enkeltsimuleringer av et sett av Global Circulation Models fra HIRHAM (se Tabell 1). Beregnet regnmengde er her summen av nedbør ved temperatur  $\geq 1$  °C. Svart heltrukket linje observerte verdier. Se Gudmundsson m.fl. (2012) for bakgrunnsinformasjon.

Det er ikke forventet at en enkelt eller et fåtall klimasimuleringer vil gjengi framtidig klimautvikling slik den faktisk vil utarte seg. Derimot vil de gi en mulig utvikling, og man vil ved å kjøre et stort antall klimasimuleringer (ensembler) kunne regne seg fram til sannsynligheter for hvordan temperatur (se Fig. 16) og nedbør vil endre seg i framtida. Klimamodellene gir kun et grovt bilde av nedbørsstatistikken, men også observasjonene kan gi litt feil verdier på grunn av oppfangingsvikt, spesielt når det blåser (Wolff m.fl. 2015). De simulerte økningene i temperatur (Fig. 15, 16) og regnmengde (Fig. 15) vist her er uansett i samsvar med oppsummeringen av et større utvalg klimamodeller, som gir et bilde med økte nedbørsmengder ved høye breddegrader (IPCC 2013b).



Figur 16. Nedskalerte og observerte (svarte symboler; Nordli m.fl. 2014) gjennomsnittstemperaturer midtvinters (desember-februar) på Svalbard lufthavn. Rødt område viser spredningen mellom 108 GCM-simuleringer fra CMIP5-eksperimentet (Flato m.fl. 2013), RCP4.5-scenariet for utslipp av klimagasser, og empirisk-statistisk nedskalering basert på regresjoner og vanlige empiriske ortogonale funksjoner (Benestad 2001). Stiplede linjer indikerer 90 % konfidensintervall basert på spredningen. Den simulerte historiske trenden overensstemmer godt med observert trend for 1900-2013. Modifisert fra Hansen m.fl. (2014).

## 5 Sammenfattende diskusjon

Svalbardvinteren har blitt varmere og mer regnfull, noe som spesielt har kommet til syne det siste tiåret (Fig. 2). I prosjektet Vinterregn har vi dokumentert disse endringene og vist at varmebølger og kraftig regnvær midtvinters kan ha vidtrekkende konsekvenser for naturmiljø, samfunn og viktige økosystemkomponenter. Tilgjengelige nedskalerte klimaframskrivninger tilsier at svalbardvinteren med stor sannsynlighet vil bli enda varmere og mer regnfull i løpet av dette århundret (Fig. 15, 16). Dette vil i så fall kunne medføre økt permafrosttemperatur (Fig. 5), større skredfare og hyppigere bakkeisning (Fig. 7, 8), med økte utfordringer for samfunn og infrastruktur og endringer i plante- og dyrelivet på Svalbard (Fig. 11-14).

Denne rapporten baserer seg på et sett av «case-studies» som sammen gir et innblikk i hvordan mildere og mer regnfullt vintervær i Arktis, og spesielt ekstremepisoder, rammer bredt på tvers av natur og samfunn. Den betydelige vinteroppvarmingen som er observert mange steder i Arktis, inklusive Svalbard, kan forventes å akselerere utover dette århundret (IPCC 2013b). Ekstremvær skjer per definisjon sjelden, og effektene på naturmiljøet kan være vanskelig å dokumentere empirisk. Dette gjelder spesielt i Arktis, hvor det er langt mellom målestasjonene (Rennert m.fl. 2009). De kraftigste vinterregneepisodene på Svalbard ser ut til å være knyttet til situasjoner der en får dannet såkalte atmosfæriske «elver», der store mengder fuktighet transporteres mot Svalbard og Arktis fra fjerntliggende områder (Serreze m.fl. 2015). Våre resultater fra en slik ekstremhendelse tyder på at effekten av et skifte i vinterklima på Svalbards natur og samfunn vil være sterkt relatert til det «tipping point» hvor nedbør relatert til kraftige lavtrykksystemer går over fra å falle som snø til regn, det vil si rundt 0-1 °C. Mens en enkeltsimulering av HADA1c tilsier at *gjennomsnittstemperaturen* midtvinters (desember-februar) ved Svalbard lufthavn kan ligge rundt 3 °C i «medianåret» ved slutten av århundret, antyder andre framskrivninger med moderate utslippsscenarioer medianår med gjennomsnittstemperaturer mellom -2 og -6 °C, altså til dels varmere enn de siste observerte rekordvintrene. På samme måte antyder noen av simuleringene at det aller meste av nedbøren vil komme som regn. Det er derfor ikke usannsynlig at det observerte været i januar-februar 2012, som da kunne karakteriseres som en ekstremhendelse (Hansen m.fl. 2014), vil være innenfor normalen om noen tiår.

Den kraftige umiddelbare permafrostoppvarmingen i løpet av en enkelt vinter antyder at framtidig oppvarming av permafrosten (nær bakkeoverflaten) på Svalbard kan foregå mer som en irregulær enn en gradvis prosess, gitt en økning i hyppigheten av ekstreme varmebølger som den man opplevde i 2012. Simuleringsstudier kan også tyde på at kraftig regnvær vil akselerere oppvarmingen av jordtemperaturen i permafrostområder, og at gjentatte

ekstremvintre (som opplevd i 2011-12) kan føre til at vanligvis stabile permafrostsystemer i enkelte områder kan begynne å tine (Westermann m.fl. 2011). Økt dybde på det aktive laget (Etzelmüller m.fl. 2011) som tiner over permafrosten om sommeren kan medføre betydelig ustabilitet dersom bakken inneholder en del is (Nelson m.fl. 2001), noe som vil redusere stabiliteten i blant annet fjellskråninger (Harris m.fl. 2001a). Det vil også være geotekniske utfordringer knyttet til infrastrukturen på Svalbard hvis permafrosten varmes opp i høyt tempo og eventuelt begynner å tine enkelte steder. I dette prosjektet har vi også vist hvordan samfunn og infrastruktur blir direkte påvirket av endringene i snølaget som oppstår ved varmebølger og kraftig regnvær midtvinters. Sørpeskredene som rammet Longyearbyen i januar-februar 2012 viste at infrastrukturen ikke nødvendigvis er konstruert med tanke på dette. Befolkning og reiseliv på Svalbard opplever også stadig oftere problemer relatert til bakkeising, for eksempel på grunn av stengte flyplasser og redusert framkommelighet i terrenget. Gitt våre klimaframskrivninger er dette forhold som kan bli vanligere i framtidens svalbardvinter, men merk at for eksempel isingsgrad neppe er en lineær funksjon av temperatur og regnmengde. Det vil si at ved en gitt temperaturterskel (i luft og i bakken) vil det reduserte kuldeleret i bakken kunne forhindre at regn og smeltet snø danner bakkeis.

Også overvintrende dyrearter som er avhengige av tilgang til vegetasjon ser ut til å ville påvirkes negativt av de forventede endringene i vinterværet, dersom dette medfører mer hyppigere og kanskje kraftigere isingsepisoder. Fjellreven på sin side opplever en opptur etter isingsvintre på grunn av økt tilgang på reinsdyrkadavre, men denne oppturen er kortvarig (Hansen m.fl. 2013). Vi vet fortsatt ikke hvordan flere kraftige isingsvintre på rad vil gi seg utslag i bestandsutviklingen til reinsdyr eller andre arter, rett og slett fordi dette ikke har skjedd i løpet av overvåkningsperiodene. Hvorvidt de positive effektene av varmere vår og sommer på plantebiomassen (Van der Wal & Stien 2014) og derved reinens vekstrate (Hansen m.fl. 2013) vil føre til en positiv trend i reinsdyrbestandene, avhenger sannsynligvis av hvor hyppig ising blokkerer vegetasjonen i vintrene som kommer. Et annet hittil ubesvart spørsmål er i hvilken grad vegetasjonen i seg selv tolererer ising. Eksperimentelle resultater fra dette prosjektet tyder på at kantlyngens vekst og blomstringsgrad vil kunne påvirkes sterkt av ising, og andre studier antyder at varmere vintre også kan påvirke flere arter gjennom avsmelting og økt eksponering (Semenchuk m.fl. 2013). Slike endringer i vinterklima kan over tid ha betydning for vegetasjonsstruktur og hele økosystem (Cooper 2014). Som for de overvintrende dyreartene er det derimot fortsatt uvisst hvilken betydning endringer i vinterklima vil ha relativt til effektene av en lengre og varmere plantevekstsesong. På samme måte er det uvisst hvordan framskrivningene for temperatur og regnmengde (med et redusert kuldeleret i bakken) vil gi seg utslag i isingsgrad.

## 6 Referanser

- Bartsch, A., Kumpula, T., Forbes, B.C. & Stammler, F. 2010. Detection of snow surface thawing and refreezing in the Eurasian Arctic with QuikSCAT: implications for reindeer herding. *Ecological Applications* 20, 2346-58.
- Benestad, R.E. 2001. A comparison between two empirical downscaling strategies. *International Journal of Climatology* 21, 1645–68.
- Benestad, R.E., Førland, E.J. & Hanssen-Bauer, I. 2002. Empirically downscaled temperature scenarios for Svalbard. *Atmos. Sci. Lett.* 3, 71-93.
- Bjerke, J.W. 2011. Winter climate change: Ice encapsulation at mild subfreezing temperatures kills freeze-tolerant lichens. *Environmental and Experimental Botany* 72, 404-08.
- Bokhorst, S., Bjerke, J.W., Street, L.E., Callaghan, T.V. & Phoenix, G.K. 2011. Impacts of multiple extreme winter warming events on sub-Arctic heathland: phenology, reproduction, growth, and CO<sub>2</sub> flux responses. *Global Change Biology* 17, 2817-30.
- Callaghan, T.V., Carlsson, B.A. & Tyler, N.J.C. 1989. Historical records of climate-related growth in *Cassiope-tetragona* from the Arctic. *Journal of Ecology* 77, 823-37.
- Conway, H. & Raymond, C.F. 1993. Snow stability during rain. *Journal of Glaciology* 39, 635-42.
- Cooper, E.J. 2014. Warmer shorter winters disrupt Arctic terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 45, 271-95.
- Deser, C., Knutti, R., Solomon, S. & Phillips, A.S. 2012. Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nature Clim. Change* 2, 775-79.
- Eckerstorfer, M. 2013. *Snow avalanches in central Svalbard: A field study of meteorological and topographical triggering factors and geomorphological significance*. PhD thesis, University of Oslo.
- Etzelmüller, B., Schuler, T.V., Isaksen, K., Christiansen, H.H., Farbrot, H. & Benestad, R.E. 2011. Modeling the temperature evolution of Svalbard permafrost during the 20th and 21st century. *The Cryosphere* 5, 67-79.
- Fjellestad, A. 2012a. Lengter mot fjorden. In *Svalbardposten* 05. Longyearbyen.

- Fjellestad, A. 2012b. Uka som var så skrekkelig våt. In *Svalbardposten* 06. Longyearbyen.
- Flato, G. m.fl. 2013. Evaluation of Climate Models. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Forchhammer, M. & Boertmann, D. 1993. The muskoxen *Ovibos moschatus* in north and northeast Greenland - population trends and the influence of abiotic parameters on population-dynamics. *Ecography* 16, 299-308.
- Førland, E.J. 1992. *Manual for beregning av påregnelige ekstreme nedbørverdier*. DNMI Report No. 21/92, Norwegian Meteorological Institute.
- Førland, E.J., Benestad, R.E., Flatøy, F., Hanssen-Bauer, I., Haugen, J.E., Isaksen, K., Sorteberg, A. & Ådlandsvik, B. 2009. Climate development in North Norway and the Svalbard region during 1900–2100. *Norsk Polarinstitutt Rapportserie* 128.
- Førland, E.J., Benestad, R.E., Hanssen-Bauer, I., Haugen, J.E. & Skaugen, T.E. 2011. Temperature and precipitation development at Svalbard 1900–2100. *Advances in Meteorology* 893790, 1-14.
- Gilg, O., Sittler, B. & Hanski, I. 2009. Climate change and cyclic predator-prey population dynamics in the high Arctic. *Global Change Biology* 15, 2634-52.
- Grenfell, T.C. & Putkonen, J. 2008. A method for the detection of the severe rain-on-snow event on Banks Island, October 2003, using passive microwave remote sensing. *Water Resources Research* 44, 1-9.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E. & Engen Skaugen, T. 2012. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping – a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 3383–90.
- Hansen, B.B. & Aanes, R. 2012. Kelp and seaweed feeding by High-Arctic wild reindeer under extreme winter conditions. *Poplar Research* 31, 17258.
- Hansen, B.B., Aanes, R., Herfindal, I., Kohler, J. & Sæther, B.-E. 2011. Climate, icing, and wild arctic reindeer: past relationships and future prospects. *Ecology* 92, 1917-23.
- Hansen, B.B., Aanes, R. & Sæther, B.-E. 2010. Feeding-crater selection by high-arctic reindeer facing ice-blocked pastures. *Canadian Journal of Zoology* 88, 170-77.
- Hansen, B.B., Grøtan, V., Aanes, R., Sæther, B.-E., Stien, A., Fuglei, E., Ims, R.A., Yoccoz, N.G. & Pedersen, Å.Ø. 2013. Climate events synchronize the dynamics of a resident vertebrate community in the high Arctic. *Science* 339, 313-15.
- Hansen, B.B., Isaksen, K., Benestad, R.E., Kohler, J., Pedersen, Å.Ø., Loe, L.E., Coulson, S.J., Larsen, J.O. & Varpe, Ø. 2014. Warmer and wetter winters: characteristics and implications of an extreme weather event in the High Arctic. *Environ. Res. Lett.* 9, 114021.
- Harris, C., Davies, M.C.R. & Etzelmüller, B. 2001a. The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost Periglacial Processes* 12, 145-56.



- Harris, C., Haeberli, W., Vonder Mühll, D. & King, L. 2001b. Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: The PACE Project in its global context. *Permafrost Periglacial Processes* 12, 3-11.
- Ims, R.A., Henden, J.-A. & Killengreen, S.T. 2008. Collapsing population cycles. *TREE* 23, 79-86.
- IPCC. 2013a. *Climate change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of working group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge & New York: Cambridge Univ. Press.
- IPCC. 2013b. *Climate change 2014: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge & New York: Cambridge Univ. Press.
- Isaksen, K., Benestad, R.E., Harris, C. & Sollid, J.L. 2007a. Recent extreme near-surface permafrost temperatures on Svalbard in relation to future climate scenarios. *Geophysical Research Letters* 34, L17502.
- Isaksen, K., Sollid, J.L., Holmlund, P. & Harris, C. 2007b. Recent warming of mountain permafrost in Svalbard and Scandinavia. *Journal of Geophysical Research* 112, F02S04.
- Isaksen, K., Vonder Mühll, D., Gubler, H., Kohl, T. & Sollid, J.L. 2000. Ground surface temperature reconstruction based on data from a deep borehole in permafrost at Janssonhaugen, Svalbard. *Annals of Glaciology* 31, 287-94.
- Kausrud, K.L., Mysterud, A., Steen, H., Vik, J.O., Ostbye, E., Cazelles, B., Framstad, E., Eikeset, A.M., Mysterud, I., Solhoy, T. & Stenseth, N.C. 2008. Linking climate change to lemming cycles. *Nature* 456, 93-U3.
- Kohler, J. & Aanes, R. 2004. Effect of winter snow and ground-icing on a Svalbard reindeer population: Results of a simple snowpack model. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 36, 333-41.
- Liestøl, O. 1976. *Pingos, springs and permafrost in Spitsbergen*. Norsk Polarinstitutt Årbok 1975, Norwegian Polar Institute.
- Nelson, F.E., Anisimov, O.E. & Shiklomonov, O.I. 2001. Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature* 410, 889-90.
- Nordli, Ø., Przybylak, R., Ogilvie, A.E.J. & Isaksen, K. 2014. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898-2012. *Polar Research* 33, 21349.
- Onarheim, I., Smedsrud, L., Ingvaldsen, R. & Nilsen, F. 2014. Loss of sea ice during winter north of svalbard. *Tellus A* 66, 23933.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37, 637-69.
- Putkonen, J., Grenfell, T.C., Rennert, K., Bitz, C., Jacobson, P. & Russell, D. 2009. Rain on snow: little understood killer in the north. *EOS Transactions of the American Geophysical Union* 90, 221-23.
- Putkonen, J. & Roe, G. 2003. Rain-on-snow events impact soil temperatures and affect ungulate survival. *Geophysical Research Letters* 30, 4.
- Rennert, K.J., Roe, G., Putkonen, J. & Bitz, C.M. 2009. Soil Thermal and Ecological Impacts of Rain on Snow Events in the Circumpolar Arctic. *Journal of Climate* 22, 2302-15.

- Semenchuk, P.R., Elberling, B. & Cooper, E.J. 2013. Snow cover and extreme winter warming events control flower abundance of some, but not all species in high arctic Svalbard. *Ecology and Evolution* 3, 2586-99.
- Serreze, M.C., Crawford, A.D. & Barrett, A.P. 2015. Extreme daily precipitation events at Spitsbergen, an Arctic Island. *International Journal of Climatology*, n/a-n/a.
- Sollid, J.L., Holmlund, P., Isaksen, K. & Harris, C. 2000. Deep permafrost boreholes in western Svalbard, northern Sweden and southern Norway. *Norwegian Journal of Geography* 54, 186-91.
- Stien, A., Ims, R.A., Albon, S.D., Fuglei, E., Irvine, R.J., Ropstad, E., Halvorsen, O., Langvatn, R., Loe, L.E., Veiberg, V. & Yoccoz, N.G. 2012. Congruent responses to weather variability in high arctic herbivores. *Biology Letters* 8, 1002-05.
- Stien, A., Loe, L.E., Mysterud, A., Severinsen, T., Kohler, J. & Langvatn, R. 2010. Icing events trigger range displacement in a high-arctic ungulate. *Ecology* 91, 915-20.
- Stimberis, J. & Rubin, C.M. 2011. Glide avalanche response to an extreme rain-on-snow event, Snoqualmie Pass, Washington, USA. *Journal of Glaciology* 57, 468-74.
- Uppala, S.M. m.fl. 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 131 2961-3012.
- Van der Wal, R. & Stien, A. 2014. High arctic plants like it hot: a long-term investigation of between-year variability in plant biomass. *Ecology*.
- Westermann, S., Boike, J., Langer, M., Schuler, T.V. & Eitzelmüller, B. 2011. Modelling the impact of wintertime rain events on the thermal regime of permafrost. *The Cryosphere* 5, 945-59.
- Wolff, M.A., Isaksen, K., Petersen-Øverleir, A., Ødemark, K., Reitan, T. & Brækkan, R. 2015. Derivation of a new continuous adjustment function for correcting wind-induced loss of solid precipitation: results of a Norwegian field study. *Hydrology and Earth System Sciences* 19, 951-67.

## Takksigelser

Denne rapporten er en sluttrapport for prosjekt 13/74 i Svalbards miljøvernfond, som har finansiert en stor del av arbeidet. I tillegg har prosjektet blitt finansiert av Centre for Biodiversity Dynamics ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Meteorologisk institutt, Akvaplan-niva, Universitetsstudiene på Svalbard, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet og Universitetet i Aberdeen. Takk til M. Ulsnes, E. Melø og R. Brunvoll for informasjon om flytrafikk og reiseliv, og B. Peeters for hjelp med Figur 15. Vi retter en spesiell takk til alle som har hjulpet til med innsamling av data, samt Sysselmannen på Svalbard for tilgang til overvåkningsdata fra reinsdyrbestandene.