

Støvdempende kjemikalier

Teoretisk vurdering av egenskaper og effekt

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 805



Tittel

Støvdempende kjemikalier

Undertittel

Teoretisk vurdering av egenskaper og effekt

Forfatter

Janne Siren Fjærestad

Avdeling

Teknologi

Seksjon**Prosjektnummer**

C13401/C13420

Rapportnummer

Nr. 805

Prosjektleder

Brynhild Snilsberg

Godkjent av

Brynhild Snilsberg, Dagfin Gryteselv

Emneord

vegstøv, støvdemping, støvbinding, kjemikalier, luftkvalitet, PM10

Sammendrag

Renhold (fjerning av vegstøv) og støvdemping (støvbinding med kjemikalier) av veger er viktige tiltak for å begrense spredning av vegstøv og høye konsentrasjoner av svevestøv/PM10 i uteluft, og det er et stort behov for å øke den grunnleggende kunnskapen om støvdempende tiltak.

Denne rapporten har som mål å øke kunnskapen om hvilke egenskaper ved de støvdempende kjemikalier som har betydning for effekten av støvdemping, og illustrerer gjennom modelleringer og beregninger noen forskjeller mellom ulike kjemikalier som blir brukt for støvbinding.

Title

Road dust binding using chemicals

Subtitle

A theoretical assessment of properties and effects

Author

Janne Siren Fjærestad

Department

Technology

Section**Project number**

C13401/C13420

Report number

No. 805

Project manager

Brynhild Snilsberg

Approved by

Brynhild Snilsberg, Dagfin Gryteselv

Key words

road dust, dust mitigation, dust binding with chemicals, air quality, PM10

Summary

Road cleaning and dust binding with the use of chemicals are important mitigation measures to reduce dispersion of road dust and high concentrations of airborne particles/PM10 in outdoor air. It is important to increase the fundamental knowledge on chemicals used for dust binding.

The goal of this report is to increase the knowledge on properties of the different chemicals that are important for the effect of dust binding, and through modeling and calculations to illustrate some differences between chemicals used in dust binding.



Forord

Denne rapporten er skrevet på oppdrag fra forskningsprosjektet **PrevenTAP** (Preventive measures to reduce the adverse health impact of traffic-related air pollution) som pågår fra 2017 til 2022. PrevenTAP er hovedsakelig finansiert av Norges forskningsråd gjennom deres program på Bedre helse. Hensikten med prosjektet er å se på hvordan man kan bedre luftkvaliteten og redusere helseeffekt fra luftforurensning mest effektivt.

Prosjektet har vært delt inn i fire arbeidspakker:

- **WP1**: Preventive measures to reduce or alter road dust (Brynhild Snilsberg, Statens vegvesen)
- **WP2**: Exposure of volunteers in road tunnels and medical examinations after interventions (Bjørn Hilt, St Olavs hospital)
- **WP3**: Effects of reducing or altering road abrasion PM. Differential or combinatory effects of exhaust and abrasion PM – in vitro/in vivo (Marit Låg, Folkehelseinstituttet)
- **WP4**: Effect of reducing and altering exhaust PM – in vivo (Johan Øvrevik, Folkehelseinstituttet)

Renhold (fjerning av vegstøv) og støvdemping (støvbinding med kjemikalier) av veger er viktige tiltak for å begrense spredning av vegstøv og høye konsentrasjoner av svevestøv/PM10 i uteluft, og det er et stort behov for å øke den grunnleggende kunnskapen om støvdempende tiltak.

Målsettingen med denne rapporten er å øke kunnskapen om hvilke egenskaper ved de støvdempende kjemikaliene som har betydning for effekten av støvdemping. Det er flere viktige egenskaper støvdempende kjemikalier skal tilfredsstillende, men dette er et komplisert fagområde der vi per i dag ikke har kunnskap om alle egenskapene og hvordan de påvirker hverandre.

Rikke Bramming Jørgensen (NTNU) og Brynhild Snilsberg (Statens vegvesen)
Trondheim, november 2021

Innholdsfortegnelse

FORORD	1
INNHOLDSFORTEGNELSE	2
ORDFORKLARINGER	3
1 INNLEDNING	4
2 STØVDEMPING MED KJEMIKALIER	6
2.1 Teoretisk bakgrunn	6
2.2 Når holdes den saltede vegbanen fuktig?	9
2.3 Vannaktivitet for ulike konsentrasjoner av CaCl ₂ og MgCl ₂	11
2.4 Vannaktivitet for blandinger av NaCl og MgCl ₂ (FS30)	13
2.5 Vannaktivitet for sukker	14
2.6 Kalsium magnesium acetat (CMA)	16
2.7 Kaliumformiat (KaFo)	17
2.8 Hvor mye vann får man på vegen?	18
2.9 Konsentrasjon og mengde	21
2.10 Friksjon	22
2.11 Miljø/korrosjon	23
2.12 Pris	24
3 AVSLUTTENDE KOMMENTARER	25
4 VIDERE ARBEID	26
BIBLIOGRAFI	27
APPENDIX A VÆRDATA OSLO 2020	29
APPENDIX B VÆRDATA BERGEN 2020	31
APPENDIX C VÆRDATA KRISTIANSAND 2020	33
APPENDIX D VÆRDATA TRONDHEIM 2020	35
APPENDIX E VÆRDATA TROMSØ 2020	37

Ordforklaringer

PM	Particulate matter / partikulært materiale, ofte kalt svevestøv som er små, luftbårne partikler som varierer i størrelse og sammensetning
PM ₁₀	Partikler mindre enn 10 µm i aerodynamisk diameter
NaCl	Natriumklorid
MgCl ₂	Magnesium(di)klorid
CaCl ₂	Kalsium(di)klorid
CMA	Calcium Magnesium Acetat / kalsium magnesium acetat
KaFo	Kaliumformiat (HCO ₂ K, HCOOK eller CHKO ₂)
RH	Relative humidity / relativ luftfuktighet: forholdet mellom vanndampmengden i luft og den maksimale vanndampmengden som luften kan inneholde om luften var mettet
Duggpunkt	Temperatur der RH=100%, dvs. den temperaturen hvor ikke luften kan holde vann i gassform (vanndamp) og begynner å omdanne dette til dråper f.eks. kondens
Damptrykk (p)	Trykket til damp i likevekt med sin egen fasetilstand som væske eller fast stoff
Metningsdamptrykk	Mål på hvor mange vannmolekyler det er plass til i lufta (lufta er mettet med vann og den klarer ikke holde på flere vannmolekyler)
Vannaktivitet (a)	Forholdet mellom damptrykket for en saltløsning og damptrykket for rent vann ved samme temperatur
ERH	Equilibrium relativ humidity: Den relative luftfuktigheten som er i likevekt med en mettet løsning, dvs. den laveste luftfuktigheten som man kan ha uten at løsningen tørker opp
FS30	Betegnelse på fast salt befuktet med en saltløsning i blandingsforholdet 70/30, dvs 70% salt og 30% saltløsning

1 Innledning

Trafikk-generert svevestøv er en av de dominerende kildene til luftforurensing i bynære områder (Gulia 2019). Eksponering av svevestøv (PM, particulate matter) er helseskadelig, og det er derfor ønskelig å begrense mengden av trafikk-generert svevestøv så mye som mulig. Ulike tiltak blir derfor utført, både preventivt, og i perioder med høye verdier av svevestøv i lufta.

For å redusere mengden av støv som kan virvles opp i lufta utføres rengjøringstiltak med ulike maskiner (B. a. Snilsberg 2016). Flere av maskinene bruker vann enten som del av rengjøringen (f.eks. med høytrykksspyling kombinert med kraftig oppsug) eller for å holde støvet fuktig når det feies for å redusere oppvirvling av støv ved feiing. I perioder med kald vegbane kan ikke vann benyttes, og maskiner som rengjør ved hjelp av kraftig sug/vakuumbenyttes.

Et annet tiltak som benyttes for å redusere oppvirvling av støv fra vegbanen er spredning av saltløsninger eller andre kjemikalier. Disse brukes for å holde vegbanen fuktig, slik at støvet ikke virvles opp av trafikken. Ulike studier er gjort for å undersøke effekten slike tiltak har på svevestøvverdiene.

Effekten av $MgCl_2$ er studert både utendørs og i tunnel. I tunnelstudien ble PM_{10} nivået redusert med 56% (Aldrin, Haff og Rosland 2008). Utendørs rapporterer Gustavsson, et al. (2010) at PM_{10} nivået reduseres med 35–40%, mens Aldrin og Steinbakk (2003) ikke finner noen signifikant effekt. Varigheten av tiltaket i tunnel ble anslått til å være 10 dager (Aldrin, Haff og Rosland 2008), mens utendørs avtok effekten etter 3–4 døgn (Gustavsson, et al. 2010).

Bruk av $CaCl_2$ blir rapportert å redusere PM_{10} nivåene med 35–40% (Gustavsson, et al. 2010), mens Kupiainen, et al. (2011) finner en reduksjon på 40–69%.

I en undersøkelse utført i Göteborg ble effekten av 20g/m² 25% kalsium magnesium acetat løsning (CMA) funnet å redusere PM_{10} verdiene med hhv 32% og 26% første og andre døgnet etter påføring. En tilsvarende effekt ble funnet ved bruk av sukkerløsning (Sjöstedt og Derneryd 2007). Studien til Gustavsson, et al. (2010) rapporterer at bruk av CMA reduserer PM_{10} verdiene ned 35–40% i 3–4 dager. Gustavsson, et al. (2010) finner altså samme støvdempende effekt av CMA, $CaCl_2$, $MgCl_2$, og sukker, det er likevel verdt å merke seg at $CaCl_2$ er benyttet i en lavere konsentrasjon enn de andre kjemikaliene (10% mot 25% for de andre).

Bruk av salt har dessverre også negative effekter på miljøet (Ramakrishna og Viraraghavan 2005), (Fay og Shi 2012). Det fører i tillegg til økt korrosjon på biler og infrastruktur (Xu og Shi 2018), og gir også indirekte økt asfalslitasje, da våt asfalt slites 3–5 ganger raskere enn tørr asfalt (Snilsberg og Gryteselv 2017). Salting medfører i tillegg både materielle og

operasjonelle kostnader. Det er derfor ønskelig å optimere saltbruken. For å kunne gjøre det er det nødvendig å vite hvilket salt som er best under hvilke forhold.

De ulike studiene er utført under ulike klimatiske forhold og med ulike konsentrasjoner og mengder. Den rapporterte effekten av tiltakene variere, og det er derfor utfordrende å dra konklusjoner om hvilke kjemikalier som er mest effektive under hvilke klimatiske forhold. I denne rapporten er det derfor lagt vekt på å beskrive hvorfor støvdempende kjemikalier fungerer. Det er hovedsakelig fokusert på ulike saltløsninger, da tilgangen til en termodynamisk modell gjør det mulig å beregne viktige parameter for disse ved ulike temperaturer og blandingsforhold. Videre brukes disse beregningene til å forklare når de ulike saltløsningene kan virke støvdempende. Det vurderes videre også hvilke mengder som trengs av de ulike saltene for å holde en tilstrekkelig mengde fuktighet på veggen.

2 Støvdemping med kjemikalier

2.1 Teoretisk bakgrunn

En strategi for å redusere mengden svevestøv i lufta er å holde vegbanen våt/fuktig. Støvet vil da kunne feste seg til vegbanen og også pakkes sammen til tyngre partikler som ikke virvles like lett opp.

Om vegbanen er tørr eller fuktig, og hvor fort den tørker opp avhenger av en rekke metrologiske parametere:

- Vegbanetemperatur
- Lufttemperatur
- Fuktigheten i lufta (RH)
- Vind
- Nedbør

Lufta inneholder alltid en del vannmolekyler. Hvor mange vannmolekyler det er plass til i lufta avhenger av lufttemperaturen. Varm luft har plass til flere vannmolekyler enn kald luft. $p_{v,a}^{sat}$ er metningsdamptrykket i lufta ved en gitt temperatur, og er et mål på hvor mange vannmolekyler det er plass til i lufta.

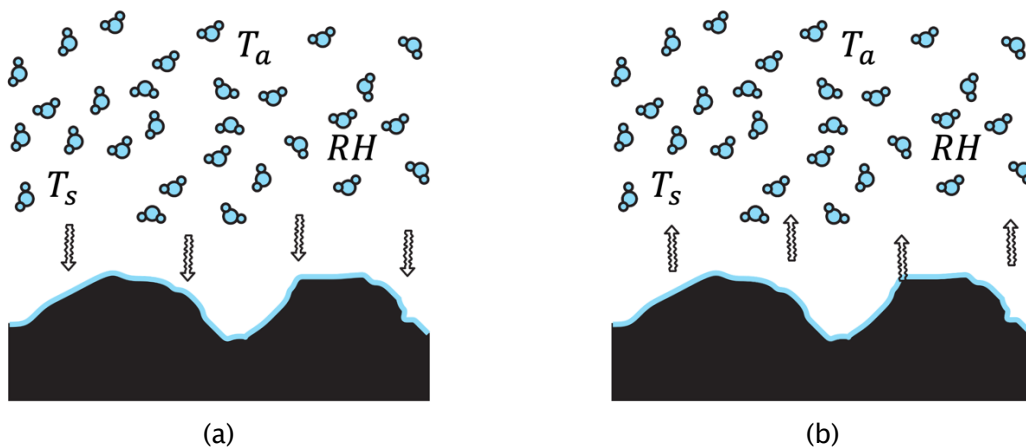
Den relative luftfuktigheten, RH, er definert som forholdet mellom det aktuelle damptrykket i lufta, $p_{v,a}$, og metningsdamptrykket, $p_{v,a}^{sat}$, ved samme temperatur:

$$RH = \frac{p_{v,a}}{p_{v,a}^{sat}} * 100$$

$p_{v,a}^{sat}$ er kun avhengig av temperatur, og siden $p_{v,a}^{sat}$ faller når temperaturen faller vil RH stige når temperaturen faller. Den temperaturen som gir RH = 100% kalles duggpunktet.

Figur 1 viser hva som skjer med vannmolekylene i lufta og på vegbanen under ulike forhold når det ikke er salt til stede.

Dersom vegbanetemperaturen, T_s er lavere enn duggpunktet, T_d , vil vannmolekyler fra lufta gjøre den kalde vegbanen fuktig eller våt som vist i Figur 1(a). Er vegbanetemperaturen, T_s , høyere enn duggpunktet vil eventuell fuktighet på vegbanen begynne å fordampe som vist i Figur 1(b).



Figur 1: (a) Når vegbanetemperaturen er lavere enn duggpunktet transporteres vannmolekyler fra lufta til vegen, og vegen blir våt. (b) Når vegbanetemperaturen er høyere enn duggpunktet transporteres vannmolekyler fra vegen til lufta, og vegen tørker opp. Illustrasjon: Alex Klein-Paste.

Støvdemping med kjemikalier utføres for å holde vegbanen fuktig/våt lenger enn ved bruk av vann. Med salt på vegbanen må vegbanetemperaturen ikke lenger være under duggpunktet for at den skal bli eller holdes fuktig.

Dette skjer fordi en blanding av salt og vann har lavere damptrykk enn rent vann ved samme temperatur. Vannmolekylene foretrekker å være der det er lavest damptrykk, så når damptrykket i saltløsningen er lavere enn damptrykket i lufta, transporteres vannmolekylene fra lufta til løsningen. Dette er også grunnen til at frysepunktet for vann senkes når man tilsetter salt; løsningen holdes flytende så lenge damptrykket for løsningen er lavere enn damptrykket for is.

Hvor mye damptrykket senkes når salt blandes i vannet avhenger av flere ting:

- Temperatur
- Hvilket salt
- Mengde salt som tilsettes

Damptrykket for en løsning ved en gitt temperatur og konsentrasjon kan finnes eksperimentelt, men dette er naturligvis veldig tidkrevende. Forholdet mellom damptrykket for en saltløsning, p_v^{sol} , og damptrykket for rent vann, p_v^{water} , ved samme temperatur kalles vannaktivitet, a_w^{sol} :

$$a_w^{sol} = \frac{p_v^{sol}}{p_v^{water}}$$

Vannaktiviteten kan finnes ved hjelp av termodynamiske modeller, noe som gjør det mulig å beskrive ulike løsninger ved ulike temperaturer. En annen fordel med vannaktiviteten er at man kan sammenligne den direkte med den relative luftfuktigheten (i brøkdeler, ikke i prosent) for å bestemme retningen på fukttransporten. Dette forutsetter at temperaturen er lik på vegbanen som i lufta.

Vannaktiviteten er et tall mellom 0 og 1. Rent vann har vannaktivitet 1 og vannaktiviteten faller når man tilsetter kjemikalier.

Grafer som viser hvordan lufttemperatur og luftfuktighet varierte gjennom 2020 for Oslo, Bergen, Kristiansand, Trondheim og Tromsø er vist i Appendix A til Appendix E. Dataene er hentet fra Meteorologisk institutt sine målestasjoner via deres API.

2.2 Når holdes den saltede vegbanen fuktig?

Ved å anta at vegbanetemperaturen og lufttemperaturen er lik, kan man altså bestemme retningen på fukttransporten mellom lufta og vegbanen ved å sammenligne vannaktiviteten til saltløsningen på bakken med RH.

Dersom $RH = a_w$ er det likevekt mellom vann og vanndamp, det vil si at det ikke er noen netto transport av vann mellom lufta og vegbanen. Husk at man her må benytte RH uttrykt som brøkdeler, dvs et tall mellom 0 og 1.

Dersom $RH > a_w$ vil vann transporteres fra lufta til saltløsningen på vegbanen. Dette vil gjøre at saltløsningen tynnes ut, og vannaktiviteten vil øke til det oppstår likevekt mellom lufta og saltløsningen. Dette er altså den ønskelige situasjonen for støvdemping.

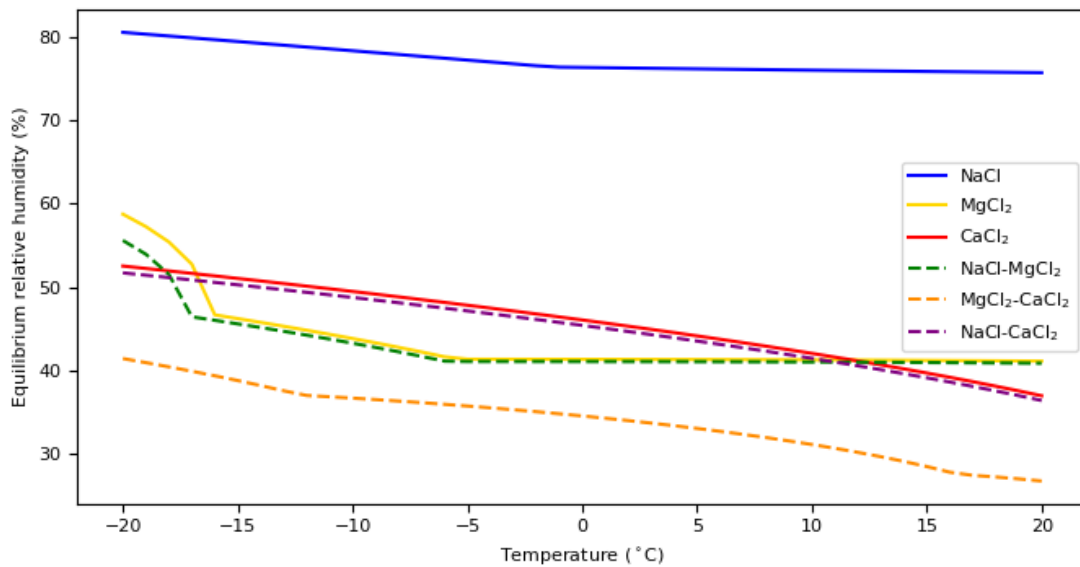
Dersom $RH < a_w$ vil vann fordampe fra saltløsningen og vannaktiviteten synke. Fordampingen fortsetter enten til likevekt oppstår eller til vegbanen er tørr.

Ulike kjemikalier kan løses i vann i ulike mengder. Jo høyere konsentrasjon løsningen har, jo lavere vannaktivitet. En mettet løsning har altså den laveste vannaktiviteten som er mulig for den aktuelle kjemikalien. Den relative luftfuktigheten som er i likevekt med en mettet løsning kalles ERH (Equilibrium relativ humidity) og det er dermed den laveste luftfuktigheten som man kan ha uten at løsningen tørker opp. Man kan derfor lese fra ERH ved hvilke luftfuktigheter ulike salter tiltrekker seg fuktighet, og dermed kan holde vegbanen fuktig.

Figur 2 kan man se beregnet ERH for NaCl, MgCl₂ og CaCl₂ og blandinger av disse. Beregningene er gjort ved hjelp av UNIQUAC-modellen (Thomsen 2005). Modellen er gyldig fra frysetemperatur til 110 °C, og modellens nøyaktighet for beregning av vannaktivitet er ± 5%. Beregningene vist i Figur 2 er også publisert tidligere på en annen form (Wählin, et al. 2017). Rene salter er vist med heltrukken linje, og blandingsene er vist med stiplede linje.

Figuren viser at jo lavere temperatur det er, jo høyere luftfuktighet trengs for at disse saltene skal tiltrekke seg fuktighet.

- NaCl (blå kurve) tiltrekker seg fuktighet for $RH > 81\%$ ved -20 °C og for $RH > 76\%$ ved $+20\text{ °C}$.
- MgCl₂ (gul kurve) tiltrekker seg fuktighet for $RH > 59\%$ ved -20 °C , ved $RH > 46\%$ ved -15 °C og for $RH > 41\%$ ved $+20\text{ °C}$
- CaCl₂ (rød kurve) tiltrekker seg fuktighet for $RH > 53\%$ ved -20 °C , ved $RH > 46\%$ ved 0 °C og ved $RH > 37\%$ ved $+20\text{ °C}$.



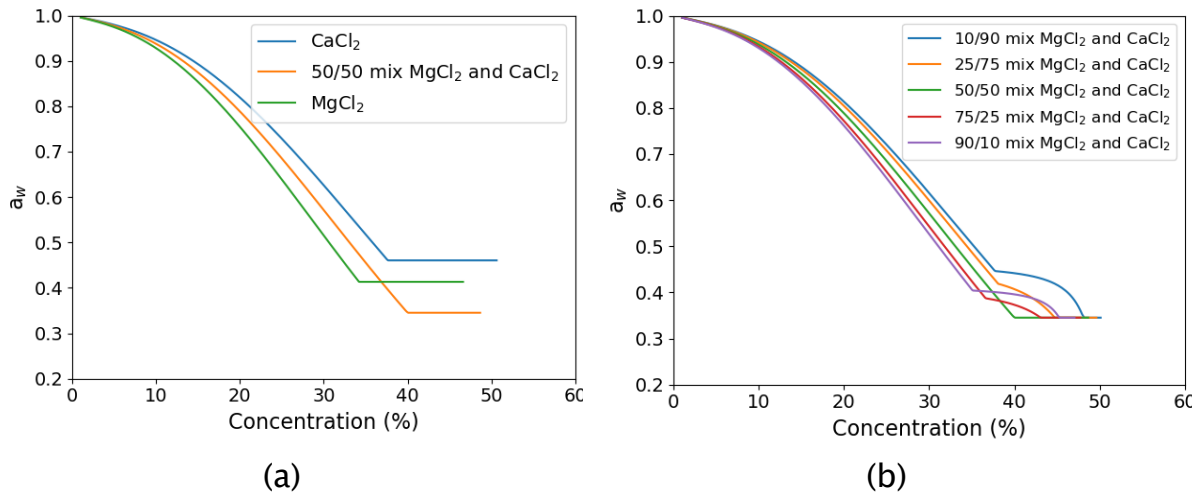
Figur 2: Viser likevekts relativ luftfuktighet (ERH) som funksjon av temperatur for NaCl, MgCl₂, CaCl₂ og blandinger av de. ERH angir laveste relativ luftfuktighet der vegbanen kan holdes fuktig ved bruk av de ulike kjemikaliene.

Man ser altså at av rene saltløsningene så er det MgCl₂ som trekker til seg fuktighet ved lavest luftfuktighet for temperaturer mellom -16 °C og + 12 °C. Når det er kaldere enn -16 °C eller varmere enn +12 °C er det CaCl₂ som tiltrekker fuktighet ved de laveste luftfuktighetene.

Videre ser man at en blanding av NaCl og MgCl₂ stort sett følger kurven til MgCl₂, og at en blanding av NaCl og CaCl₂ stort sett følger kurven til CaCl₂. Blander man derimot MgCl₂ og CaCl₂ får man en løsning som trekker til seg fuktighet ved lavere RH enn både MgCl₂ og CaCl₂ hver for seg.

2.3 Vannaktivitet for ulike konsentrasjoner av CaCl_2 og MgCl_2

Figur 3 viser vannaktivitet som funksjon av konsentrasjon for MgCl_2 , CaCl_2 og ulike blandinger av disse ved 0°C . Som forventet faller vannaktiviteten ved stigende konsentrasjon.



Figur 3: Viser vannaktivitet som funksjon av konsentrasjon for MgCl_2 , CaCl_2 og ulike blandinger av de ved 0°C . For blandningene er det totalkonsentrasjonen av salt som kan leses på x-aksen. I (a) ser man at en 50/50 blanding (oransje) kan oppnå lavere vannaktivitet enn de to saltene hver for seg. (b) viser vannaktiviteten for ulike blandingsforhold fra 10% MgCl_2 og 90% CaCl_2 (blå) til 90% MgCl_2 og 10% CaCl_2 (lilla).

Fra Figur 3(a) kan man lese at dersom man påfører en gitt mengde 20 % MgCl_2 løsning ved 0°C har den en vannaktivitet på 0.75. Den vil derfor være i likevekt med luften når $\text{RH} = 75\%$. Det vil si at ved $\text{RH} = 75\%$ vil den påførte mengden løsning bli liggende på veggen og det er ikke noen netto kondensering eller fordamping av vann til/fra vegbanen. Dersom det er høyere luftfuktighet enn 75% vil fuktighet fra luften tynde ut løsningen og mengden vann på veggen øke. Denne prosessen pågår til løsningen har en vannaktivitet som er lik den relative luftfuktigheten. Dersom den relative luftfuktigheten er lavere enn 75% vil vann fra løsningen fordampe og konsentrasjonen stige inntil vannaktiviteten blir lik den relative luftfuktigheten.

Den horisontale streken ved høye konsentrasjoner indikerer at metningspunktet for løsningen er nådd ved konsentrasjonen der utfelingen starter. Tilsetter man mer salt enn metningskonsentrasjonen får man en blanding av en løsning (med metningskonsentrasjonen) og utfelt salt. Derfor faller ikke vannaktiviteten selv om man tilsetter mer salt. For MgCl_2 er laveste vannaktivitet 0.41 noe som betyr at veggen tørker helt opp når $\text{RH} < 41\%$, som det også kom frem av Figur 2.

I Figur 3(a) ser man i tillegg til de rene saltene også en 50/50 blanding av MgCl_2 og CaCl_2 . Vi ser at denne blandingen oppnår lavere vannaktivitet enn de to saltene hver for seg. Hvilken blanding som har lavest vannaktivitet avhenger av den totale saltkonsentrasjonen. For konsentrasjoner $< 36\%$ har MgCl_2 lavere vannaktivitet enn blandingen av MgCl_2 og CaCl_2 .

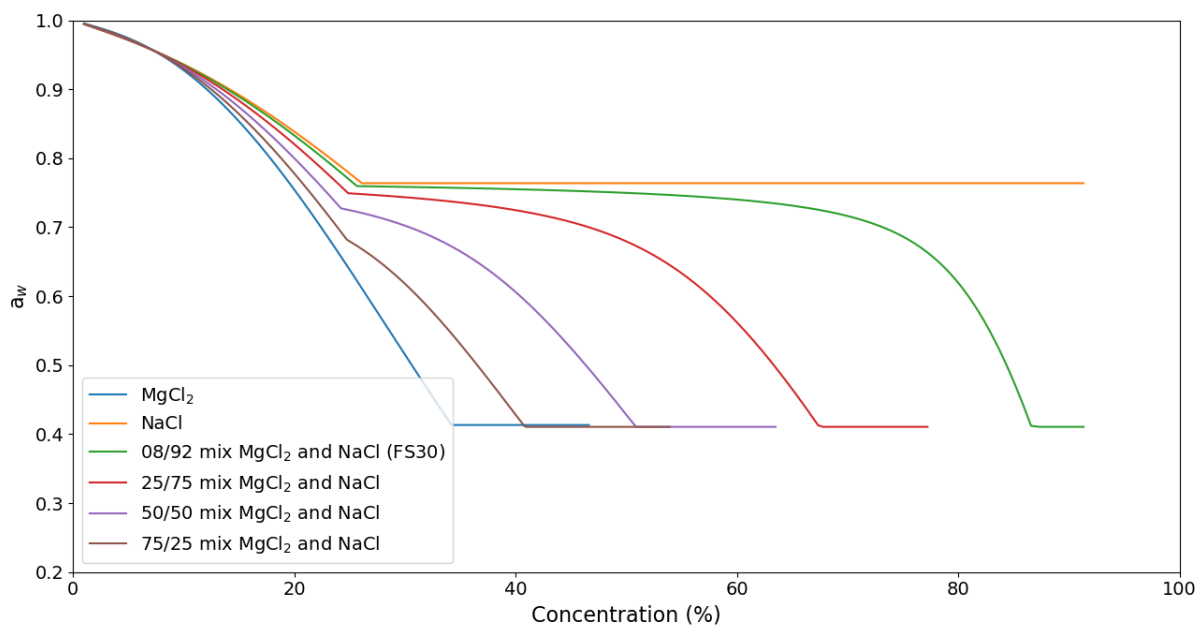
Figur 3(b) viser vannaktiviteten for ulike blandingsforhold av de to saltene seg imellom, varierende fra 10% MgCl_2 og 90% CaCl_2 til 90% MgCl_2 og 10% CaCl_2 i de ulike grafene. Man ser de horisontale linjene ved en vannaktivitet lik 0.35 for alle de ulike blandingsforholdene. Altså at den laveste vannaktiviteten til en blanding av MgCl_2 og CaCl_2 er uavhengig av blandingsforholdet de imellom. Den totale saltkonsentrasjonen som gir mettet løsning avhenger av likevel av dette blandingsforholdet.

2.4 Vannaktivitet for blandinger av NaCl og MgCl₂ (FS30)

FS30 er betegnelsen på fast salt fuktet med en saltløsning i blandingsforholdet 70/30, dvs 70% salt og 30% saltløsning. I Norge benyttes gjerne NaCl befuktet med MgCl₂ løsning. Blandingen benyttes som friksjonstiltak, både preventivt og under snøvær. En vanlig dosering er 14 g tørr NaCl befuktet med 6 g 20% MgCl₂ løsning (Holen 2015). Dette tilsvarer altså 14 g NaCl, 1.2 g MgCl₂ og 4.8 g H₂O. Total saltkonsentrasjon for denne blandingen blir da 76%, hvorav 92% NaCl og 8% MgCl₂.

Figur 4 viser hvordan vannaktiviteten for NaCl (oransje), MgCl₂ (blå) og ulike blandinger av de varierer med saltkonsentrasjonen ved 0°C. Den grønne grafen viser vannaktiviteten for en blanding av NaCl og MgCl₂ med et blandingsforhold som tilsvarer det som betegnes som FS30 i Norge. Merk at FS30 har en saltkonsentrasjon på 76%. FS30 har altså en vannaktivitet lik 0.67 ved påføring. En mettet løsning med NaCl har til sammenligning en vannaktivitet på 0.76.

Man ser videre fra vannaktiviteten for andre blandingsforhold mellom NaCl og MgCl₂ at den laveste mulige vannaktiviteten er lik for alle og dermed uavhengig av blandingsforholdet. Det som varierer med blandingsforholdet er ved hvilken total saltkonsentrasjon denne laveste vannaktiviteten oppstår.



Figur 4: Viser vannaktivitet som funksjon av total saltkonsentrasjon konsentrasjon for NaCl, MgCl₂ og ulike blandinger av de ved 0°C.

2.5 Vannaktivitet for sukker

UNIQUAC modellen som er brukt over, kan ikke brukes til å beregne vannaktivitet for sukkerløsninger. Innenfor matindustrien er imidlertid vanninnhold og vannaktivitet viktige parametere, og vannaktiviteten for ulike sukkerløsninger kan finnes i litteraturen. Tabell 1 under viser vannaktivitet for glukose ved ulike temperaturer (Lewicki 2009).

Tabell 1: Vannaktivitet for glukose ved ulike temperaturer (Lewicki 2009).

Concentration (%)	Water Activity at Temperature (°C)			
	20	25	30	35
<i>Glucose</i>				
30.0	0.954	0.955	0.956	0.957
35.0	0.942	0.943	0.944	0.945
40.0	0.927	0.929	0.930	0.930
45.0	0.910	0.912	0.913	0.914
50.0	0.891	0.891	0.893	0.895
55.0	0.865	0.867	0.869	0.870
60.0	0.835	0.837	0.839	0.841

Source: Adapted from Viet Bui, A., Minh Nguyen, H., and Muller, J., *J. Food Eng.*, 57, 243, 2003.

Vannaktiviteten i Tabell 1 er for temperaturer fra 20°C og oppover. I dette temperaturområdet ser man at vannaktiviteten for glukose i veldig liten grad avhenger av temperatur. Fra denne tabellen ser man at en 30 % løsning med glukose tar til seg vann for $RH > 95\%$ og at en 60 % løsning tar til seg vann for $RH > 84\%$. Det vil si at glukose altså krever høyere luftfuktighet enn NaCl for å holde vegbanen fuktig.

Tabell 2 viser vannaktiviteten for ulike sukkertyper og konsentrasjoner. Det er liten variasjon mellom de ulike sukkertypene. Det er rapportert at sukker har like god støvdempende effekt som CMA (Sjöstedt og Derneryd 2007) og som $MgCl_2$ og $CaCl_2$ (Gustavsson, et al. 2010). Vannaktivetsdataene til sukker kan tyde på at det kanskje er andre egenskaper ved sukker, enn evnen til å holde vegbanen fuktig, som gjør at det rapporteres tilsvarende effekt for sukker som for $MgCl_2$ og $CaCl_2$.

Tabell 2: Vannaktivitet for ulike sukkerløsninger (Lewicki 2009).

Glucose		Fructose		Sucrose		Maltose	
<i>W</i>	<i>a_w</i>	<i>W</i>	<i>a_w</i>	<i>W</i>	<i>a_w</i>	<i>W</i>	<i>a_w</i>
0.049	0.995	0.049	0.995	0.049	0.998	0.046	0.998
0.096	0.990	0.096	0.989	0.096	0.995	0.091	0.995
0.142	0.983	0.142	0.985	0.142	0.991	0.134	0.990
0.186	0.977	0.186	0.978	0.186	0.989	0.176	0.988
0.229	0.970	0.229	0.971	0.228	0.985	0.217	0.984
0.272	0.962	0.274	0.965	0.270	0.980	0.258	0.979
				0.292	0.974		
				0.349	0.967		
				0.399	0.958		
				0.445	0.948		

Source: Adapted from Valezmore, C., Meirelles, A.J., and Vitali, A., in *Engineering & Food at ICF 7*, Jowitt, R. (Ed.), Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, 1997, pp. A145–A148.

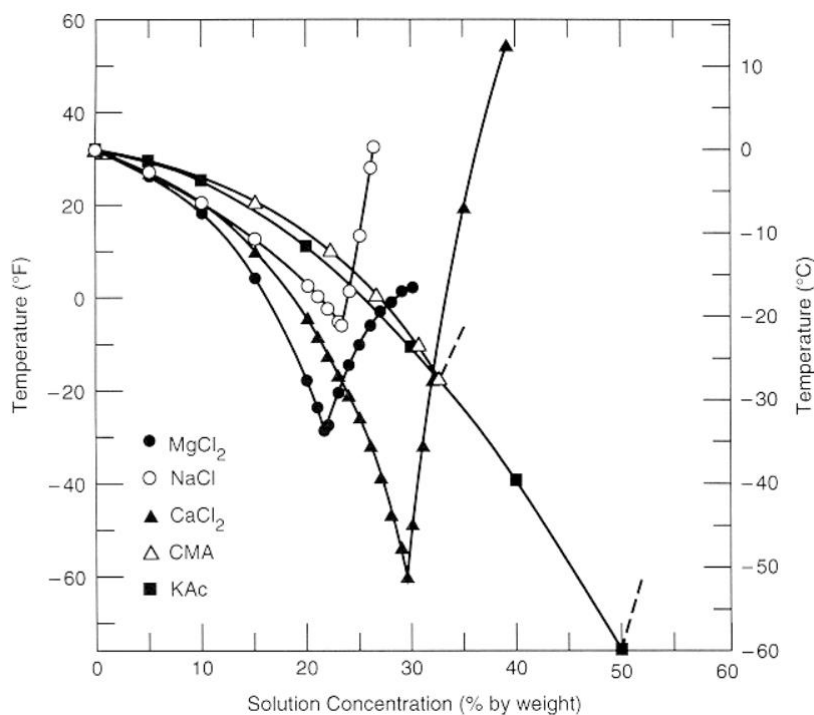
Note: *W*, weight fraction for solute.

2.6 Kalsium magnesium acetat (CMA)

UNIQUAC modellen kan heller ikke brukes for CMA. For konsentrasjoner lavere enn eutektisk konsentrasjonen (konsentrasjonen som gir det laveste smeltepunktet blandingen kan ha) kan vannaktiviteten, a_w , likevel estimere fra frysepunktnedsettelsen til en løsning:

$$\Delta T = \frac{K_f}{M_w} \ln a_w$$

der ΔT er frysepunktnedsettelsen, K_f er den kryoskopiske konstant (= 1.86 K kg/mol) og M_w er den molare vekta av vann (Wåhlin, et al. 2017). Frysepunktnedsettelsen for ulike konsentrasjoner kan leses av fasediagrammet som vist i Figur 5. CMA har en frysepunktnedsettelse på ca 26 grader ved en konsentrasjon på 32%. Vannaktiviteten for en 32% løsning av CMA kan da beregnes å være 0.78, dvs at luftfuktigheten må være høyere enn 78% for å hindre uttørking. Dette er betydelig høyere enn MgCl_2 og CaCl_2 . Likevel rapporteres CMA å ha tilsvarende effekt som MgCl_2 og CaCl_2 (Gustavsson, et al. 2010).



Figur 5: Fasediagram for ulike kjemikalier som benyttes til støvdemping og vinterdrift (Ketcham, et al. 1996).

2.7 Kaliumformiat (KaFo)

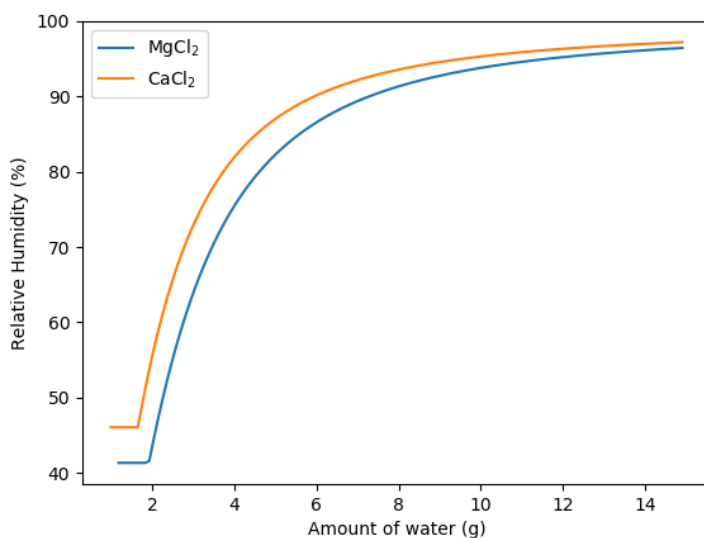
På samme måte som for CMA kan vannaktiviteten estimeres fra frysepunktnedsettelsen i fase diagrammet i Figur 5. Ved en konsentrasjon på 50% blir da vannaktiviteten til KaFo 0.58. Den høye konsentrasjoner medfører imidlertid at store mengder kjemikalier må benyttes for å holde tilstrekkelige mengder vann på vegbanen. Ved konsentrasjoner på 20–30% er frysepunktet til KaFo høyere enn for både NaCl, MgCl₂ og CaCl₂, og man følgelig anta at vannaktiviteten også er høyere. Dvs at KaFo trolig krever høyere luftfuktighet for å holde vegbanen fuktig enn NaCl, MgCl₂ og CaCl₂.

2.8 Hvor mye vann får man på vegen?

Ulike studier viser altså at støvbinding med salter reduserer mengden svevestøv i lufta en periode etter påføring. Det er derimot ikke kjent hvor mye væske som nødvendig på vegbanen for å oppnå tilstrekkelig reduksjon i oppvirvlingen av støvet. NORTRIP-modellen (Denby, et al. 2013) som ved å modellere varme- og massefluksen til og fra vegbanen estimerer mengden svevestøv i lufta legger til grunn at man må ha 100 g/m² vann på vegbanen for å oppnå maksimal støvdempende effekt. Det antas videre en lineær reduksjon av støvbindingseffekten ned til 40 g/m². NORTRIP-modellen antar at lavere mengder vann på vegen ikke gir noen støvbindende effekt. Det bør merkes at 40g/m² ikke er noen fasit på nødvendig vannmengde for å oppnå støvbindende effekt, da dette ikke er verifisert gjennom praktiske forsøk. Det er mulig den reelle grenseverdien er lavere. 40g/m² blir brukt i beregningene videre som et utgangspunkt for å illustrere hvordan beregninger kan gjøres.

For å vurdere de ulike kjemikaliene opp mot hverandre er det altså interessant å se på hvor mye vann de kan ta til seg under ulike forhold, og om det er forskjeller mellom dem. For å undersøke dette er vannaktiviteten for 1 gram salt og ulike mengder vann beregnet. Denne vannaktiviteten tilsvarer altså den relative luftfuktigheten der løsningen er i likevekt med lufta.

Figur 6 viser ved hvilken luftfuktighet en løsning med 1 g salt og ulike mengder vann er i likevekt med lufta for MgCl₂ og CaCl₂ ved 0°C. De horisontale linjene tilsvarer ERH vist i Figur 2, altså den relative luftfuktigheten som er i likevekt med den mettede løsningen. Reduksjon av vann fra en mettet løsning gir utfelling av salt, og ERH opprettholdes. Av figuren ser man at hvert gram MgCl₂ kan ta til seg mer vann enn hver gram CaCl₂ kan ved samme luftfuktighet.



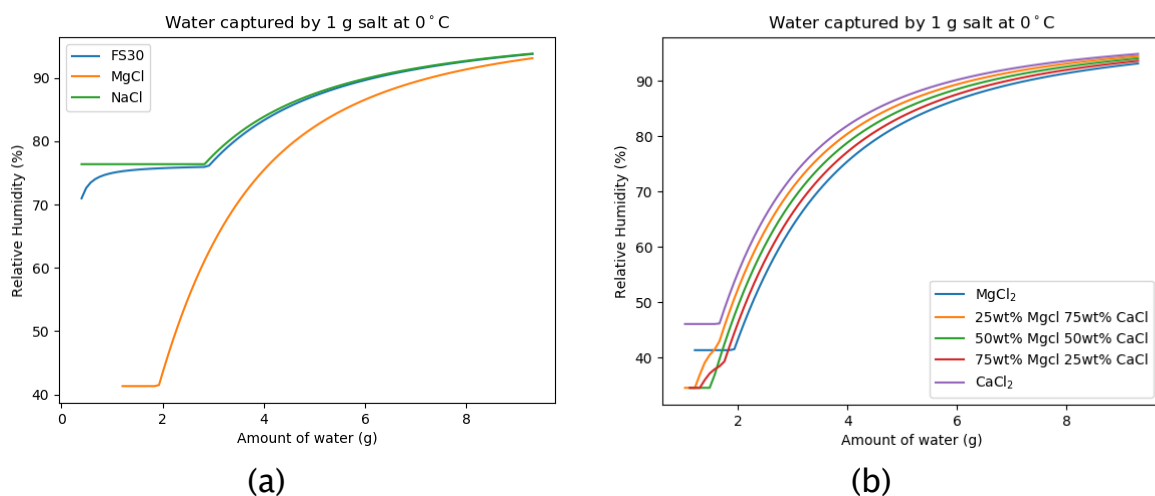
Figur 6: Viser ved hvilken luftfuktighet en løsning med 1 g salt og ulike mengder vann er i likevekt med lufta 0°C. De horisontale linjene viser likevekts relativ fuktighet (ERH) for de mettede løsningene.

Beregningene i Figur 6 kan brukes til å estimere hvor mye salt som må brukes for å kunne holde tilstrekkelig mengde vann på vegbanen. Man ser f.eks. at ved $RH = 75\%$ vil en $MgCl_2$ -løsning i likevekt med lufta inneholde 1 g $MgCl_2$ og 4 g vann, noe som tilsvarer en saltkonsentrasjon på 20%. Tilsvarende for $CaCl_2$ er 1 g salt og 3.2 g vann, altså en saltkonsentrasjon på 24%.

Ønsker man at det skal bli værende 40 g/m² vann på vegen ned til $RH = 75\%$, må man altså ifølge beregningene bruke 10 g/m² $MgCl_2$ eller 12.5 g/m² $CaCl_2$. Merk at dette er saltmengder, ikke mengder av utblandet løsning. $MgCl_2$ er derfor fordelaktig fremfor $CaCl_2$ for å redusere det totale saltforbruket.

Figur 7 (a) viser ved hvilken luftfuktighet en løsning med 1 g salt og ulike mengder vann er i likevekt med lufta for NaCl, $MgCl_2$ og blandingsforholdet av de to som tilsvarer FS30 ved 0°C. Her ser man at hvert gram $MgCl_2$ kan holde på mer vann enn hvert gram NaCl for alle luftfuktigheter. Man ser også at FS30 har tilnærmet samme evne til å holde på vann som rent NaCl.

I Figur 7 (b) ser man samme beregning for $MgCl_2$, $CaCl_2$ og ulike blandingsforholdet av de to ved 0°C. Her ser man at blandingen stort sett plasserer seg mellom de rene løsningene. Unntaket er for høye konsentrasjoner (lite vann), der man ser igjen at blandingene av $MgCl_2$ og $CaCl_2$ kan holde på vann ved en lavere luftfuktighet enn de rene saltløsningene.

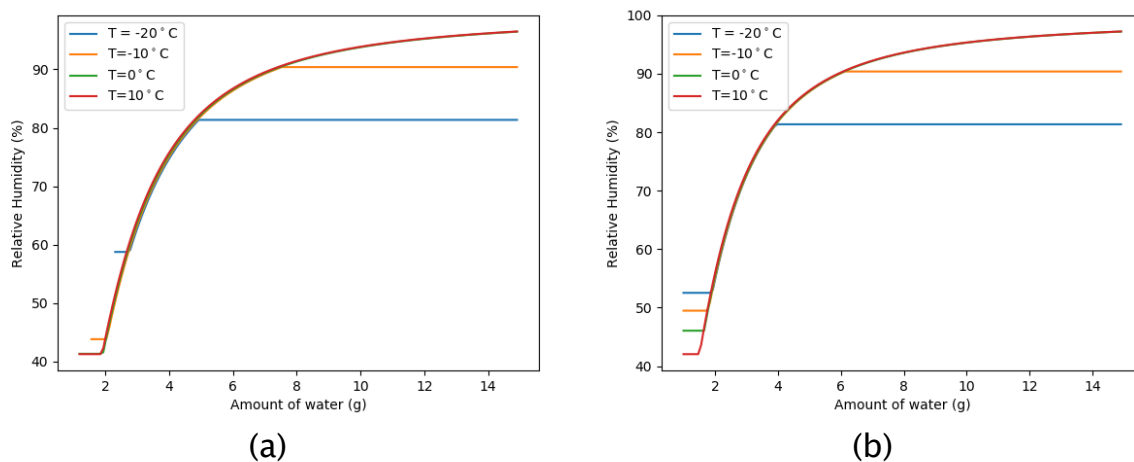


Figur 7: Viser ved hvilken luftfuktighet en løsning med 1 g salt og ulike mengder vann er i likevekt med lufta. I (a) vises NaCl, $MgCl_2$ og en blanding tilsvarende FS30, i (b) vises $MgCl_2$, $CaCl_2$ og ulike blandinger av de.

Alle beregningene vist i figurene over er gjort ved en temperatur på 0 °C. I Figur 8 er det vist hvordan temperaturen påvirker vannopptaket til $MgCl_2$ i (a) og $CaCl_2$ i (b).

Figur 8 (a) viser at temperaturen i svært liten grad påvirker hvor mye vann 1 g MgCl_2 kan holde på. Den blå linjen viser vannopptaket ved $-20\text{ }^\circ\text{C}$ (blå linje). Nå ser vi også at for vannmengder $> 4.9\text{ g}$ er den relative luftfuktigheten i likevekt med løsningen konstant. Dette kommer av at frysekonsentrasjonen for MgCl_2 ved $-20\text{ }^\circ\text{C}$ er 17%, noe som tilsvarer 1 g salt og 4.9 g vann. Videre tilførsel av vann vil da kun øke mengden is og ikke endre damptrykket over isen. Utflating av den oransje linjen for vannmengder over 6.7 g stemmer overens med frysekonsentrasjonen for MgCl_2 ved $-10\text{ }^\circ\text{C}$ på 13%.

Figur 8 (b) viser at temperaturen også i liten grad påvirker hvor mye vann 1 g CaCl_2 kan ta opp. Ved $-20\text{ }^\circ\text{C}$ (blå linje) er frysekonsentrasjonen for CaCl_2 20% og ved $-10\text{ }^\circ\text{C}$ (oransje linje) er frysekonsentrasjonen 14%.



Figur 8: Viser ved hvilken luftfuktighet en løsning med (a) 1 g MgCl_2 og (b) 1 g CaCl_2 og ulike mengder vann er i likevekt ved ulike temperaturer.

Så lenge saltløsningen har høyere konsentrasjon enn frysekonsentrasjonen, ser man altså fra Figur 8 at temperaturen ikke påvirker hvor mye vann en gitt løsning kan holde på ved ulike luftfuktigheter.

2.9 Konsentrasjon og mengde

Den praktiske bruken av saltløsning som støvdempingstiltak varierer fra sted til sted. I Trondheim og Oslo brukes det 15 % MgCl_2 løsning, mens i Stavanger brukes det 22 % MgCl_2 .

Bruk av salt har en rekke negative konsekvenser for både miljø, infrastruktur og biler. Derfor er det ønskelig å bruke så lite salt som nødvendig. En antatt fordel ved å redusere konsentrasjonen på saltløsningen er at man kan øke mengden løsning uten at saltmengden blir for stor. På den måten kan man bruke tilstrekkelig med løsning til å få et tett spredebilde uten at saltforbruket pr m^2 blir for stort (Reitan, et al. 2018). CaCl_2 brukes også gjerne i lavere konsentrasjon for å unngå at friksjonen senkes for mye (Gustavsson, et al. 2010).

Dersom man anvender en løsning med en konsentrasjon som gir vannaktivitet høyere enn luftfuktigheten (tynn løsning med «for mye» vann), vil vann fordampe fra løsningen. Man sitter til slutt igjen med en mindre mengde løsning med høyere saltkonsentrasjon. Fordelene man oppnår ved å bruke en løsning med lav konsentrasjon vil derfor trolig avta med tiden. Hvor lang tid dette tar avhenger av lufttemperatur, vegbanetemperatur og luftfuktighet og vind.

2.10 Friksjon

Det er en bekymring at bruk av kjemikalier til støvbinding medfører redusert friksjon. Det er rapportert at bruk av CaCl_2 løsning reduserer friksjonen ved bruk av høye konsentrasjoner (Viinanen 2007). Spredning av $20\text{g}/\text{m}^2$ 25% CMA er rapportert å gi 35–50% lavere friksjon etter påføring (Sjöstedt og Derneryd 2007). Gustavsson, et al. (2010) har utført tester med $20\text{g}/\text{m}^2$ av hhv 25% CMA, 10% CaCl_2 , 25% MgCl_2 og 25% sukker. De rapporterer at friksjonen rett etter påføring faller mest for CMA, med en friksjonskoeffisient på 0.55 mot ca 0.9 før påføring. For CaCl_2 og MgCl_2 faller friksjonskoeffisienten til 0.7, mens den for sukker faller til 0.8. Friksjonen øker raskt ved opptørking for CMA og sukker, mens det tar litt lenger tid for CaCl_2 og MgCl_2 . For CMA er det også rapportert om tilfeller der friksjonen etter opptørking er lavere enn våtfriksjonen, spesielt på våren ved akkumulering av CMA på vegbanen (Gustafsson, et al. 2019).

2.11 Miljø/korrosjon

Ulike kjemikalier har ulik påvirkning på både miljø, infrastruktur og biler. Gustavsson, et al. (2010) kommer gjennom sin litteraturstudie til følgende anbefalinger:

- $MgCl_2$ har negative effekter på vann og vegetasjon. Det er korrosivt mot spesielt metall, men også betong. $MgCl_2$ er likevel mindre korrosivt mot metall enn $CaCl_2$. $MgCl_2$ anbefales på strekninger der miljø og korrosjonshensyn har lav prioritet.
- CMA har liten miljøpåvirkning og lav korrosivitet. CMA kan derfor anbefales på strekninger der miljø og korrosjonshensyn har høy prioritet.
- $CaCl_2$ har negative effekter på vann og vegetasjon. Det er korrosivt mot spesielt metall, men også betong. $CaCl_2$ er likevel mindre aggressivt mot betong enn $MgCl_2$. $CaCl_2$ anbefales på strekninger der miljø og korrosjonshensyn har lav prioritet.
- Sukker har liten miljøpåvirkning og lav korrosivitet. Sukker kan derfor anbefales på strekninger der miljø og korrosjonshensyn har høy prioritet

2.12 Pris

Prisen for CMA, MgCl_2 og CaCl_2 er oppgitt å være hhv 1150–2100 \$/tonn, 150–160 \$/tonn og 105 \$/tonn (Gulia 2019). Dvs at CMA er ca ti ganger så dyrt som de to andre. For å beregne kostnaden for de ulike kjemikaliene i bruk må man ta hensyn til en rekke forhold, som for eksempel blandingsforhold, påføringsmengde og varighet av tiltak. Dette er derfor utfordrende.

3 Avsluttende kommentarer

Denne rapporten illustrerer gjennom modelleringer og beregninger noen forskjeller mellom ulike kjemikalier som blir brukt for støvbinding.

På bakgrunn av beregningene ser MgCl_2 ut til å være det mest egnede kjemikalie for støvdemping i temperaturer mellom $-16\text{ }^\circ\text{C}$ og $+12\text{ }^\circ\text{C}$. I dette temperaturområdet er det MgCl_2 som kan holde på fuktighet ved de laveste relative luftfuktigheter. Beregningene viser også at 1 g MgCl_2 kan holde på mer vann enn 1 g CaCl_2 .

FS30 har stort sett de samme egenskaper som NaCl . Unntaket er ved veldig høye saltkonsentrasjoner da FS30 kan holde på fuktighet ved lavere relativ luftfuktighet enn rent NaCl .

En mettet blanding av MgCl_2 og CaCl_2 har evne å holde på fuktighet ved lavere luftfuktigheter enn rene løsninger av MgCl_2 og CaCl_2 . Beregningene viser at denne effekten avtar raskt for lavere saltkonsentrasjoner enn den mettede løsningen.

Beregningene i denne rapporten tar utgangspunkt i at vegbanen og lufta har samme temperatur. Dette er en klar forenkling av virkeligheten. Eksempelvis vil sola kunne føre til at vegbanen er varmere enn lufta, mens klarvær gjennom natta vil føre til at vegbanen blir kaldere enn lufta. Dette vil påvirke hvorvidt saltløsningen på vegbanen trekker til seg fuktighet fra lufta eller ikke. Dersom vegbanen er kaldere enn duggpunktet vil man selv uten salt ha en netto tilførsel av vann fra lufta til vegbanen. På samme måte øker fordampingen når vegbanen er varmere enn lufta.

4 Videre arbeid

I tillegg til de miljømessige utfordringene ved bruk av saltløsning er det som nevnt knyttet bekymring til at høye konsentrasjoner reduserer friksjonen. Da konsentrasjonen vil endre seg over tid når vann enten fordampes fra eller kondenserer til saltløsningen, bør det undersøkes om bruk av lave konsentrasjoner også kan gi redusert friksjon, selv om problemet forskyves i tid.

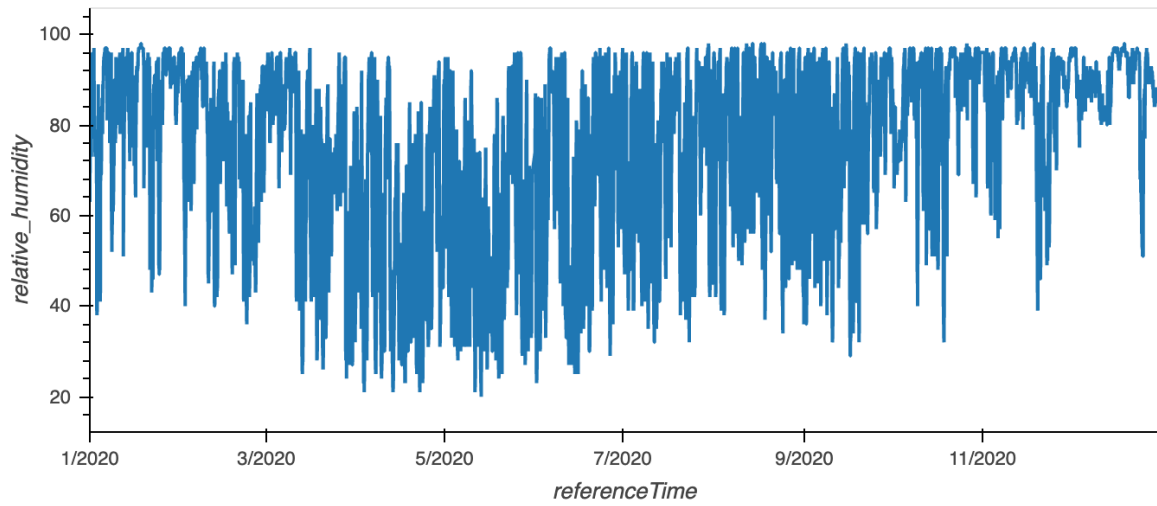
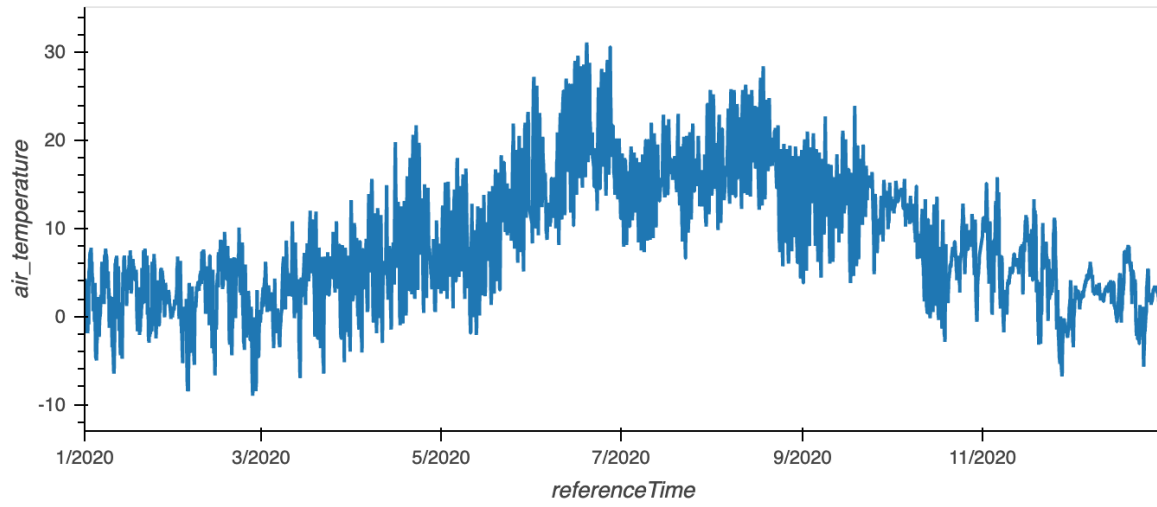
Implementering av mulighet til å bruke ulike temperaturer i lufta og på vegbanen i beregningene vil kunne utvide bruksområdet til funnene.

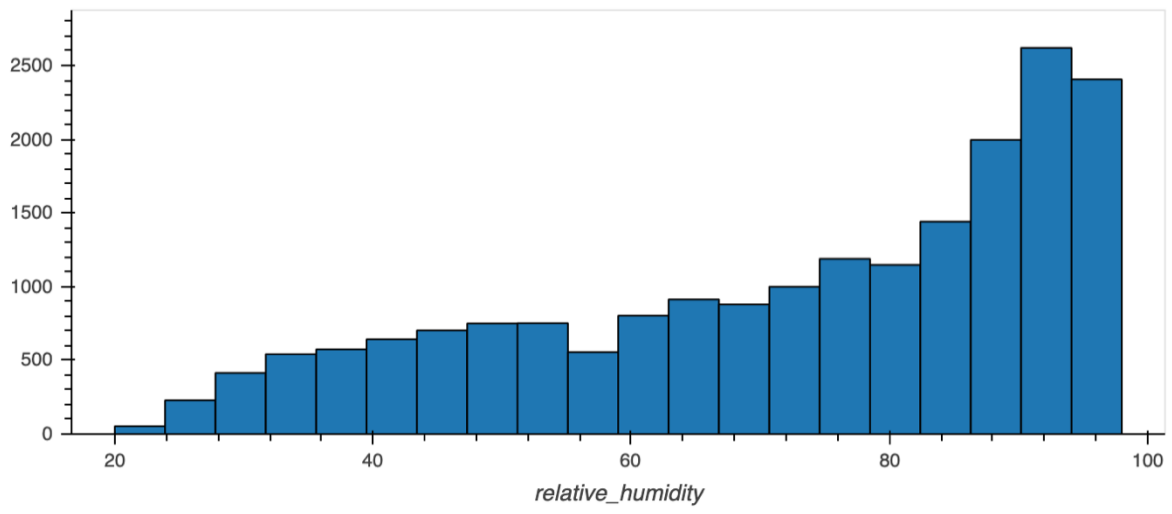
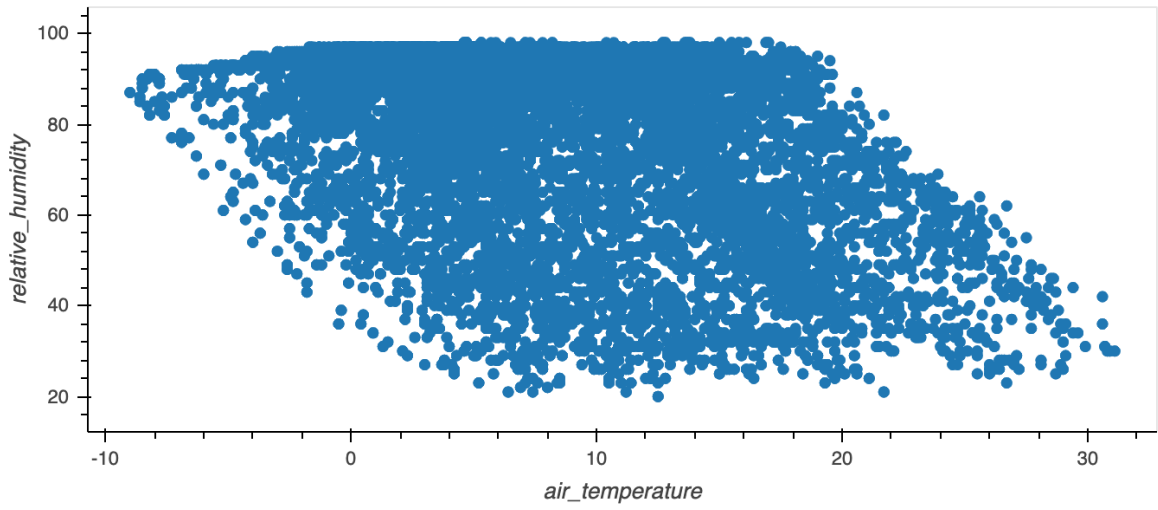
Bibliografi

- Aldrin, Magne, Ingrid Hobæk Haff, og Pål Rosland. 2008. «The effect of salting with magnesium chloride on the concentration of particular matter in a road tunnel.» *Atmospheric Environment*.
- Aldrin, M, og G. H. Steinbakk. 2003. *Effect of salting to particular matter. An analysis on data from the winters 2001/2002 and 2002/2003 (only in Norwegian)*. Norwegian Computing Center, Oslo, Norway.
- Denby, B. R., I. Sundvor, C. Johansson, L. Pirjola, M. Ketzler, M. Norman, K. Kupiainen, M. Gustafsson, G. Blomqvist, og G. Omstedt. 2013. «A coupled road dust and surface moisture model to predict non-exhaust road traffic induced particle emissions (NORTRIP). Part 1: Road dust loading and suspension modelling.» *Atmospheric Environment*.
- Fay, Laura, og Xianming Shi. 2012. «Environmental Impacts of Chemicals for Snow and Ice Control: State of the Knowledge.» *Water, Air & Soil Pollution*.
- Gulia, S. and Goyal, P. and Goyal, S. K. and Kumar, R. 2019. «Re-suspension of road dust: contribution, assessment and control through dust suppressants – a review.» *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- Gustafsson, Mats, Göran Blomqvist, Max Elmgren, Christer Johansson, Ida Järleskog, Joacim Lundberg, Michael Norman, og Sanna Silvergren. 2019. *Driftåtgärder mot PM10 i Stockholm*. VTI.
- Gustavsson, M., G. Blomqvist, P. Jonsson, og M. Ferm. 2010. *Effekter av dammbinding av belagda vägar*. VTI.
- Holen, Åsmund. 2015. *Vinterdrift av høytraffikerte veger ved lave temperaturer*. Statens vegvesen, Vegdirektoratet.
- Ketcham, Stephen A., L. David Minsk, Robert R. Blackburn, og Edward J. Fleege. 1996. *MANUAL OF PRACTICE FOR AN EFFECTIVE ANTI-ICING PROGRAM – A Guide For Highway Winter Maintenance Personnel*. Federal Highway Administration.
- Kupiainen, Kaarle, Liisa Pirjola, Roosa Ritola, Outi Väkevä, Jari Viinanen, Ana Stojiljkovic, og Alekski Malinen. 2011. *Street dust emissions in Finnish cities – summary of results from 2006–2010*. City of Helsinki Environment Centre.
- Lewicki, P. P. 2009. «Data and Models of Water Activity. I: Solutions and Liquid Foods.» I *Food Properties Handbook*, av M. S. Rahman. CRC Press.
- Ramakrishna, Devikarani M, og Thiruvengkatachari Viraraghavan. 2005. «Environmental Impact of Chemical Deicers – A Review.» *Water, Air, and Soil Pollution*.
- Reitan, Knut Magne, Brynhild Snilsberg, Kai Rune Lysbakken, og Dagfinn Gryteselv. 2018. *Driftstiltak mot svevestøv i Trondheim kommune*. Statens vegvesen.
- Sjöstedt, Svante, og Anna Derneryd. 2007. *Partikeldämpande åtgärder i Göteborg 2007. Underlag för spridning av dammbindande medel. Utvärdering av hastighetssänkning på Friggagatan och CMA-spridning*. Göteborgs Stad Miljö.
- Snilsberg, Brynhild and Gryteselv, Dagfin. 2016. *Renholdsforøk i tunnel og gate i Trondheim våren 2015: Strindheimtunnelen og Haakon VII gate*. Statens vegvesen.
- Snilsberg, Brynhild, og Dagfin Gryteselv. 2017. *Renholdsforøk 2016: Strindheimtunnelen og Haakon VII gate i Trondheim Stordalstunnelen i Møre og Romsdal (Brage)*. Statens vegvesen.

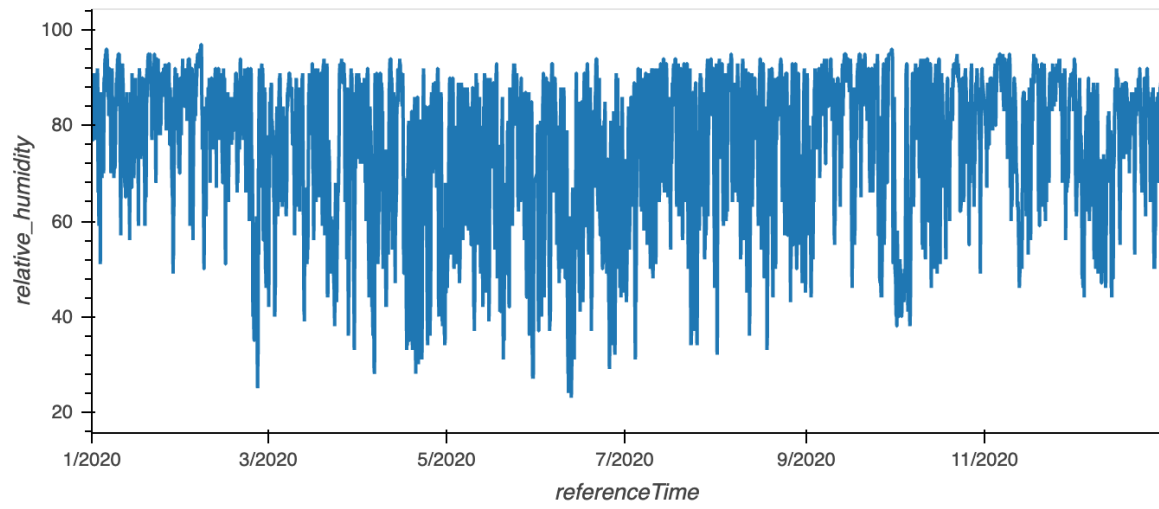
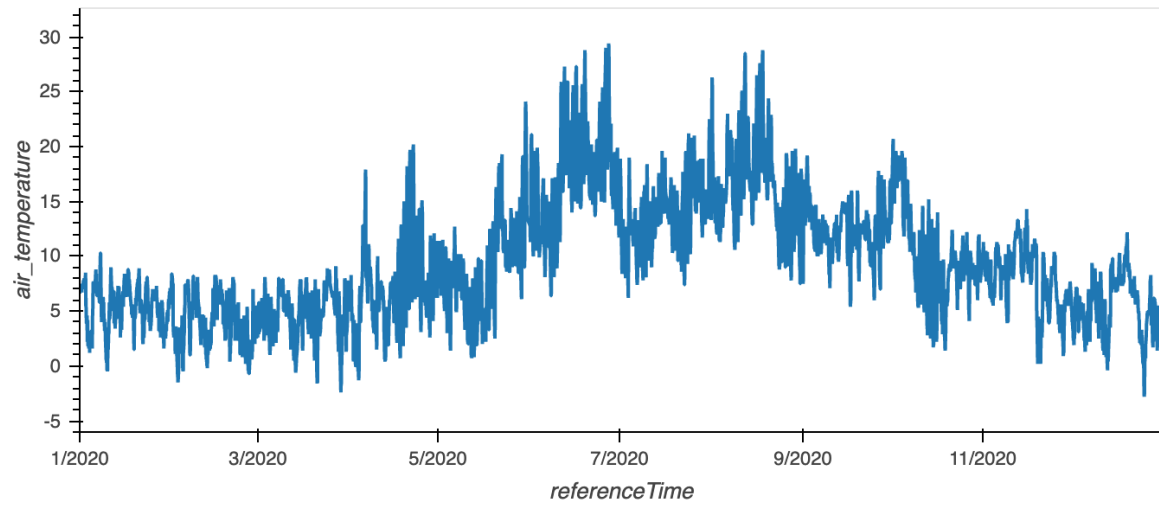
- Thomsen, Kaj. 2005. «Modeling electrolyte solutions with the extended universal quasichemical (UNIQUAC) model.» *Pure and Applied Chemistry*.
- Viinanen, Jari. 2007. *Helsingfors stads beredskapsplan för episodaer med höga halter av luföföroreningar*. Helsingfors stads miljöcentral.
- Wåhlin, J., J. S. Fjærestad, K. Thomsen, og A. Klein–Paste. 2017. «Thermodynamics of deicing chemicals.» *TRB 96th Annual Meeting Compendium of Papers*.
- Xu, Gang, og Xianming Shi. 2018. *Impact of Chemical Deicers on Roadways Infrastructure: Risks and Best Management Practices*. John Wiley & Sons.

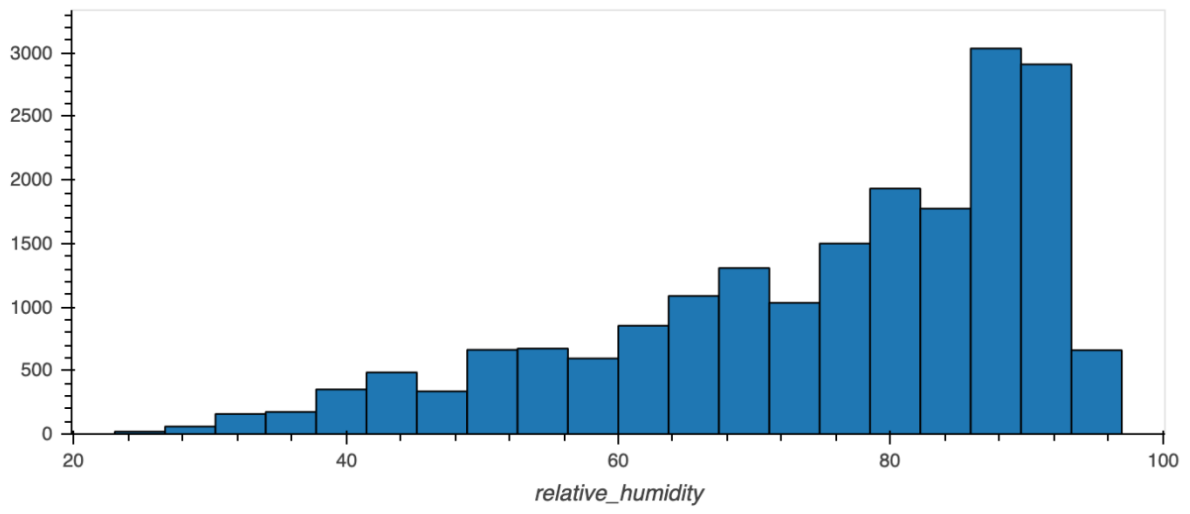
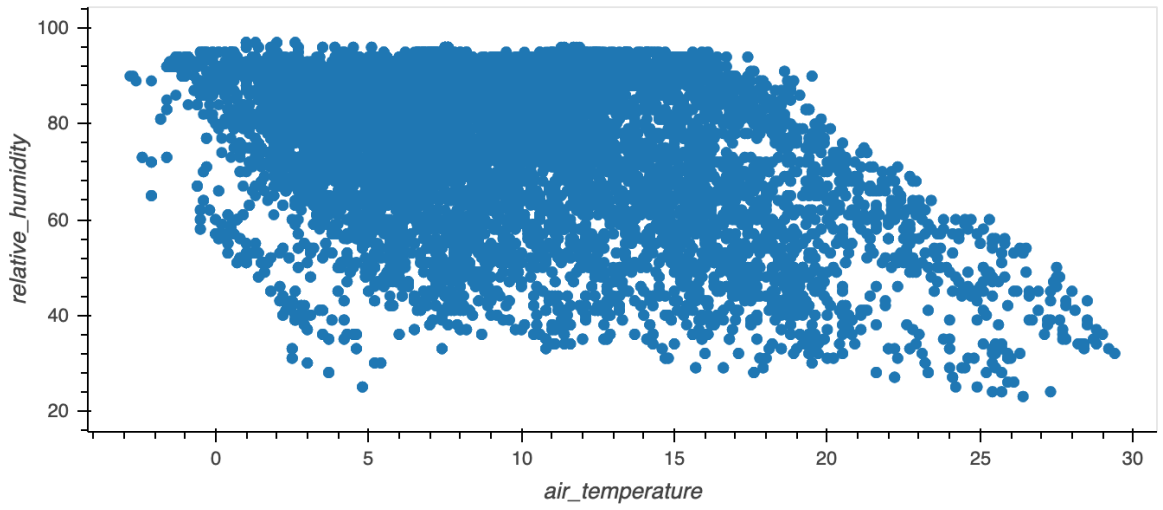
Appendix A Værdata Oslo 2020



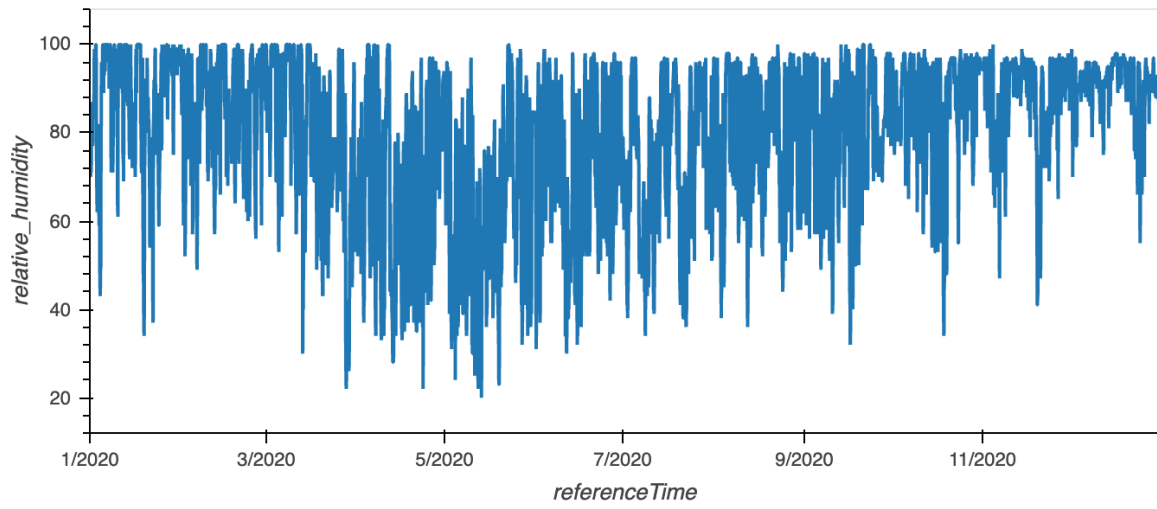
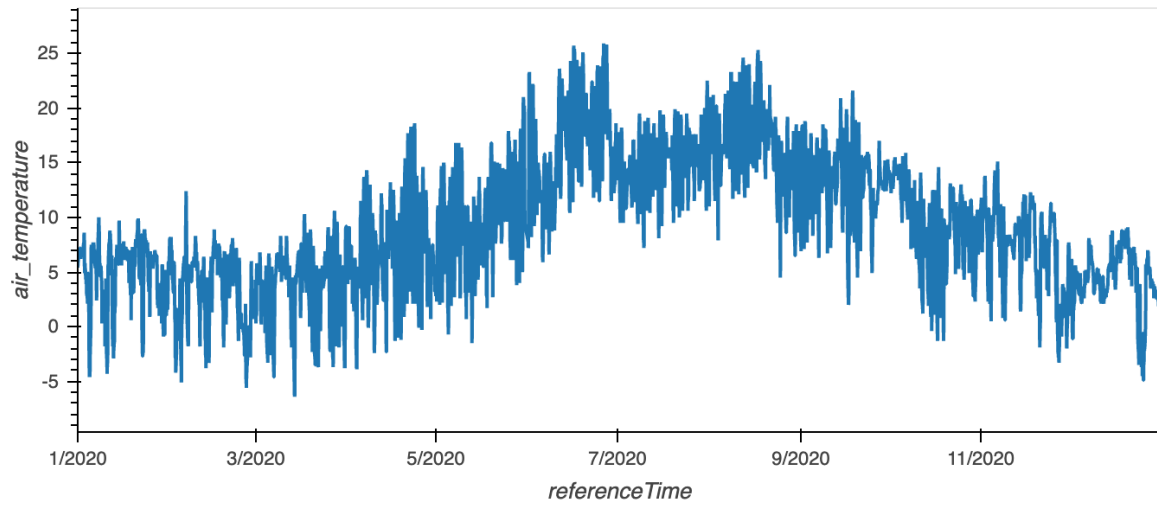


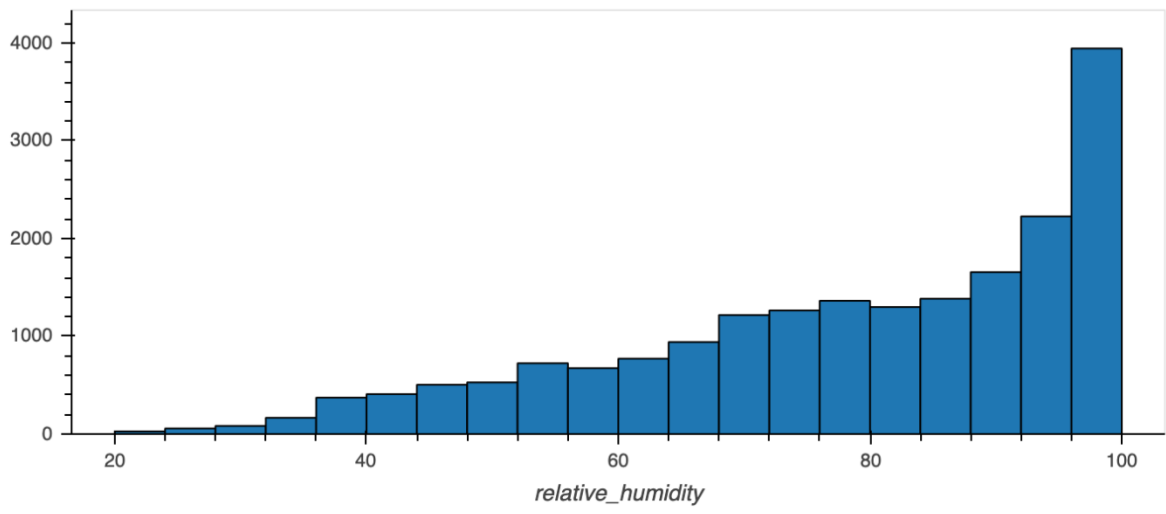
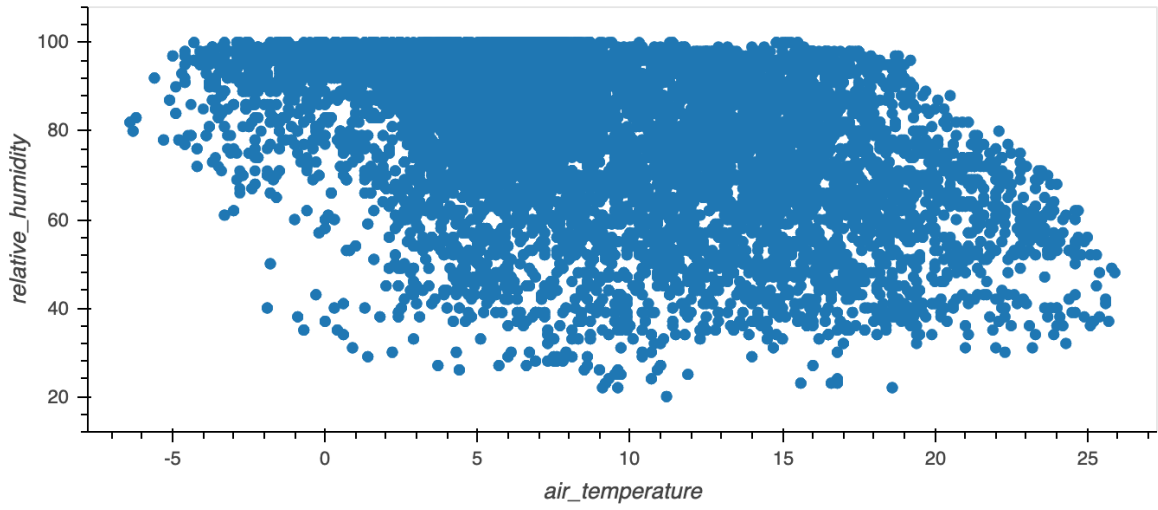
Appendix B Værdata Bergen 2020



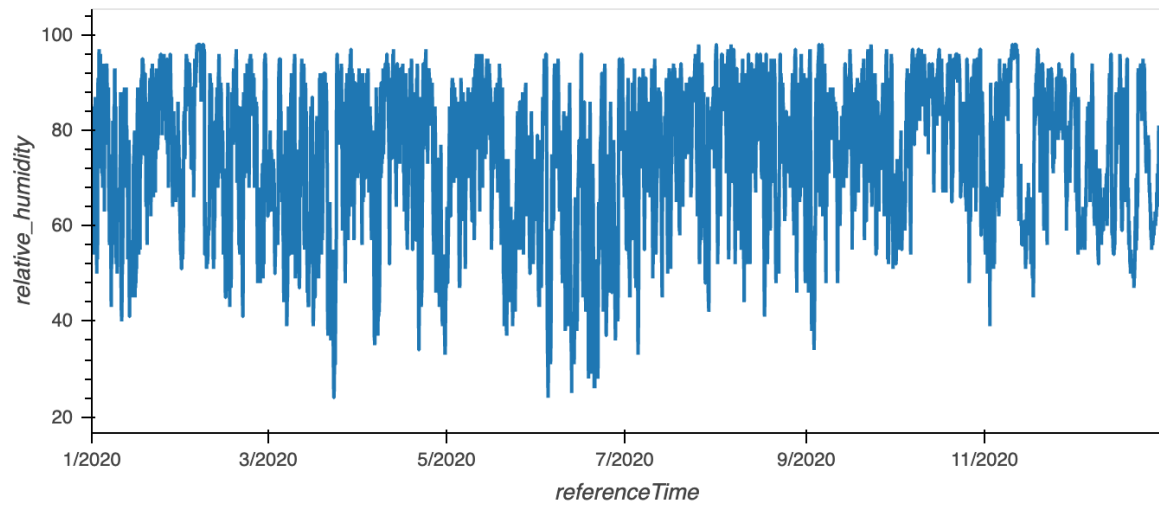
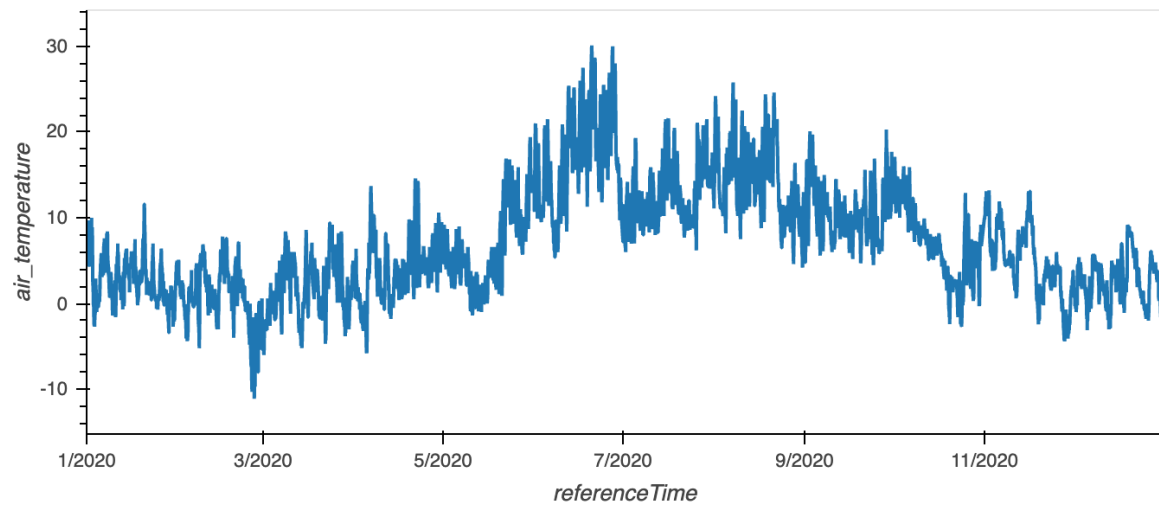


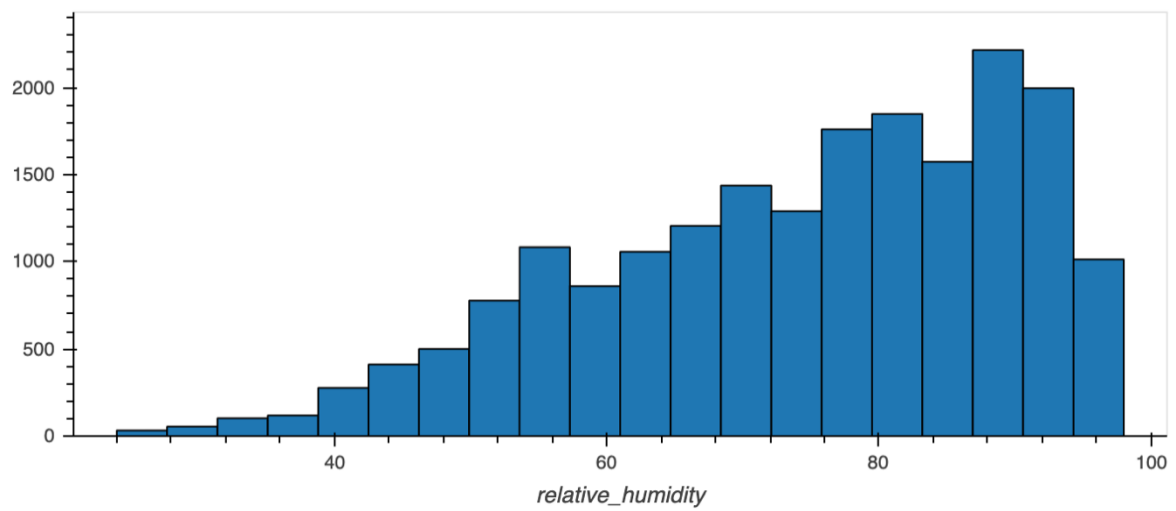
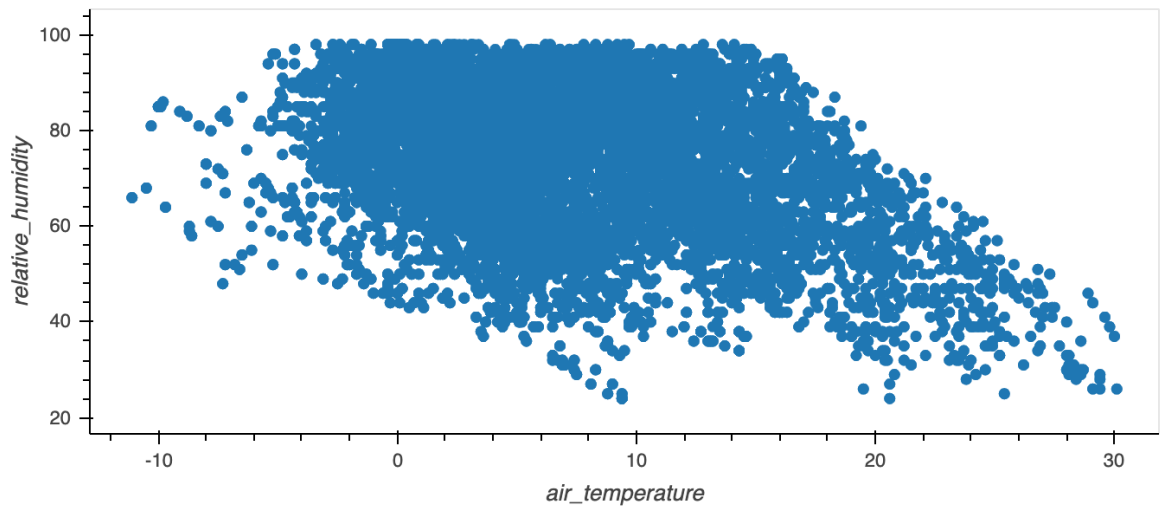
Appendix C Værdata Kristiansand 2020



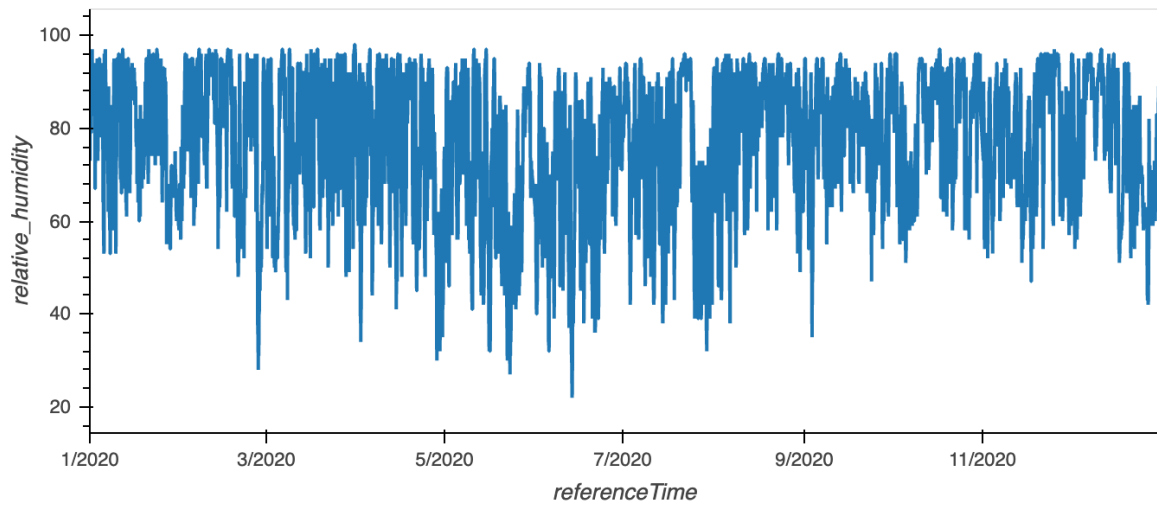
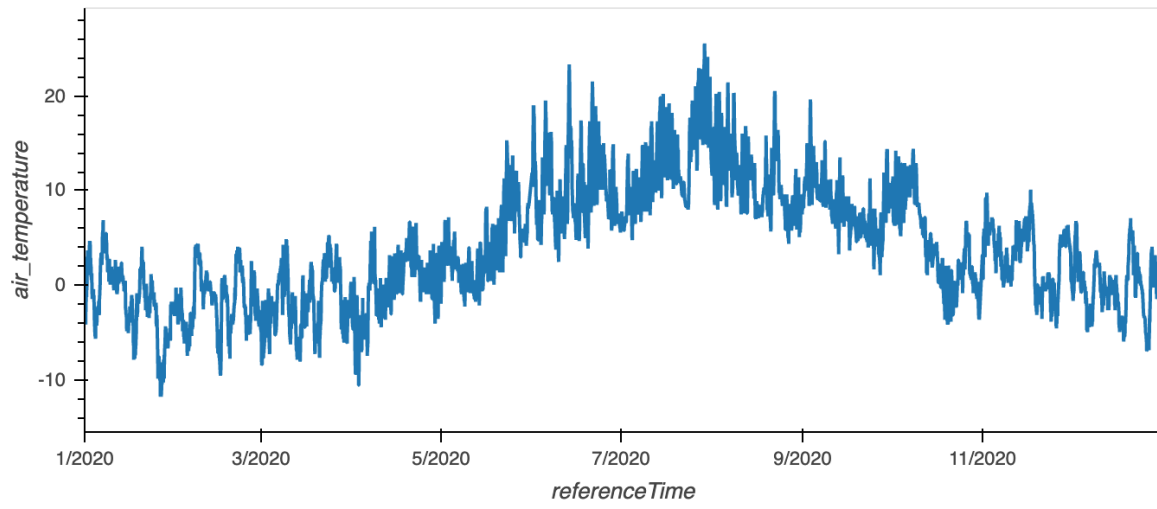


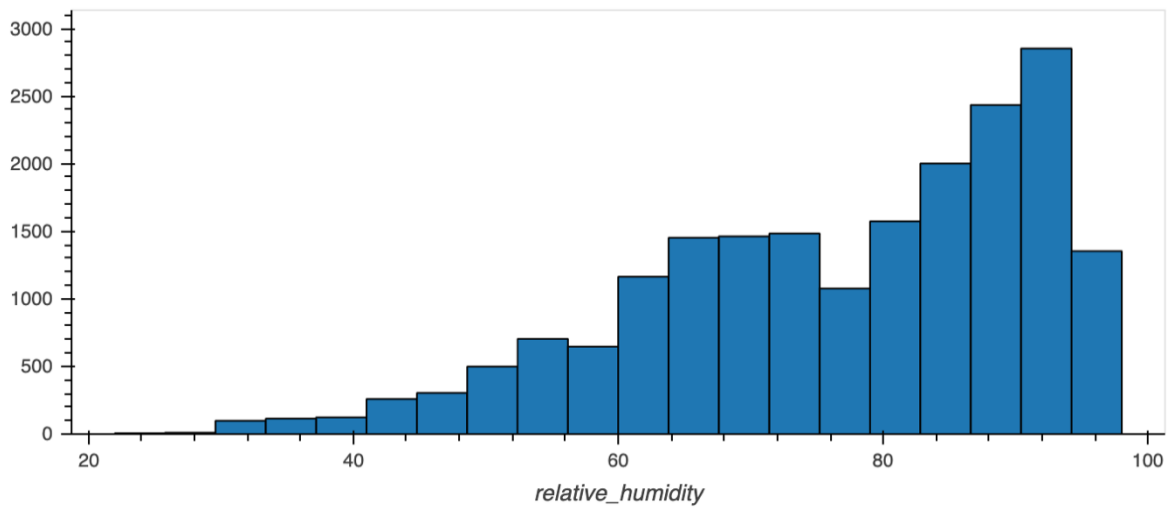
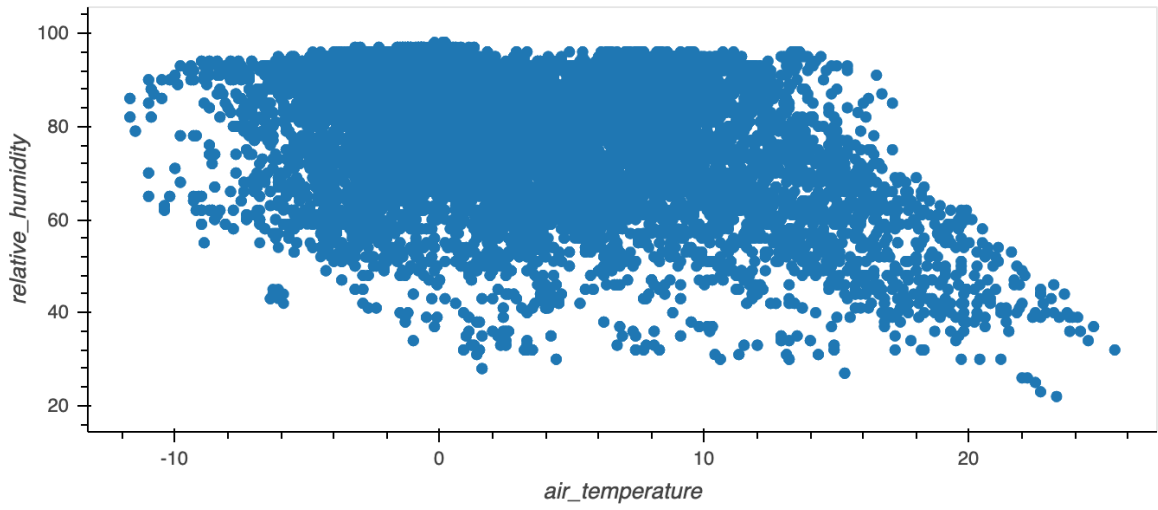
Appendix D Værdata Trondheim 2020





Appendix E Værdata Tromsø 2020







Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag