



Nr C 607  
Juni 2021



## Försurning och övergödning i det svenska skogslandskapet

Nationell rapport från Krondroppsnetet, resultat till och med 2019/20

Gunilla Pihl Karlsson, Cecilia Akselsson, Sofie Hellsten, Per Erik Karlsson



I samarbete med: Lunds universitet



**Författare** Gunilla Pihl Karlsson (IVL), Cecilia Akselsson (Lunds universitet), Sofie Hellsten, Per Erik Karlsson (IVL)

**Medel från:** Luftvårdsförbunden i: Skåne, Blekinge, Jönköpings, Kalmar, Kronobergs, Östergötlands, Västmanlands, Södermanlands och Värmlands län och Länsstyrelserna i: Norrbottens, Västerbottens, Västernorrlands, Jämtlands, Stockholms, Dalarnas, Hallands och Västra Götalands län samt Boliden Mineral AB och Swedavia

**Fotograf framsida:** Gunilla Pihl Karlsson

**Rapportnummer** C 607

**ISBN** 978-91-7883-294-1

**Upplaga** Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© **IVL Svenska Miljöinstitutet 2021**

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm

Tel 010-788 65 00 // [www.ivl.se](http://www.ivl.se)

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

# Förord

På uppdrag av Luftvårdsförbunden i: Skåne, Blekinge, Jönköpings, Kalmar, Kronobergs, Östergötlands, Västmanlands, Södermanlands och Värmlands län och Länsstyrelserna i: Norrbottens, Västerbottens, Västernorrlands, Jämtlands, Stockholms, Dalarnas, Hallands och Västra Götalands län, Vätternvårdsförbundet samt Boliden Mineral AB och Swedavia genomför IVL Svenska Miljöinstitutet, i samarbete med Lunds universitet, mätningar av lufthalter, atmosfäriskt nedfall och markvattenkemi vid skogsytor i respektive län inom Krondropps nätet.

Krondropps nätet startade 1985. I denna rapport redovisas resultaten från mätningar fram till och med det hydrologiska året 2019/20. Ett hydrologiskt år omfattar oktober till och med september påföljande år. Årets resultat jämförs i rapporten främst med tidigare resultat under 2000-talet.

Mätningarna från 2019/20 ger, tillsammans med tidigare års mätningar, en bra bild över försurningsläget och kvävesituationen i det svenska skogslandskapet. I rapporten redovisas även andra relaterade projekt samt aktuella händelser från 2020, som är relevanta ur Krondropps nätet synvinkel.

Detta är den sista rapporten för programperioden 2015–2020 inom Krondropps nätet. Från och med 2021 startar en ny programperiod som sträcker sig fram till 2026.

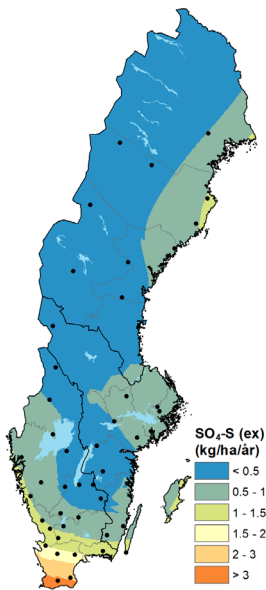
# Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	5
Summary .....	6
1 Krondroppsnetzets mätningar – var, när och hur? .....	7
2 Årets rapport och det hydrologiska året 2019/20.....	11
3 Nedfall av kväve och dess effekter .....	14
3.1 Uppmätta lufthalter återspeglar minskningen av kväveutsläpp .....	15
3.2 Kvävenedfallet över Sverige minskar.....	19
3.3 Läcker det kväve från de svenska skogarna?.....	25
4 Nedfall av försurande ämnen och dess effekter .....	27
4.1 Uppmätta lufthalter återspeglar minskande svavelutsläpp.....	28
4.2 Svavelnedfallet fortsätter att minska .....	30
4.3 Markvattnets försurningsstatus .....	37
5 Marknära ozon.....	41
6 Händelser/specialprojekt under programperioden 2015–2020 .....	45
6.1 Lista över vilka artiklar som har skrivits och publicerats inom rådande programperiod.....	46
6.2 Korrigering för torrdeposition till utrustning för insamling av nederbörd.....	47
6.3 Modelleringsstudier baserat på Krondroppsnetzets mätplatser under programperioden.....	48
6.4 Rapport från Storskogen.....	48
6.5 Fosfordeposition till Östersjön-HELCOM-HaV .....	50
7 Nyheter & notiser .....	51
7.1 Ny programperiod, 2021–2026, inom Krondroppsnetzets startar.....	52
7.2 Revision klar angående Naturvårdsverkets delprogram ”Försurande/Övergödande ämnen” .....	52
7.3 Pågående projekt där Krondroppsnetzets modelleras.....	52
7.4 Har Covid-19 påverkat nedfallet? .....	53
7.5 Korta notiser – vad hände under 2020? .....	57
8 Tack.....	58
9 Referenser.....	59

# Sammanfattning

Krondroppsnetets årliga rapport 2021 är en gemensam nationell rapport. Målsättningar har bland annat varit att ge en aktuell bild av situationen vad gäller försurning och övergödning i Sveriges skogsmark. Resultaten visas i form av kartor och diagram vad gäller luftföroreningshalter, atmosfäriskt nedfall och markvattenkemi för det hydrologiska året 2019/20 samt för tidigare år. Eventuella effekter av samhällets nedstängningar orsakade av pandemin Covid-19 analyseras och redovisas både för lufthalter och för nedfall.

Nedfallet över Sverige beror till stor del på långväga transporterade luftföroreningar. Utsläppen av svavel från EU-länderna (EU27+UK) har minskat med 88 procent mellan 2001-2019. Motsvarande utsläppsminskning för kväve (NO<sub>x</sub>+NH<sub>y</sub>) var 31 procent. Nedfallet över Sverige har minskat med 74 procent vad gäller svavel och 33 procent vad gäller kväve under 2001/02–2019/20, baserat på Krondroppsnetets mätningar.



I kartan till vänster visas svavelnedfallet till skog under det hydrologiska året 2019/20. Svavelnedfallet var lågt i stora delar av landet, lägre än 1 kg S/ha. Som högst uppmättes 3,5–4 kg S/ha i krondroppet i Blekinge och södra Skåne under 2019/20.

Trots den stora minskningen av svavelnedfallet nåddes inte det regionala miljömålet *Bara naturlig försurning* under 2020 i flertalet län. Det kan förklaras med att återhämtning är en långsam process och att flera andra faktorer än svavelnedfallet bidrar till försurningen av skogsmark och sjöar. Kvävenedfallet bidrar till försurningen, främst när kvävet börjar läcka till markvattnet under rotzonen. Skogsbruket bidrar till försurning av skogsmarken genom trädens upptag av näringsämnen, som kompenseras med att sura joner avges. Försurningen blir permanent när biomassa skördas och tas ut från skogsekosystemen.

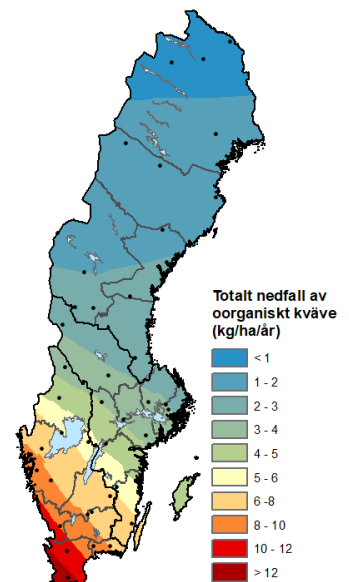
Mätningarna av markvattenkemin inom Krondroppsnetet visar dock att skogsmarken i många fall är på väg att återhämta sig från försurning. Som nämnts ovan tar det lång tid, och vid vissa platser kan ännu ingen återhämtning alls påvisas. Till den fördjupade utvärderingen 2019 gjordes en trendanalys av resultaten från Krondroppsnetets mätplatser mellan 1996 och 2017. Denna visade att markvattnet var kraftigt försurad (den syraneutraliserande förmågan, ANC var negativ) på flertalet platser i sydvästra Sverige, och att återhämtning, i form av ökat ANC, enbart skett på en tredjedel av platserna. På två platser hade till och med en minskning av ANC skett.

I kartan till höger visas det totala kvävenedfallet till barrskog under det hydrologiska året 2019/20.

Det totala kvävenedfallet till skogen ingår numera som en indikator till miljömålet *Ingen övergödning*. Vid den årliga regionala utvärderingen 2020 av miljömålet *Ingen övergödning* bedömde de flesta länen att man inte ser någon tydlig förbättring vad gäller utvecklingen av detta miljömål. Mätningarna inom Krondroppsnetet visar att nedfallet av kväve i hela Götaland och i de sydvästra delarna av Svealand under 2019/20 överskred den kritiska belastningsgräns som Sverige har antagit som målvärde för att förhindra förändringar i markvegetationens sammansättning, 5 kg N/ha/år. Som högst var det totala kvävenedfallet 15 kg N/ha/år i Skåne under 2019/20.

Förhöjda halter av nitratkväve förekommer i markvatten på ett antal krondroppsytor i sydvästra Sverige, vilket visar att skogens förmåga att ta upp kväve överskrids. Hur stort överskottet på kväve är beror främst på hur högt kvävenedfallet är, men också på hur mycket kväve som tas ut från skogsekosystemen i samband med avverkning eller som läckage med avrinningen.

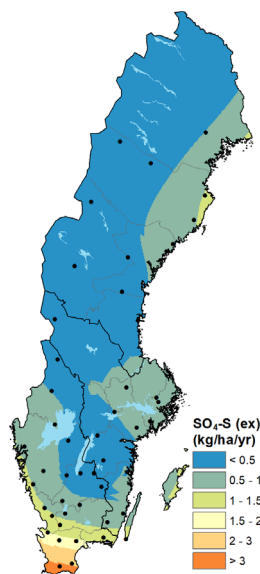
Samhällets nedstängningar på grund av Covid-19-pandemin omfattade främst månaderna mars-september under det hydrologiska året 2019/20. Såväl lufthalter som halter i nedfall av både svavel och kväve över Sverige var, i de flesta fall, mellan 15 och 40 procent lägre under perioden mars-september 2020 jämfört med motsvarande period under de tre föregående åren. Det är troligt att detta delvis berodde på nedstängningarna av olika samhällsaktiviteter i Sverige, övriga Europa och globalt, men definitiva slutsatser kräver ytterligare utredningar.



## Summary

This annual report from the Swedish Throughfall Monitoring Network (SWETHRO) includes assessments of the current situation regarding acidification and eutrophication of forest land in Sweden. Results are presented from ongoing measurements of air concentrations, atmospheric deposition and soil water chemistry for acidifying and nutrifying compounds as well as for other elements for the hydrological year 2019/20 as well as for previous years. In addition, possible impacts of the coronavirus lockdown measures are analyzed for the measured air concentrations as well as concentrations of elements in the deposition.

The deposition of different compounds across Sweden is mainly depending on long-range transport of air pollution. Emission of sulphur from EU-countries (EU27+UK) have declined by 88% over the period 2001-2019. The corresponding emission reductions for inorganic nitrogen (NO<sub>x</sub>+NH<sub>y</sub>) were 31%. The deposition of sulphur to forests, measured as throughfall, has decreased by 74% on average across Sweden over the period 2001/02–2019/20. The corresponding decrease of deposition of total inorganic nitrogen, including both dry- and wet deposition, was 33%.

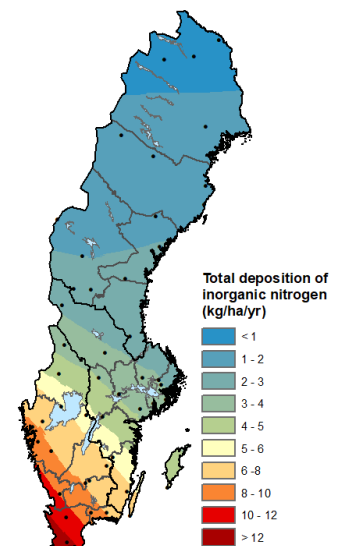


The map to the left shows the total deposition of sulphur to forests in Sweden, measured as throughfall, for the hydrological year 2019/20. The sulphur deposition was less than 1 kg S/ha over large parts of Sweden, except in the south. The highest deposition was measured in the south with 3,5–4 kg S/ha in Blekinge and Skåne.

The regional environmental quality objective (EQO), *Only Natural Acidification*, was not achieved 2019/20 in most counties in Sweden, despite the large reduction in sulphur deposition. The recovery from acidification in forest soils is a slow process and it is influenced by several other factors, besides sulphur deposition. Excess nitrogen deposition may result in nitrogen leakage and nitrification. Base cation removal from the ecosystem, as a result of biomass removal due to forest harvests, may also delay or even prevent recovery from acidification.

The in-depth assessment of the EQO, *Only Natural Acidification*, during 2019 was based on results from measurements of soil water chemistry during 1996 and 2017. The results showed that forest soils at many sites in south-west Sweden are still acidified, with a negative Acid Neutralizing Capacity, ANC. However, trend analysis showed that forest soil water is recovering from acidification, with a positive trend in ANC at one third of the sites.

The map to the right shows the total deposition of inorganic nitrogen to forests during 2019/20, based on a combination of measurements with string samplers, throughfall and deposition to the open field. The total deposition of inorganic nitrogen to forests is used as an indicator for the EQO, *No Eutrophication*. The yearly regional assessments 2020 showed no improvement of this EQO for most counties. The results from the measurements within SWETHRO showed that the critical load for nitrogen deposition to coniferous forests, 5 kg N/ha/yr, was exceeded 2019/20 in Götaland and the southwestern part of Svealand. The highest nitrogen deposition was measured in Skåne, 15 kg N/ha. Elevated concentrations of nitrate in the soil water have been measured at a number of monitoring sites in southwest Sweden. This indicates that some forest ecosystems in southwest Sweden are close to nitrogen saturation and that they cannot absorb more nitrogen. The risk for nitrogen leakage from these forest ecosystems is determined by the level of nitrogen deposition but also by soil properties as well as the removal of nitrogen from the ecosystems with biomass removal during forest harvests.



Society lockdown due to the Covid-19-pandemic occurred primarily during the months March to September within the hydrological year 2019/20. Mean air concentrations as well as concentrations in deposition of both sulphur and inorganic nitrogen were 15-40% lower during March – September 2020, as compared to the mean value for the corresponding time period for the preceding three years. Hence, it is likely that this reduction in air pollution concentrations was caused by the lockdown of the society in Sweden, Europe as well as globally, due to the Covid-19-pandemic. However, this has to be confirmed by further analyses of differences in meteorological conditions etc.



## 1 Krondroppsnetets mätningar – var, när och hur?

Mätningar av krondropp med vinterutrustning Djupeåsen, Halland. Fotograf: Hans Schibli

Sveriges skogar täcker cirka 56 procent av Sveriges landareal, och mycket av avrinningen till sjöar och vattendrag härstammar från skogsmark. Därför är det viktigt att följa upp effekter av luftföroreningar i skogslandskapet. Inom Krondropps nätet samordnas, sedan 1985, övervakning av försurande och övergödande föroreningar, från lufthalter och nedfall till dess effekter på markvattnets kvalitet, vid ett stort antal platser i brukad skogsmark runt om i Sverige. Resultaten från dessa mätningar syftar till att vara direkt användbara inom den regionala och nationella miljöövervakningen. Samordning görs i möjligaste mån med skogliga observationer. Mätmetoder utvecklas och förbättras kontinuerligt. Samma metoder används alltid vid de olika mätplatserna, så att jämförelser kan göras. Åtgärder i form av till exempel utsläppsminskningar kan då kopplas till effekter, vilket leder till ökad kunskap om fortsatta åtgärdsbehov. Mätningarna har resulterat i många långa tidsserier, i ett nätverk där nya ytor kontinuerligt startas när äldre ytor avverkas.

Resultat från Krondropps nätet bidrar till det regionala och nationella miljömålsarbetet på flera sätt, och det finns potential till att använda dem än mer. Resultat från nedfallsmätningarna används årligen för att följa upp miljömålet *Ingen övergödning* genom indikatorn "Totalt nedfall av kväve till barrskog" och miljömålet *Bara naturlig försurning* genom indikatorn: "Nedfall av svavel". Mätningarna av lufthalter inom Krondropps nätet kan bland annat användas som bakgrundsdata vid bedömningar av resultaten från mätningar i tätort. Mätningar av lufthalter fyller även en viktig funktion att bekräfta uppgifter om minskade utsläpp av långväga transporterade luftföroreningar.

I den senaste fördjupade utvärderingen av miljömålet *Bara Naturlig Försurning*, 2019, användes, förutom nedfallsdata, även de långa tidsserierna för markvattenkemi inom Krondropps nätet. Data för markvattenkemi användes för att komplettera Markinventeringens markkemiska data, då markkemiska data ger en bra geografisk överblick, medan Krondropps nätet markvattenkemiska data är bättre lämpade för trendanalyser. En karta som beskrev tidsutvecklingen av ANC (den syraneutraliserande förmågan) visade på signifikanta förändringar i ANC mellan 1996 och 2017 för vissa platser, men inte för andra.

I den fördjupade utvärderingen av miljömålet *Ingen övergödning*, ingick "Totalt nedfall av kväve till barrskog" som en indikator. De data som används för att beräkna indikatorn tas fram inom Krondropps nätet. I den fördjupade utvärderingen ingick även andra data från Krondropps nätet. I utvärderingen visades att det finns mätplatser i sydvästra Sverige med förhöjda halter av oorganiskt kväve i markvatten. Förhöjda kvävehalter i markvatten är det första tecknet på att skogens förmåga att ta upp kvävet överskrids, med kväveutlakning som följd.

Mätresultaten som tas fram inom Krondropps nätet relateras även till modellresultat från det nationella miljömålsarbetet, bland annat med avseende på kritisk belastning, antropogent försurade sjöar och kväveupplagring i skogsmarken, detta för att ytterligare fördjupa underlaget för miljömålsuppföljningen lokalt, regionalt och nationellt.

De långa tidsserierna som finns inom Krondropps nätet gör det möjligt att på ett tidigt stadium upptäcka förändringar, som till exempel om nedfallet ökar i något län eller om frekvensen av förhöjda halter av kväve i markvattnet ökar. Detta är speciellt viktigt i en tid där klimatet förändras och skogsbruket blir mer och mer intensivt. Samarbete med nedfalls- och ekosystemmodellering bidrar till modellutvecklingen och gör att mer långtgående slutsatser kan dras.

Övervakning av lufthalter och atmosfäriskt nedfall av föroreningar, som sker i Krondropps nätet, motiveras även av att den samlade belastningen från långväga transporterade luftföroreningar, i kombination med skogsbrukets miljöpåverkan, kan avgöra utrymmet för luftutsläpp från lokala verksamheter såsom industriutsläpp, transporter med mera. Dessa mätningar kan då i viss mån sägas utgöra en samordnad och kostnads-effektiv recipientkontroll. Mätdata som tagits fram inom Krondropps nätet ska vara användbara inom den regionala miljöövervakningen för uppföljning av överskridanden av regionala miljömål, kunna användas som bakgrundsmätningar vid planarbete och för tillståndsärenden, då det visar vilket utrymme det finns för ytterligare utsläpp vid planering av investeringar och förändringar i företags olika verksamheter.

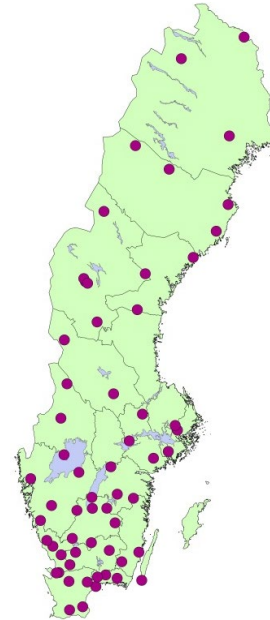


Inom Krondroppsnetet genomfördes under det hydrologiska året 2019/20, mätningar vid cirka 60 provytor i skog och på öppet fält fördelade över hela landet. Här mäts lufthalter, våtdeposition, torrdeposition, krondropp och markvattenkemi. Antal mätyper vid respektive mätplats kan dock variera. Ett stort antal ämnen och parametrar analyseras, däribland svavel- och kväveföreningar, som har stor betydelse för försurnings- och övergödningsproblematiken.

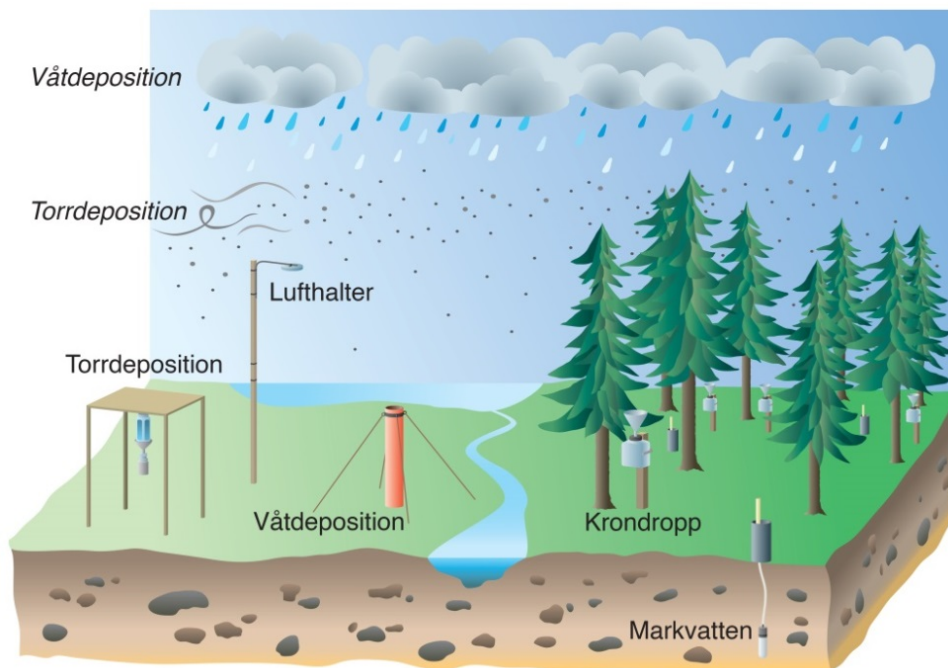
Genom åren har antalet mätplatser inom Krondroppsnetet varierat. Som mest fanns i mitten av 1990-talet cirka 185 ytor. Då övervakningen sker i brukad skog har ytor flyttats vid avverkning samt efter kraftiga störningar, till exempel vid omfattande stormskador. Idag bedrivs mätningar på cirka 60 platser i Sverige, Figur 1, och numera finns mätserier med mer än 35 års data för några ytor.

Mätningarna bedrivs både på öppet fält och i skogen under trädkronorna, Figur 2. Nedfall och lufthalter mäts månadsvis, medan markvattenkemi mäts tre gånger om året för att representera förhållandena före, under respektive efter vegetationsperioden.

Allt arbete inom Krondroppsnetet, från provtagning till kemisk analys, validering och databearbetning utförs enligt väl utarbetade rutiner, och laboratoriet på IVL, där analyserna genomförs, innehar ackreditering för de kemiska analyserna. Detta ger en hög kvalitet på data, och garanterar att data från olika platser och från olika år är direkt jämförbara.



Figur 1. Samtliga ytor inom Krondroppsnetet 2019/20.



Figur 2. Inom Krondroppsnetet mäts lufthalter, våt- och torrdeposition samt markvattenkemi. Nedfallet mäts dels på öppet fält dels under trädkronorna som krondropp. Vissa ämnen samverkar med trädkronorna, och därför används även strängprovtagare för att kunna bestämma torrdepositionen av dessa ämnen. (Illustration: Bo Reinerdahl)

### Mätningar i skogen

Under trädkronorna i skogen mäts kron-  
dropp, som ger ett summerat mått på både  
våt- och torrdeposition, vilket dock för vissa  
ämnen måste korrigeras för samverkan med  
trädkronorna. Kemin i markvattnet mäts  
under trädens rötter för att undersöka effekter  
av nedfall på skogsmarken. Provtagningen  
görs med hjälp av undertryckslysimetrar som  
suger vatten i mineraljorden på 50 centimeters  
djup.



Foto: kron-  
droppsprovtagare



markvattenutrustning

### Mätningar på öppet fält

Våtdeposition av flera olika ämnen mäts med  
nederbördsprovtagare på öppet fält, där även  
torrdeposition mäts med hjälp av strängprov-  
tagare. Likaså mäts lufthalterna av svavel-  
dioxid, kvävedioxid, ammoniak och ozon på  
öppet fält på tre meters höjd över marknivå  
vid vissa platser i landet.



Foto: öppen fältprovtagare



lufthaltsprovtagare

### Våt- respektive torrdeposition

Det samlade nedfallet av olika ämnen till skog involverar  
flera olika processer. En del av nedfallet sker via neder-  
börden, vilket kallas våtdeposition. En annan del sker  
genom att gaser och partiklar "fastnar" i trädkronorna,  
vilket kallas torrdeposition. Det som avsatts som torr-  
deposition sköljs med nederbörden till skogsmarken i  
form av kron-  
dropp. Kron-  
dropp ger därför i teorin ett  
samlat mått på summan av våt- och torrdeposition.  
Torrdepositionen skulle därför kunna beräknas som  
skillnaden mellan nedfall som kron-  
dropp och nedfall via  
nederbörd på öppet fält. Dock kan vissa ämnen tas upp  
direkt i trädkronorna, alternativt läcka ut från träd-  
kronorna. Detta gör att kron-  
droppsmätningarna ger ett  
bra mått på det samlade nedfallet endast för ämnen som  
inte samverkar med trädkronorna, såsom svavel,  
natrium och klorid. För övriga ämnen, exempelvis kväve  
och baskatjoner, krävs kompletterande mätningar med  
strängprovtagare, för att korrekt kunna beräkna torr-  
depositionen.



Foto: strängprovtagare

Data från Krondroppsnetet är fritt tillgängliga från Krondroppsnetets webbplats:

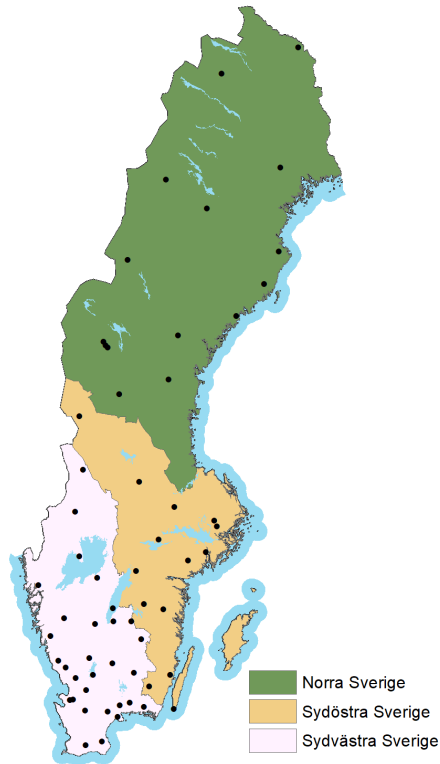
<http://www.krondroppsnetet.ivl.se/>. På webbplatsen finns även samtliga kontaktuppgifter.

## 2 Årets rapport och det hydrologiska året 2019/20



Mätningar av nedfall till öppet fält, Högberget, Dalarnas län, Fotograf: Per Erik Karlsson

Årets rapport från Krondropps nätet är en gemensam nationell rapport, den sista för programperioden 2015–2020. I rapporten redovisas resultat för hela landet till och med det hydrologiska året 2019/20. Ett hydrologiskt år omfattar tiden från 1 oktober till och med 30 september året efter. I vissa fall har vi grupperat resultaten för olika delar av landet. För detta används den uppdelning av landet som även används inom delar av miljömålsuppföljningen. Denna uppdelning av landet i tre olika regioner visas i Figur 3.

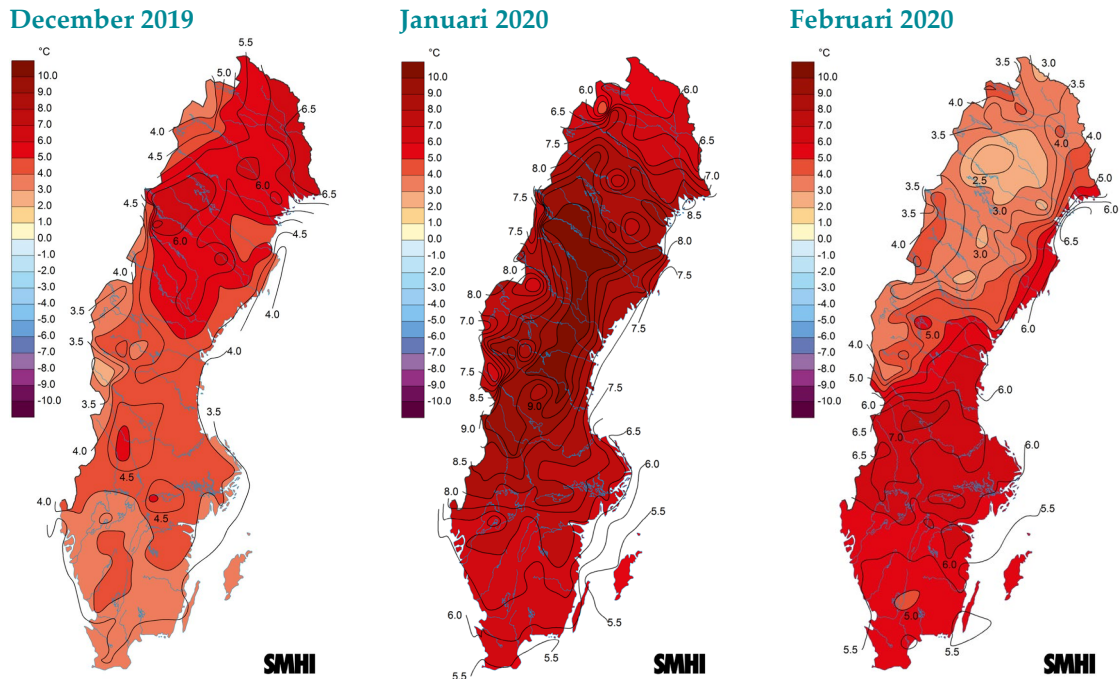


**Figur 3. En karta som visar en uppdelning av landet i tre olika regioner. De svarta prickarna motsvara olika mätplatser inom Krondropps nätet.**

I rapporten redovisas allmänt om vad som inträffat under det hydrologiska året 2019/20 och de meteorologiska förhållandena som rådde då. Därefter redovisas resultat för kvävenedfall och dess inverkan på övergödning följt av en redovisning av svavelnedfall och dess påverkan på försurning. Eftersom detta är den sista rapporten inom Krondropps nätetns programperiod 2015–2020 görs en översikt över några av de specialprojekt som genomförts under perioden. Slutligen redovisas några aktuella nyheter och notiser.

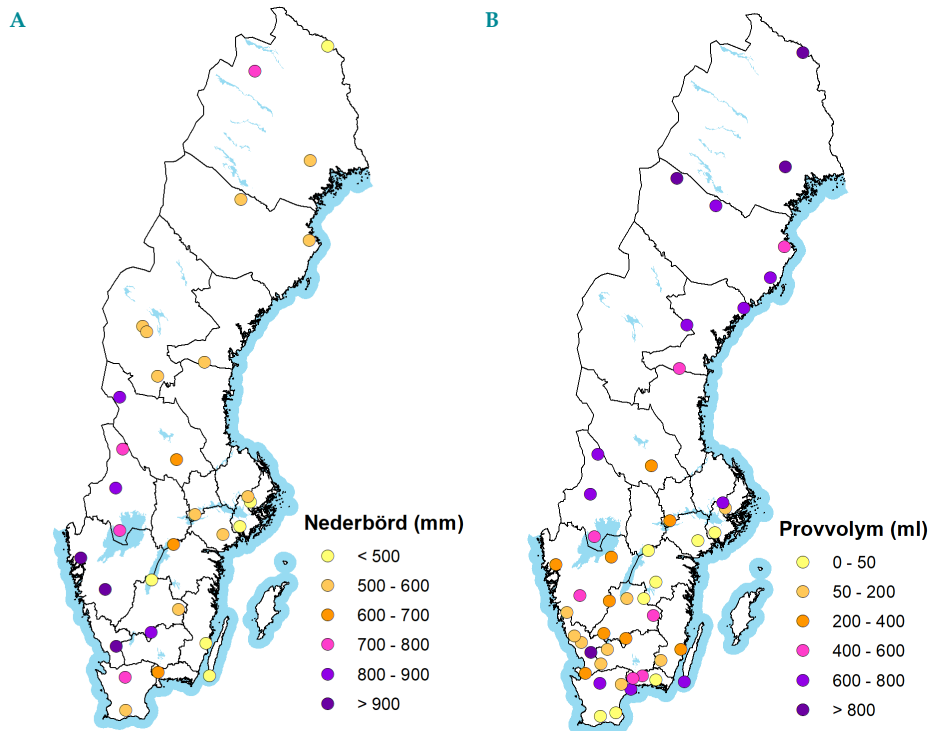
Samhällsaktiviteterna under 2019/20 dominerades till stor del av de nedstängningar som orsakades av Covid-19, i Sverige såväl som i övriga Europa och globalt. Nivåerna av luftföroreningar i Sverige utanför tätort domineras av långväga transporterade luftföroreningar med en stor andel av utsläppskällorna utanför Sveriges gränser. Vi redovisar därför i kapitel 7.4 en påbörjad särskild analys av hur nedstängningarna av samhället på grund av Covid-19 kan ha påverkat luftföroreningshalterna och det atmosfäriska nedfallet av svavel och kväve i olika delar av Sverige.

Det hydrologiska året 2019/20 var speciellt på flera sätt. Årsmedeltemperaturen för Sverige var under kalenderåret 2020 den högsta som uppmätts sedan rikstäckande mätningar inleddes (källa SMHI). Vintern 2019/20 var ovanligt mild och temperaturerna var mycket över det normala i hela landet för månaderna december, januari och februari, Figur 4. Större delen av Götaland och Svealand var snöfria under december och januari, medan det under februari låg en del snö i norra Götaland och södra Svealand. Delar av Svealand var snöfria hela vintern.



Figur 4. Månadsmedeltemperaturens avvikelse från det normala under månaderna december 2019 samt januari och februari 2020, Källa: SMHI.

Nederbördsmängderna var generellt låga över Sverige under månaderna april, maj och augusti (källa: SMHI). I Figur 5A visas summerade nederbördsmängder på öppet fält vid Krondroppsnetets mätplatser under 2019/20. De högsta nederbördsmängderna uppmättes liksom tidigare vid västkusten, medan det var lägre nederbördsmängder i södra, sydöstra och norra Sverige. Volymerna vid provtagning av markvattnet utgör ett semi-kvantitativt mått på vattentillgången i marken på ungefär 50 cm markdjup och det är generellt mindre provvolymen vid platser i södra och sydöstra Sverige, jämfört med sydvästra Sverige. Figur 5B visar medianen för provvolymen vid markvattenprovtagningen under de tre senaste åren 2018–2020.



Figur 5. Uppmätta nederbördsmängder på öppet fält (A) samt uppmätta volymer vid markvattenprovtagningar (B) vid Krondroppsnetets mätplatser under 2019/20.

### 3 Nedfall av kväve och dess effekter



Mätningar av markvattenkemi, Risebo, Kalmar län. Fotograf: Matilda Broo

I många län, främst i södra Sverige, är övergödning ett betydande miljöproblem. Utsläpp av kväveoxider (NO<sub>x</sub>), främst från transporter och industri, tillsammans med utsläpp av ammoniak (NH<sub>3</sub>), främst från jordbruket, leder till kvävenedfall som kan bidra till både övergödning och försurning av mark och vatten. Övergödning av marken kan leda till en förändrad markvegetation. Det kväve som inte tas upp av skogs-ekosystemen, och som uppmäts som förhöjda halter av främst nitratkväve i markvattnet, kan transporteras vidare och bidra till förhöjda nitrathalter i grundvattnet och därmed försämrade dricksvattenkvalitet, samt övergödning av ytvatten.

### 3.1 Uppmätta lufthalter återspeglar minskningen av kväveutsläpp

Lufthalterna av oxiderat och reducerat kväve kan ge en första indikation på om kvävebelastningen förändras. Det är därför intressant att jämföra tidsutvecklingen för uppmätta lufthalter av kväve i Sverige med motsvarande tidsutveckling för minskningen av de rapporterade utsläppen av kväve till luft i såväl Sverige som i resterande Europa.

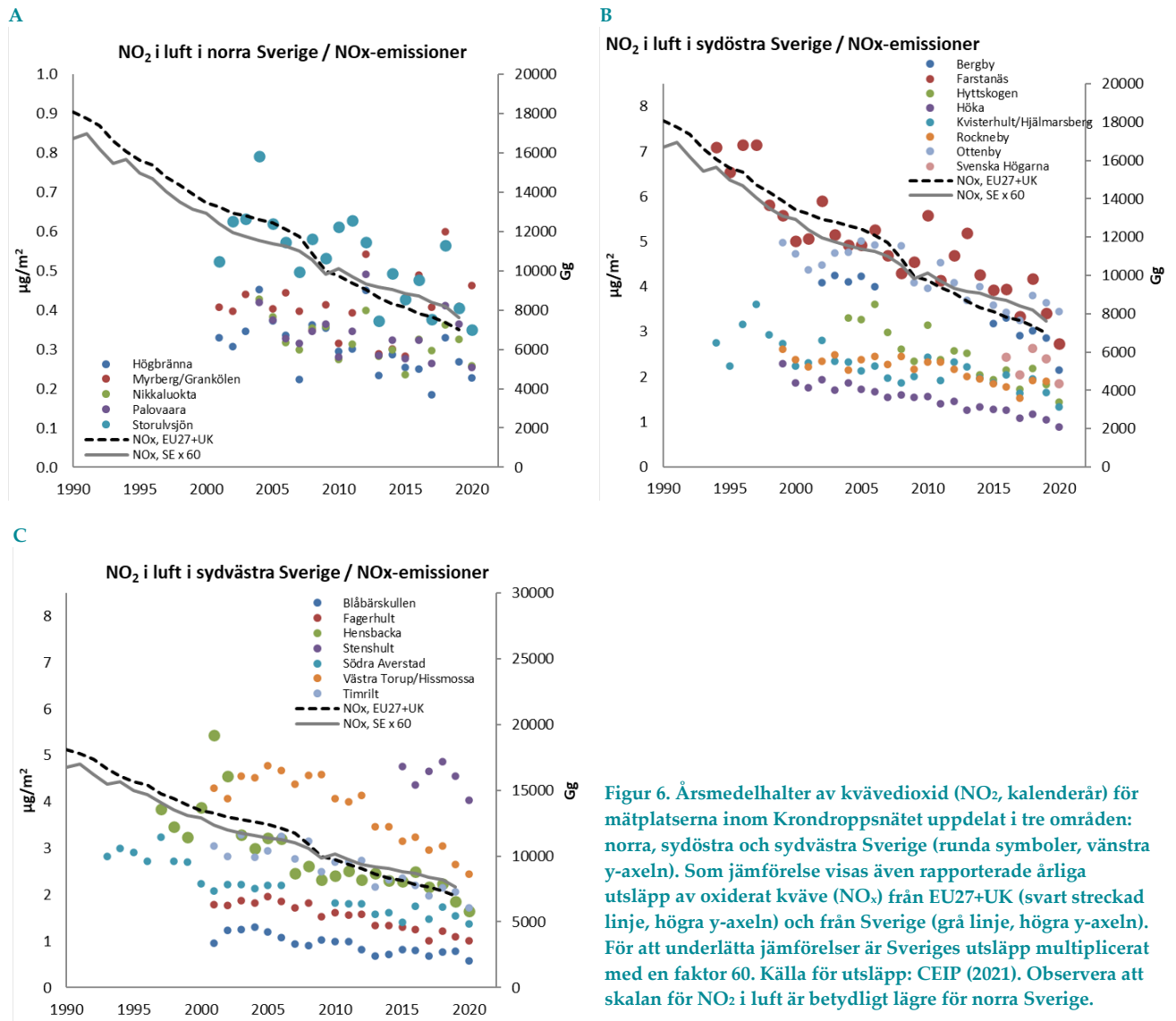
I Figur 6 och Figur 7 visas årsmedelhalter (kalenderår) av kvävedioxid (NO<sub>2</sub>) och ammoniak (NH<sub>3</sub>) från olika mätplatser inom Krondropps nätet i de olika delarna av Sverige, se Figur 3. I figurerna visas även den årliga utvecklingen när det gäller utsläpp av NO<sub>x</sub> och NH<sub>3</sub> från Sverige respektive Europa som helhet (EU27+UK). Skalorna för såväl lufthalter som utsläpp är valda så att de så långt möjligt sammanfaller i början av mätserierna. När det gäller skalorna för emissionerna är Sveriges utsläpp avseende NO<sub>2</sub> - och NH<sub>3</sub>-emissionerna multiplicerade med en faktor 60, för att de i figurerna ska ligga på liknande nivå som utsläppen för EU27+UK.

De rapporterade årliga utsläppen av NO<sub>2</sub> till luft uppvisar en linjär nedgång över perioden 1990–2019, Figur 6. Minskningen i NO<sub>x</sub>-utsläpp under 2001–2019, var 49 procent för EU27+UK och 36 procent för Sverige (CEIP, 2021). De uppmätta lufthalterna av NO<sub>2</sub> har även de minskat i stort sett linjärt, men med lite olika utveckling beroende på mätplats. Under perioden 2001–2020 har NO<sub>2</sub>-halterna i luften minskat på ett statistiskt säkerställt sätt vid 13 av 14 mätplatser som har mätningar under den perioden, med mellan 30 och 50 procent. Endast vid Myrberg/Grankölen i Norrbotten fanns det inte någon statistiskt signifikant förändring under denna period. Vid mätplatserna i norra Sverige följer minskningen av halterna av NO<sub>2</sub> i luft de rapporterade emissionsminskningarna relativt väl. Till exempel gäller det halterna i Storulvsjön i Västernorrlands län, som visas med en större blå markering i Figur 6A. Vid andra mätplatser längre norrut, till exempel Nikkaluokta, Palovaara och Myrberg/Grankölen i Norrbottens län är sambanden mer oklara. Ett större avstånd till de stora utsläppskällorna i Europa kan medföra att lokala utsläppskällor får större betydelse.

Vid Farstanäs, söder om Stockholm, (något större röda markeringar i Figur 6B) i sydöstra Sverige följer minskningen i NO<sub>2</sub>-halterna de rapporterade emissionsminskningarna mycket väl. Även vid andra mätplatser minskar lufthalterna på ett liknande sätt som emissionerna, till exempel vid Bergby i Stockholms län, Hyttskogen i Västmanlands län och Ottenby på Ölands södra udde. Vid Kvisterhult/Hjälmsberg i Västmanlands län, och vid Rockneby i Kalmar län, strax nordväst om Kalmar, har lufthalterna av NO<sub>2</sub> dock inte minskat i samma utsträckning som de rapporterade utsläppsminskningarna.

Även i sydvästra Sverige minskar lufthalterna i takt med minskade utsläpp. Exempel på detta är Hensbacka i västra delen av Västra Götalands län (större gröna prickar i Figur 6C), där två höga värden åren 2001 och 2002 beror på att mätplatsen då tillfälligt flyttades närmare den starkt trafikerade E6:an. Under de senaste åren har de högsta årsmedelhalterna av NO<sub>2</sub> uppmäts vid Stenshult beläget på Romeleåsen i södra Skåne, beroende på närheten till Europa och påverkan från fartygstrafiken längs Skånes södra kust.

Övergripande bekräftar således förändringar i de uppmätta lufthalterna av NO<sub>2</sub> över Sverige förändringen i de rapporterade utsläppen av oxiderat kväve till luft från Sverige och övriga Europa. Förändringar i lufthalterna under 2020, jämfört med de tre föregående åren analyseras vidare i kapitel 7.4 nedan.



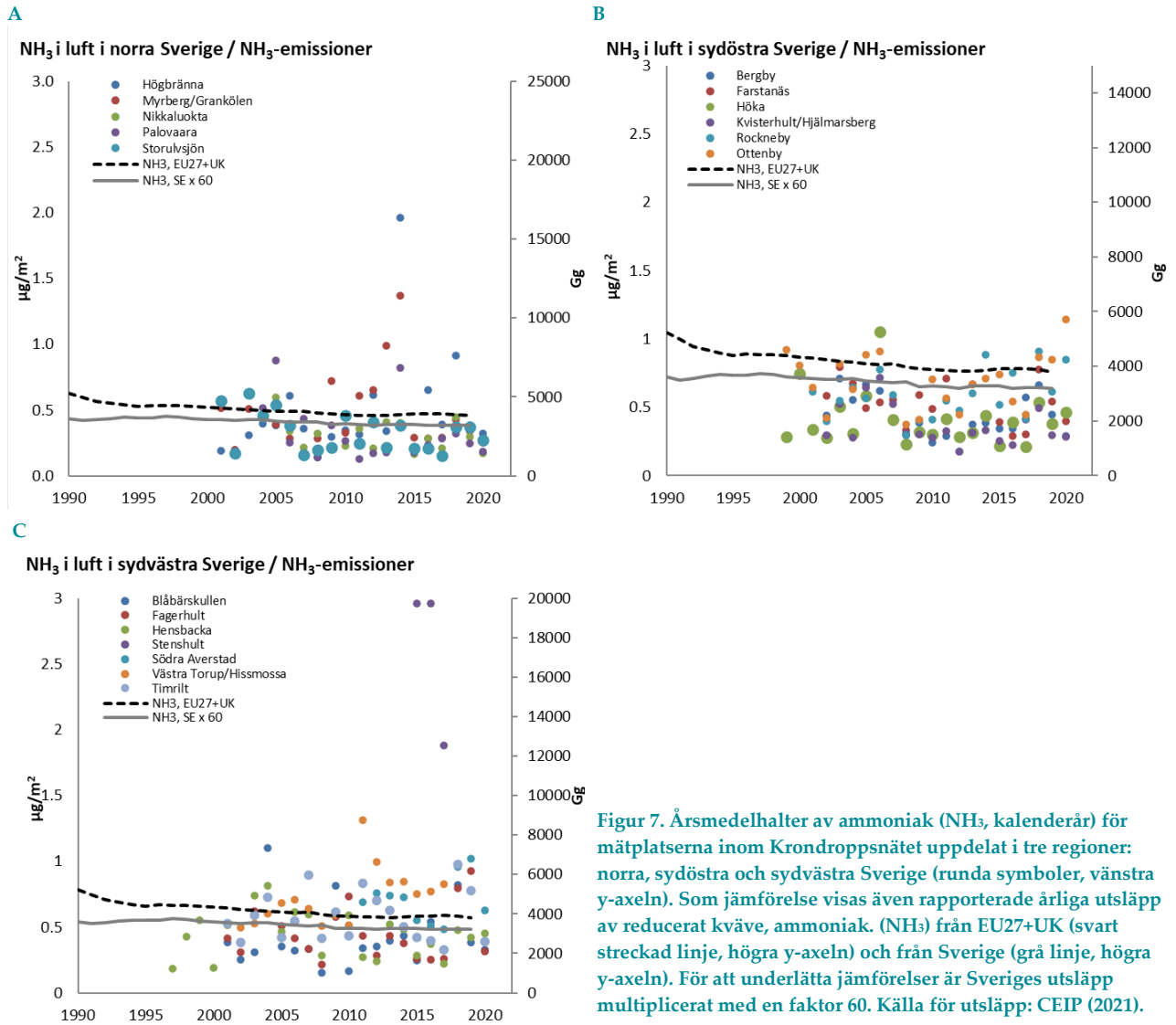
Figur 6. Årsmedelhalter av kvävedioxid (NO<sub>2</sub>, kalenderår) för mätplatserna inom Krondroppsnetet uppdelat i tre områden: norra, sydöstra och sydvästra Sverige (runda symboler, vänstra y-axeln). Som jämförelse visas även rapporterade årliga utsläpp av oxiderat kväve (NO<sub>x</sub>) från EU27+UK (svart streckad linje, högra y-axeln) och från Sverige (grå linje, högra y-axeln). För att underlätta jämförelser är Sveriges utsläpp multiplicerat med en faktor 60. Källa för utsläpp: CEIP (2021). Observera att skalan för NO<sub>2</sub> i luft är betydligt lägre för norra Sverige.

Jämförelsen mellan förändrade utsläpp och uppmätta lufthalter är svårare att göra för ammoniak, Figur 7. Detta beror på att gasformig ammoniak deponeras snabbare till den lokala omgivningen. Lufthalterna av gasformig ammoniak i bakgrundsmiljön blir därför generellt mycket låga. Ammoniak kan dock omvandlas till partikelformigt ammonium, vilket kan transporteras längre sträckor.

Mätningar av NH<sub>3</sub> i luft har inte bedrivits lika länge som övriga lufthaltsmätningar. De rapporterade årliga utsläppen av NH<sub>3</sub> har minskat något under perioden 2001–2019, med 11 procent för både EU27+UK och för Sverige (CEIP, 2021). De uppmätta lufthalterna av NH<sub>3</sub> har inte förändrats nämnvärt under denna tidsperiod, Figur 7, men utvecklingen ser lite olika ut, beroende på mätplats. Det är endast vid Hensbacka som ammoniakhalterna har minskat på ett statistiskt säkerställt sätt. Minskningen var 43 procent vilket är en betydligt större minskning jämfört med emissionsminskningarna under samma period.

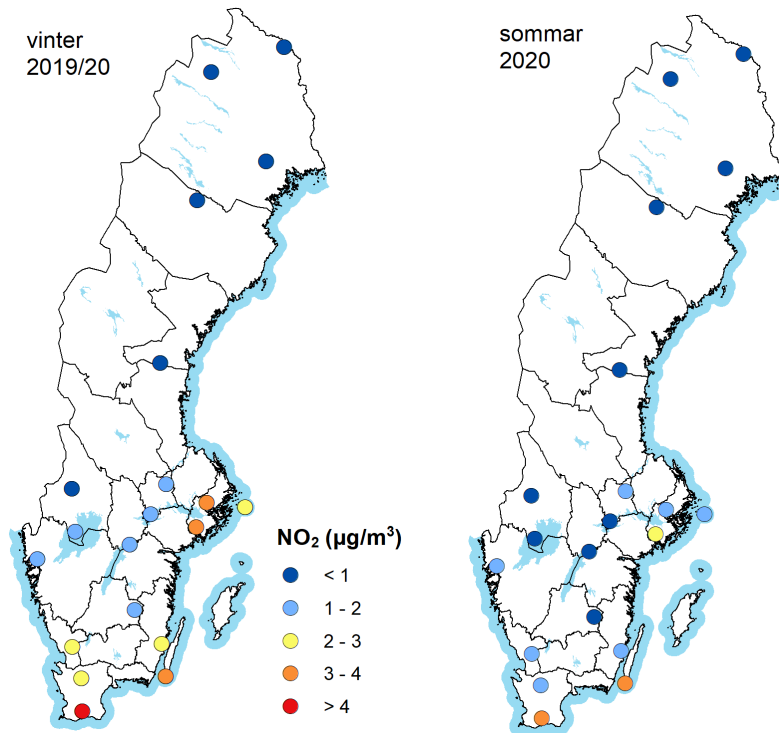
Mätningarna visar på relativt små skillnader i NH<sub>3</sub>-halter över landet. Vid vissa platser i jordbruksstata områden i Skåne var dock halterna av NH<sub>3</sub> högre, speciellt sommartid. Vissa år förekommer förhöjda halter av NH<sub>3</sub> vintertid vid flera platser i norra Sverige. Småskalig vedeldning kan även utgöra en källa till utsläpp av NH<sub>3</sub>.





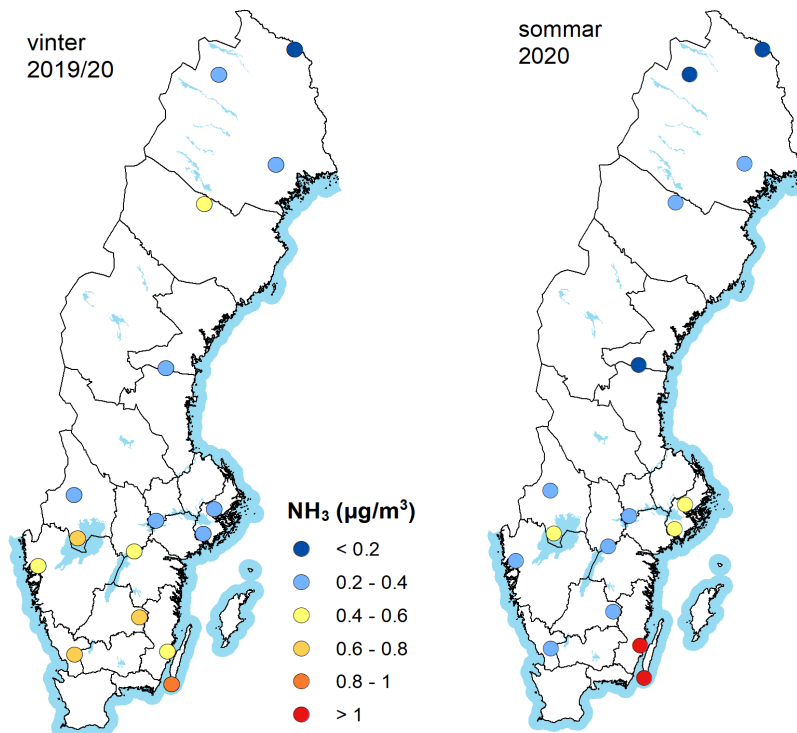
Figur 7. Årsmedelhalter av ammoniak (NH<sub>3</sub>, kalenderår) för mätplatserna inom Krondroppsnetet uppdelat i tre regioner: norra, sydöstra och sydvästra Sverige (runda symboler, vänstra y-axeln). Som jämförelse visas även rapporterade årliga utsläpp av reducerat kväve, ammoniak. (NH<sub>3</sub>) från EU27+UK (svart streckad linje, högra y-axeln) och från Sverige (grå linje, högra y-axeln). För att underlätta jämförelser är Sveriges utsläpp multiplicerat med en faktor 60. Källa för utsläpp: CEIP (2021).

I Figur 8 visas kartor med medelvärden för uppmätta lufthalter av kvävedioxid under vinterhalvåret 2019/20 och sommarhalvåret 2020 vid alla mätplatser inom Krondroppsnetet. Högst halter av NO<sub>2</sub> uppmättes vintertid i södra Skåne följt av Ölands södra udde och Stockholmstrakten. Lägst halter under vintern uppmättes i norra halvan av Sverige. Halterna av kvävedioxid var generellt något lägre sommartid men gradienten var likartad sommar och vinter. Lufthalterna vid Ölands södra udde och södra Skåne är sannolikt påverkade av fartygstrafiken på Östersjön.



Figur 8. Lufthalter av kvävedioxid (NO<sub>2</sub>) som medelvärden för vinter- (vänstra kartan) respektive sommarhalvår (högra kartan) vid mätstationerna inom Krondroppsnetet i Sverige. Vinterhalvåret omfattar oktober till mars och sommarhalvåret omfattar april till september.

I Figur 9 visas lufthalterna av ammoniak (NH<sub>3</sub>) under vinterhalvåret 2019/20 och sommarhalvåret 2020 vid alla mätplatser inom Krondroppsnetet. Halterna var generellt låga. Högst NH<sub>3</sub>-halter uppmättes sommaren 2020 på Ölands södra udde följt av området strax nordost om Kalmar. NH<sub>3</sub>-halterna brukar generellt vara högst i Götaland, sannolikt på grund av utsläpp från djurhållning och gödsling inom jordbruket. Även under vintern uppmättes högst ammoniakhalter vid Ölands södra udde, men relativt höga halter uppmättes även i hela södra Sverige. Stundtals uppmättes relativt höga halter av NH<sub>3</sub> i norra Sverige vintertid, vilket diskuterats ovan.

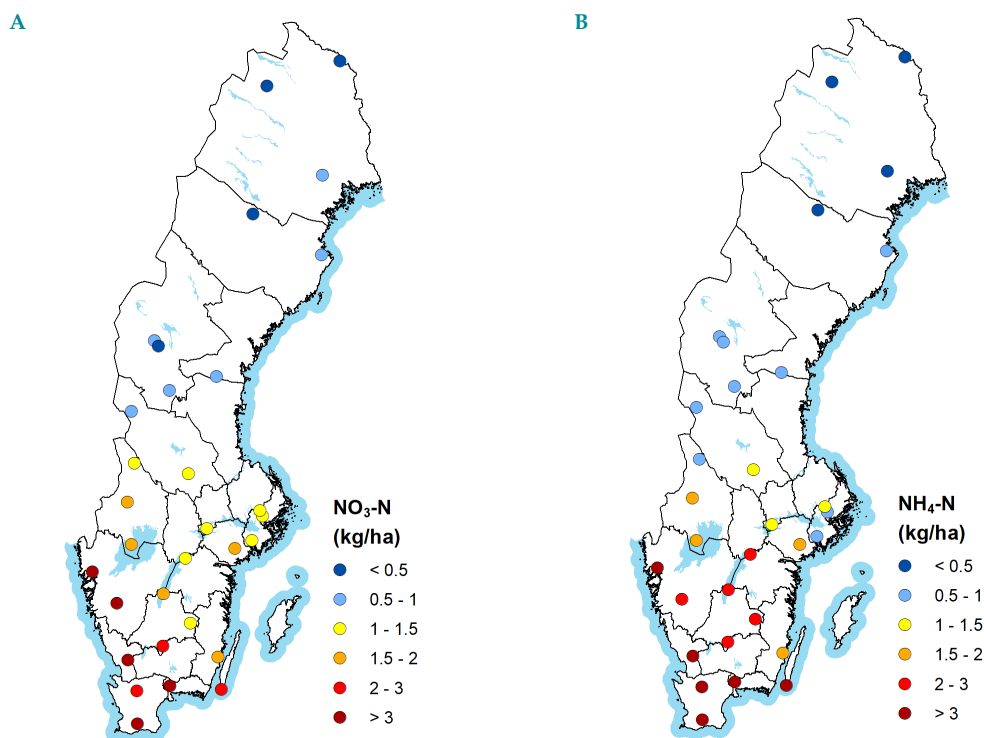


Figur 9. Lufthalter av ammoniak (NH<sub>3</sub>) som medelvärden för vinter- (vänstra kartan) respektive sommarhalvår (högra kartan) vid mätstationerna inom Krondroppsnetet i Sverige. Vinterhalvåret omfattar oktober till mars och sommarhalvåret omfattar april till september.

## 3.2 Kvävenedfallet över Sverige minskar

Skattningar av det totala nedfallet av kväve till skog i Sverige, inkluderat både torr- och våtdeposition, kan inte baseras endast på mätningar av krondropp, eftersom en del av deponerat kväve tas upp direkt i trädkronorna. Mätningar av nedfallet av kväve med nederbörden på öppet fält ger huvudsakligen ett mått på våtdepositionen, med ett litet bidrag av torrdeposition till insamlingsutrustningen. Istället måste skattningar av totalt nedfall av kväve till barrskog utgå från mätningar med så kallade strängprovtagare, i kombination med mätningar av krondropp och nederbörd på öppet fält (Karlsson m. fl., 2018a). Denna kombination av mätningar har bedrivits vid tio olika platser i Sverige, med delfinansiering från Naturvårdsverket. Andelen torrdeposition av den totala deponeringen av kväve följer ett geografiskt mönster över Sverige. Detta gör att det totala kvävenedfallet till barrskog kan uppskattas för alla platser i Sverige där det bedrivits mätningar av nedfall med nederbörden på öppet fält.

I Figur 10 A-B visas nedfall med nederbörden till öppet fält, vilket i stort sett motsvarar våtdepositionen, av nitratkväve, ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) och ammoniumkväve, ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) under det hydrologiska året 2019/20. Den starka gradienten i kvävenedfall från sydväst mot nordost framgår tydligt i alla kartor, för både  $\text{NO}_3\text{-N}$  och  $\text{NH}_4\text{-N}$  samt för totalt oorg-N, Figur 11. Kvävenedfallet med nederbörden till öppet fält under 2019/20 låg mellan 3-6 kg N per hektar längst i sydväst (Skåne, Bleking och Halland) och mindre än 0,5 kg N per hektar längst i norr, för både  $\text{NO}_3\text{-N}$  och  $\text{NH}_4\text{-N}$ .



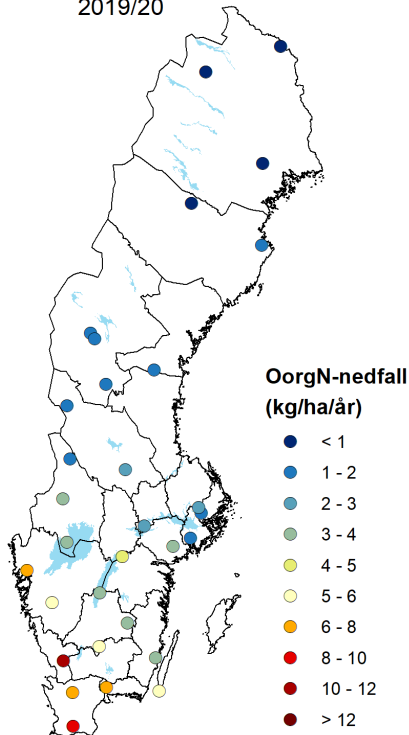
Figur 10. Nedfall av nitrat ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), ammonium ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) under det hydrologiska året 2019/20. A. Uppmätt nedfall av  $\text{NO}_3\text{-N}$  till öppet fält. B. Uppmätt nedfall av  $\text{NH}_4\text{-N}$  till öppet fält.

I Figur 11A visas nedfall av totalt oorganiskt kväve ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ) med nederbörden till öppet fält. Dessutom visas i Figur 11B det totalt beräknade nedfallet (summan av torr- och våtdeposition) av oorg-N till barrskog. Den starka gradienten i kvävenedfall från sydväst mot nordost framgår tydligt även för totalt oorg-N både för endast via nederbörden samt det totala kvävenedfallet (våt- plus torrdeposition). Sammantaget blir nedfallet av oorg-N med nederbörden till öppet fält längst i sydväst 6-12 kg N per hektar under det hydrologiska året 2019/20. Detta kan jämföras med det beräknade totala nedfallet av oorganiskt-N längst i sydväst, 7-16 kg N per hektar under 2019/20. Särskilt märks detta vid Stenshult på Romelåsen i södra Skåne med strax under 10 kg N per hektar för nedfall med nederbörden till öppet fält och strax över 15 kg N per

hektar för beräknat totalt nedfall till barrskog. För norra Sverige blir skillnaderna mindre då torrdepositionen är lägre i dessa områden.

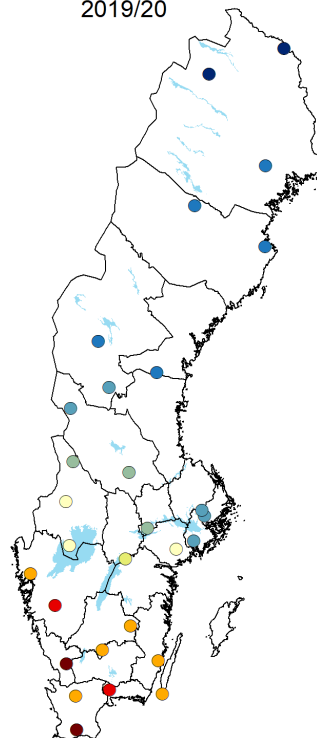
#### A Kvävenedfall med nederbörden

2019/20



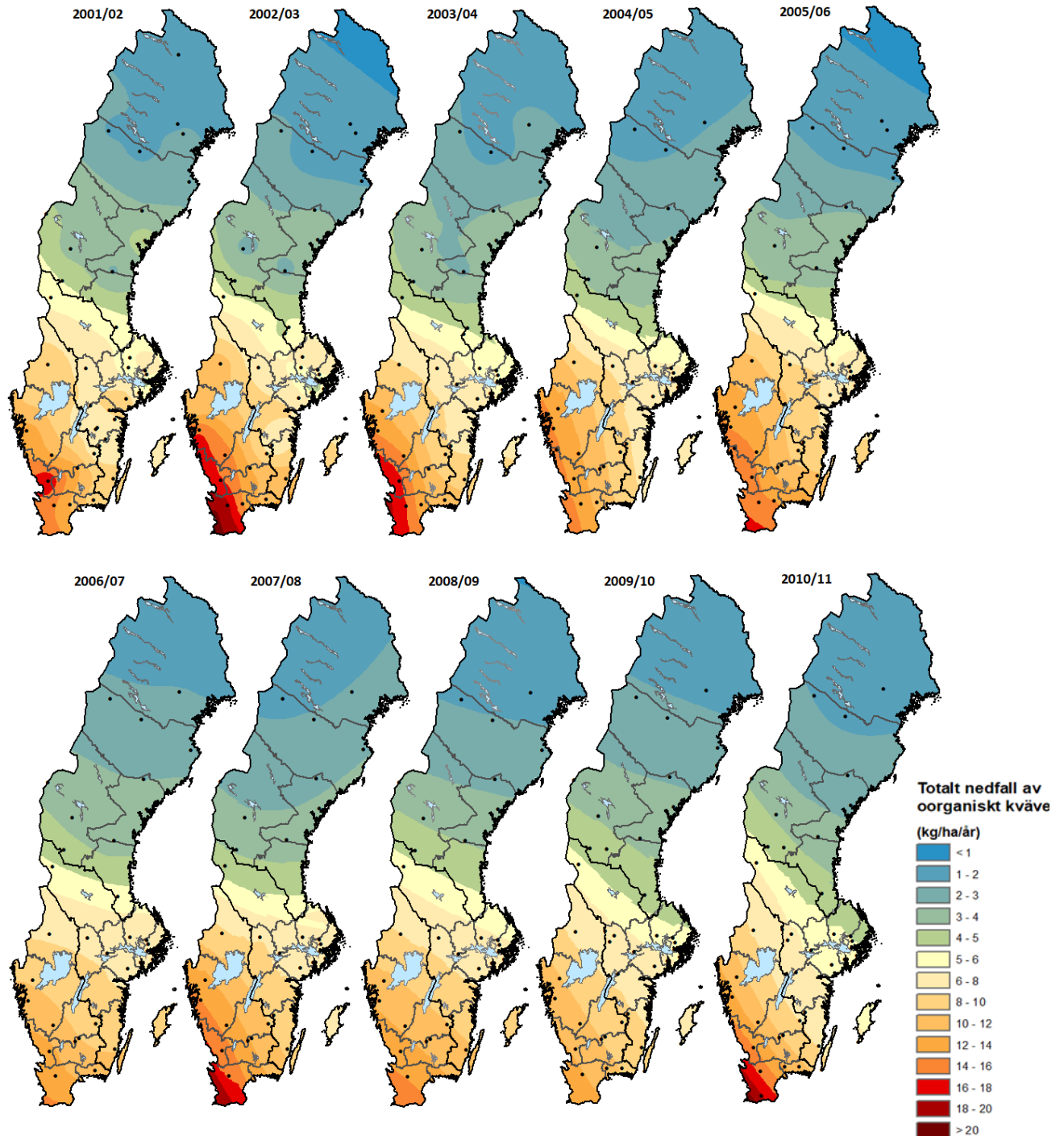
#### B Totalt kvävenedfall torr- + våtdeposition

2019/20

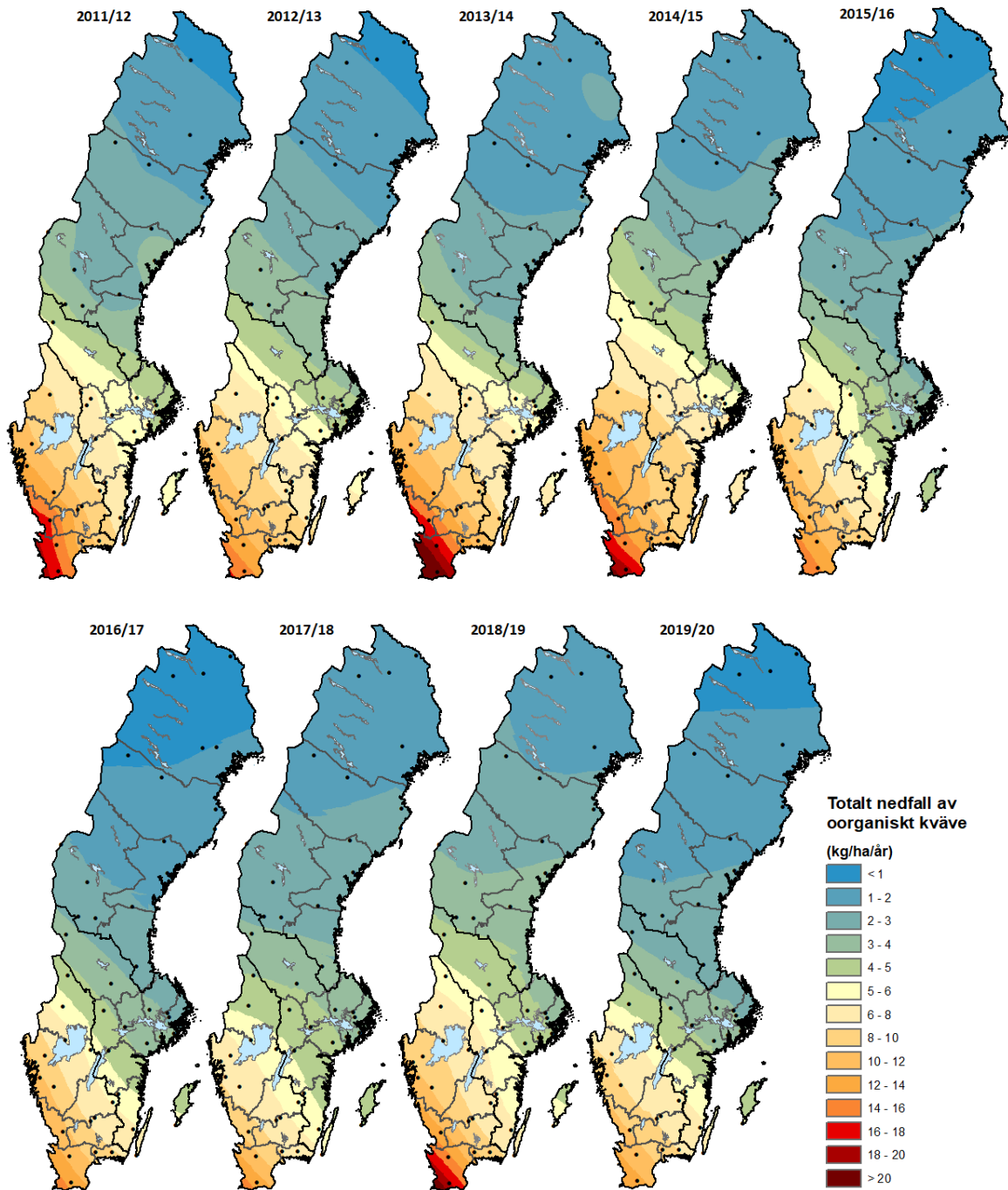


Figur 11. Nedfall av oorganiskt kväve ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) under det hydrologiska året 2019/20. A. Uppmätt nedfall av oorganiskt kväve (Oorg-N,  $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) till öppet fält. B. Beräknat totalt nedfall (torr- och våtdeposition) av oorg-N till barrskog. Metoden att beräkna totalt kvävenedfall baserar sig på resultat från kombinerade mätningar av nedfall till öppet fält, nedfall som krondropp och mätningar av torrdeposition med strängprovtagare enligt metodik i Karlsson m.fl. 2018a, 2021a.

I Figur 12A och B visas geografiskt interpolerade kartor över beräknat totalt nedfall (torr- + våtdeposition) av oorganiskt N ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ) för de hydrologiska åren 2001/02 till och med 2019/20. I dessa kartor har även mätresultat från ytterligare mätplatser, som ingår i den nationella miljöövervakningen, inkluderats för platser där mätutrustningen är likadan som den som används inom Krondroppsnetet på öppet fält. Storleken på kvävenedfallet varierar något mellan olika år. Den kritiska belastningsgränsen som används i Sverige för kvävenedfall till barrskog, 5 kg N per hektar och år, överskrids under alla år i Götaland och i södra delarna av Svealand.



Figur 12A. Geografiskt interpolerade kartor över beräknat totalt nedfall (torr- och våtdeposition) av oorganiskt kväve ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ) för hydrologiska år under perioden 2001/02 – 2010/11. Metoden baserar sig på resultat från kombinerade mätningar av nedfall till öppet fält, nedfall som krondropp och mätningar av torrdeposition med strängprovtagare enligt metodik i Karlsson m.fl. 2018a; 2021a. Den geografiska interpoleringen har gjorts med Kriging-metodik. (Empirical Bayesian kriging (EBK)). Svarta prickar anger de mätplatser för vilka det totala kvävenedfallet har beräknats för respektive år. I denna analys har, förutom platser inom Krondroppsnetet, även andra mätplatser med samma mätutrustning på öppet fält inom den nationella miljöövervakningen inkluderats.

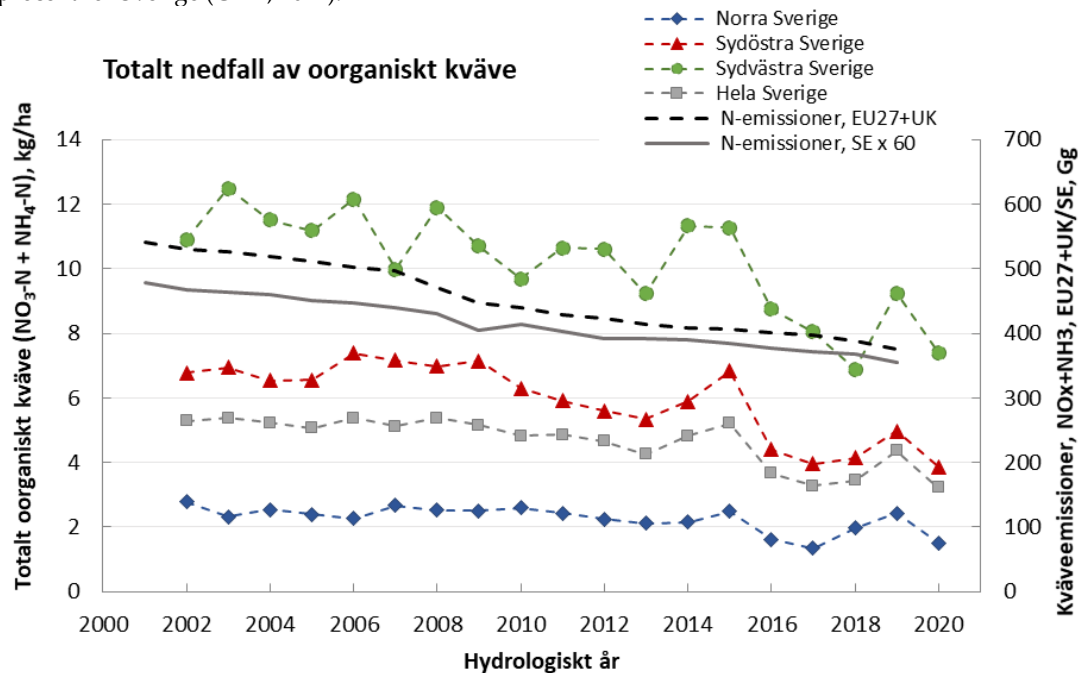


**Figur 12B.** Geografiskt interpolerade kartor över beräknat totalt nedfall (torr- och våtdeposition) av oorganiskt kväve ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ) för hydrologiska år under perioden 2011/12 – 2019/20. Metoden baserar sig på resultat från kombinerade mätningar av nedfall till öppet fält, nedfall som krondropp och mätningar av torrdeposition med strängprovtagare enligt metodik i Karlsson m.fl. 2018a; 2021a. Den geografiska interpoleringen har gjorts med Kriging-metodik. (Empirical Bayesian kriging (EBK)). Svarta prickar anger de mätplatser för vilka det totala kvävenedfallet har beräknats för respektive år. I denna analys har, förutom platser inom Krondroppsnetet, även andra mätplatser med samma mätutrustning på öppet fält inom den nationella miljöövervakningen inkluderats.

I Figur 13 visas tidsserier för årligt (hydrologiskt år) totalt nedfall av oorganiskt-N ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ , torr- + våtdeposition) under perioden 2001/02-2019/20, till Sverige som helhet samt till de tre olika geografiska områdena, Figur 3. Medelvärden baseras på de geografiskt interpolerade värdena för de tre regionerna i Figur 12 A-B. För perioden 2001/02-2006/07 beräknades torrdepositionen med en något justerad metod (Karlsson m.

fl., 2018a; 2021a). För perioden 2007/08-2012/13 kunde torrdepositionen inte beräknats då det inte fanns några mätningar med strångprovtagare under denna perioden. Därför har torrdepositionen för denna period interpolerats baserat på värden före och efter den saknade perioden.

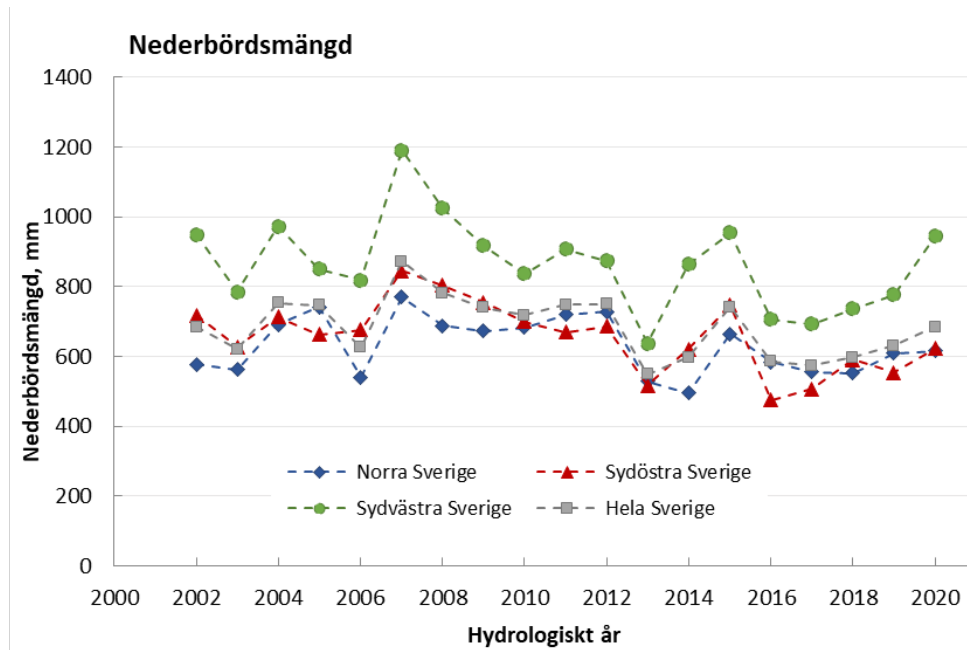
Det totala nedfallet av oorganiskt kväve har minskat på ett statistiskt säkerställt sätt under 19-årsperioden 2001/02-2019/20, både för Sverige som helhet och för de tre olika regionerna. Nedgången var 33 procent för Sverige som helhet och 30, 43 och 33 procent för respektive norra, sydöstra och sydvästra Sverige. Minskningen i kväveutsläpp ( $\text{NO}_x + \text{NH}_y$ ) under kalenderåren 2001–2019, var 31 procent för EU27+UK och 25 procent för Sverige (CEIP, 2021).



Figur 13. Tidsserier för årligt totalt nedfall av oorganiskt kväve ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ , torr + våtdeposition) till Sverige som helhet samt till tre geografiska områden, Figur 3, under perioden 2001/02-2019/20. Beräknade värden gäller hydrologiska år. Medelvärden baseras på de geografiskt interpolerade värdena i Figur 12. Metoden baserar sig på resultat från kombinerade mätningar av nedfall till öppet fält, nedfall som krondropp och mätningar av torrdeposition med strångprovtagare. För perioden 2001/02-2006/07 beräknades torrdepositionen med en något justerad metod. För perioden 2007/08-2012/13 kunde torrdepositionen inte beräknats, då inga mätningar med strångprovtagare genomfördes, utan den har för denna period interpolerats baserat på värden före och efter den saknade perioden. Beräkningarna beskrivs i Karlsson m. fl., 2018a samt i Karlsson m. fl., 2021a. Som jämförelse visas även rapporterade årliga utsläpp av oxiderat och reducerat kväve ( $\text{NO}_x + \text{NH}_3$ ) från EU27+UK (svart streckad linje, högra y-axeln) och från Sverige (grå linje, högra y-axeln). För att underlätta jämförelser är Sveriges utsläpp multiplicerat med en faktor 60. Källa utsläpp: CEIP (2021).

För hela Sverige har torrdepositionen av oorg-N minskat statistiskt säkerställt med 33 procent, liksom för sydöstra Sverige med 38 procent och sydvästra Sverige med 28 procent. För norra Sverige finns ingen statistiskt säkerställd förändring av torrdepositionen. Våtdepositionen av oorg-N har minskat för hela Sverige med 36 procent, för norra Sverige med 39 procent, för sydöstra Sverige med 45 procent och för sydvästra Sverige med 26 procent.

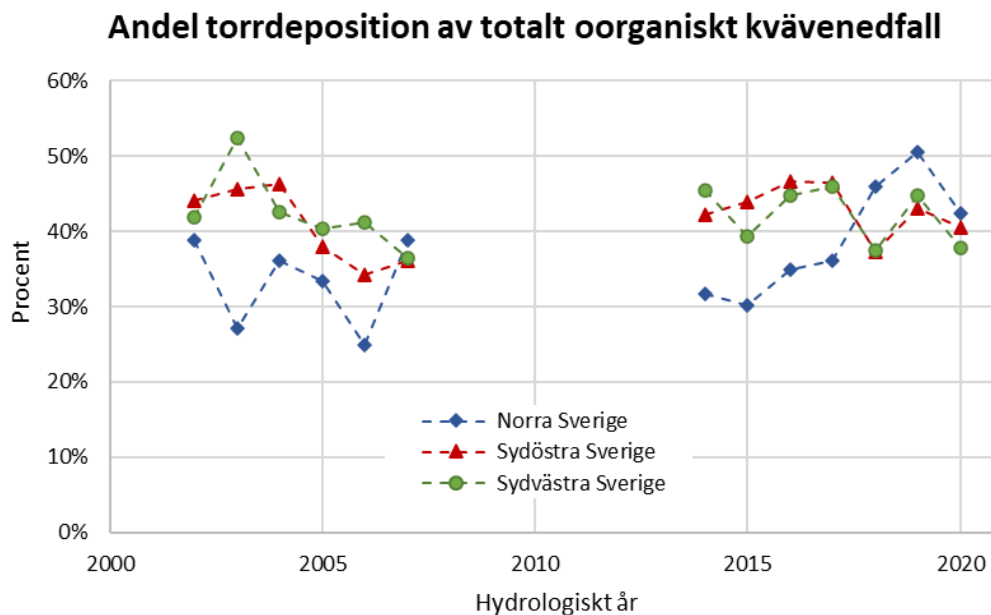
I Figur 14 visas de årliga nederbördsmängderna som geografiskt interpolerade medelvärden för de olika geografiska regionerna under 19-årsperioden 2001/02-2019/20. De årliga nederbördsmängderna har inte förändrats på ett statistiskt säkerställt sätt över 19-årsperioden för Sverige som helhet, norra eller för sydvästra Sverige. Däremot har nederbördsmängden i sydöstra Sverige minskat med 22 procent under perioden 2001/02 till 2019/20. Höga nederbördsmängder påverkar potentiellt depositionen genom att "tvätta ur" (engelska "washout") gas- och partikelformiga luftföroreningar från luften, vilket kan resultera i högre värden på våtdeposition och lägre värden på torrdeposition (Hertel m. fl., 2011). Minskade nederbördsmängder kan ha bidragit till minskad våtdeposition av oorg-N i sydöstra Sverige, däremot inte till den minskade torrdepositionen.



Figur 14. Årliga nederbörds mängder (hydrologiskt år) som geografiskt interpolerade medelvärden för Sverige som helhet samt för tre olika geografiska områden i Sverige, Figur 3.

I Figur 15 visas årliga värden för andel torrdeposition av total deposition av oorganiskt-N, baserat på samma beräkningar som i Figur 13. Här visas inte värden för den period då torrdepositionen interpolerades.

Andelen torrdeposition av den totala depositionen av oorganiskt-N har inte förändrats över tiden, baserat på de år då mätningar av torrdepositionen funnits tillgängligt. Andelen torrdeposition varierar något för olika år och olika regioner, mellan 35 och 50 procent, förutom i den nordliga regionen där andelen torrdeposition de flesta år är lägre. Att uppskatta nedfallet av oorganiskt-N till skog baserat på endast mätningar av nedfall med nederbörden till öppet fält, så som görs i den fördjupade utvärderingen av miljö kvalitetsmålet "Bara naturlig försurning", medför således en betydande underskattning.



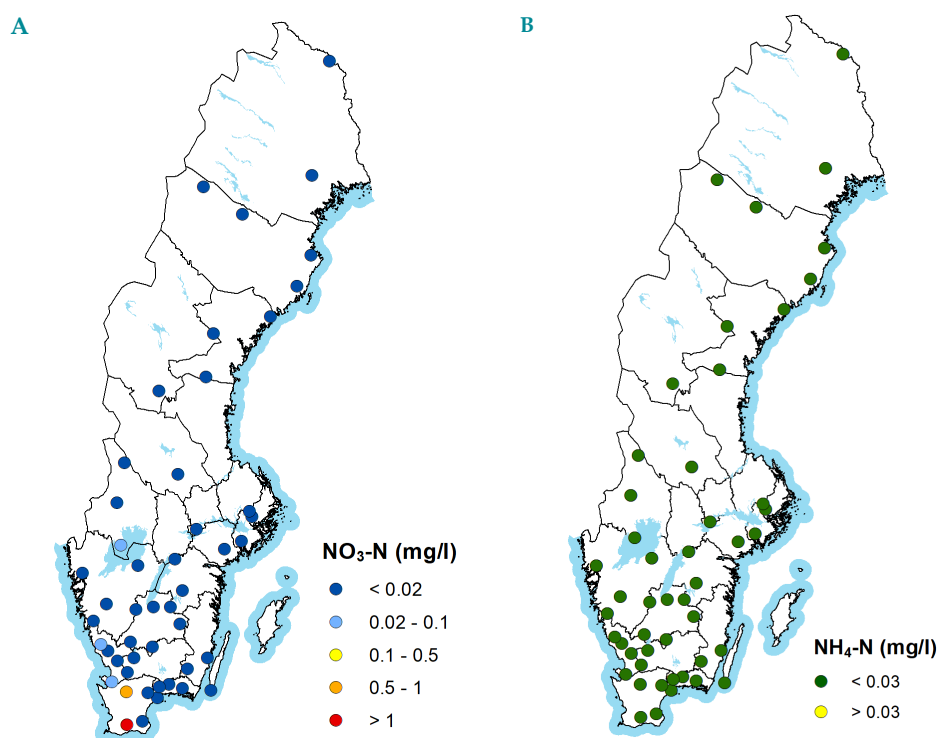
Figur 15. Andel torrdeposition av total deposition av oorg-N för hydrologiska år, baserat på samma data som används i Figur 12 för de tre regionerna från Figur 3.



### 3.3 Läcker det kväve från de svenska skogarna?

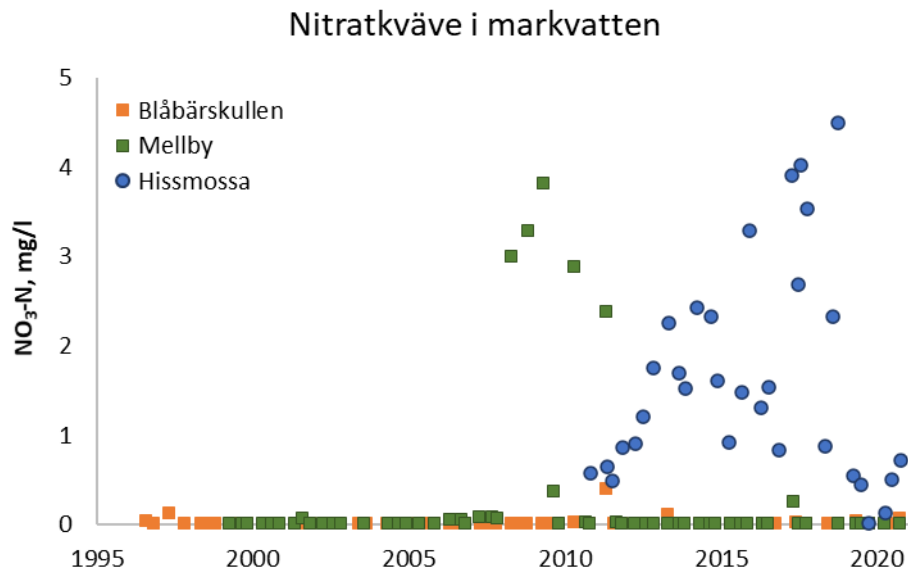
I merparten av Sveriges skogar råder kvävebegränsning, vilket innebär att allt tillfört kväve tas upp av träd, annan vegetation och mikroorganismer, och att mängden kväve som lämnar skogsekosystemen med avrinningen är mycket liten (Tamm, 1991). I dessa skogar läcker kväve ut enbart efter störningar av olika slag, till exempel avverkning eller stormfällning, då upptaget minskar kraftigt (Akselsson m.fl., 2004; Hellsten m.fl., 2015; Karlsson m.fl., 2018b). I de allra sydligaste delarna av Sverige, framför allt i Skåne och Halland, har det dock uppmätts förhöjda halter av nitratkväve i markvattnet vid ett flertal platser genom åren även i ostörd skog (Akselsson m.fl., 2010).

Under perioden 2018–2020 var det bara två mätplatser som uppvisade kraftigt förhöjda nitratkvävehalter, den nya ytan vid Stenshult, som startade först 2019, och därmed enbart har fyra mätningar under perioden och Hissmossa i Skåne, Figur 16A. Medianvärdena för nitratkväve vid dessa platser uppgick till 0,5 respektive 3,3 mg/l. Ammoniumkvävehalterna var genomgående låga, under 0,03 mg/l på samtliga mätplatser, Figur 16B.



Figur 16 A. Koncentrationen av nitrat och B. Ammoniumkväve i markvattnet på 50 cm djup vid olika platser inom Krondroppsnetet redovisat som medianvärde från de senaste tre årens mätningar (2018–2020). Ytor med mindre än tre mätvärden under treårsperioden, samt ytor som har avverkats eller gödslats har tagits bort.

För nitratkväve i markvattnet finns inga tydliga trender i tiden. I Figur 17 visas tre exempel på mätserier, från Blåbärskullen i Värmland, Mellby i Jönköpings län och från Hissmossa i Skåne. I Blåbärskullen i Värmland har nitratkvävehalten varit mycket låg under hela mätserien, vilket är fallet för flertalet mätplatser inom Krondroppsnetet. Några mätplatser har uppvisat förhöjda halter under kortare perioder, i samband med störningar, till exempel stormskador. Stormarna Gudrun (2005) och Per (2007) påverkade nitrathalterna på flera platser, bland annat i Mellby i Jönköpings län. Hissmossa i Skåne är ett av två exempel på aktiva mätplatser där nitratkvävehalterna varit förhöjda sedan mätstart, vilket visar på att marken är kvävemättad. Högsta uppmätta nitratkvävehalten vid dessa mätplatser uppmättes i Hissmossa och var 4,5 mg/l, i september 2018.



Figur 17. Nitratkvävehalten i markvattnet vid tre mätplatser inom Krondropps nätet: Mellby i Jönköpings län, Blåbärskullen i Värmlands län och Hissmossa i Skåne län. Markvattnet provtas normalt tre gånger årligen, före, under och efter växtsäsongen. Vissa provtillfällen kan saknas när det varit torrt i marken.



## 4 Nedfall av försurande ämnen och dess effekter

Mätningar av krondropp med vinterutrustning, Ammarnäs, Västerbottens län Fotograf: Mårten Strömgren

Mark och vatten i olika delar av Sverige är fortfarande försurat och det bedrivs därför en fortsatt omfattande kalkningsverksamhet i landet. Försurning av mark och vatten orsakas av både svavel- och kvävenedfall, men även skogsbruket bidrar eftersom träd tillväxt innebär försurning, som permanentas när biomassa skördas och förs bort från skogen. Utsläpp av oxiderat svavel (SO<sub>x</sub>) från industrier och från förbränning av kol och olja är den största orsaken till försurning av mark och vatten i Sverige. Vid låga pH uppträder aluminium som en giftig trevärd jon, som kan skada fiskar och andra vattenlevande organismer samt även skada trädens rötter. En ytterligare effekt av lågt pH är att vissa andra metaller, till exempel kadmium och bly, blir mer lättlösliga i marken och kan läcka ut till ytvattnet.

## 4.1 Uppmätta lufthalter återspeglar minskande svavelutsläpp

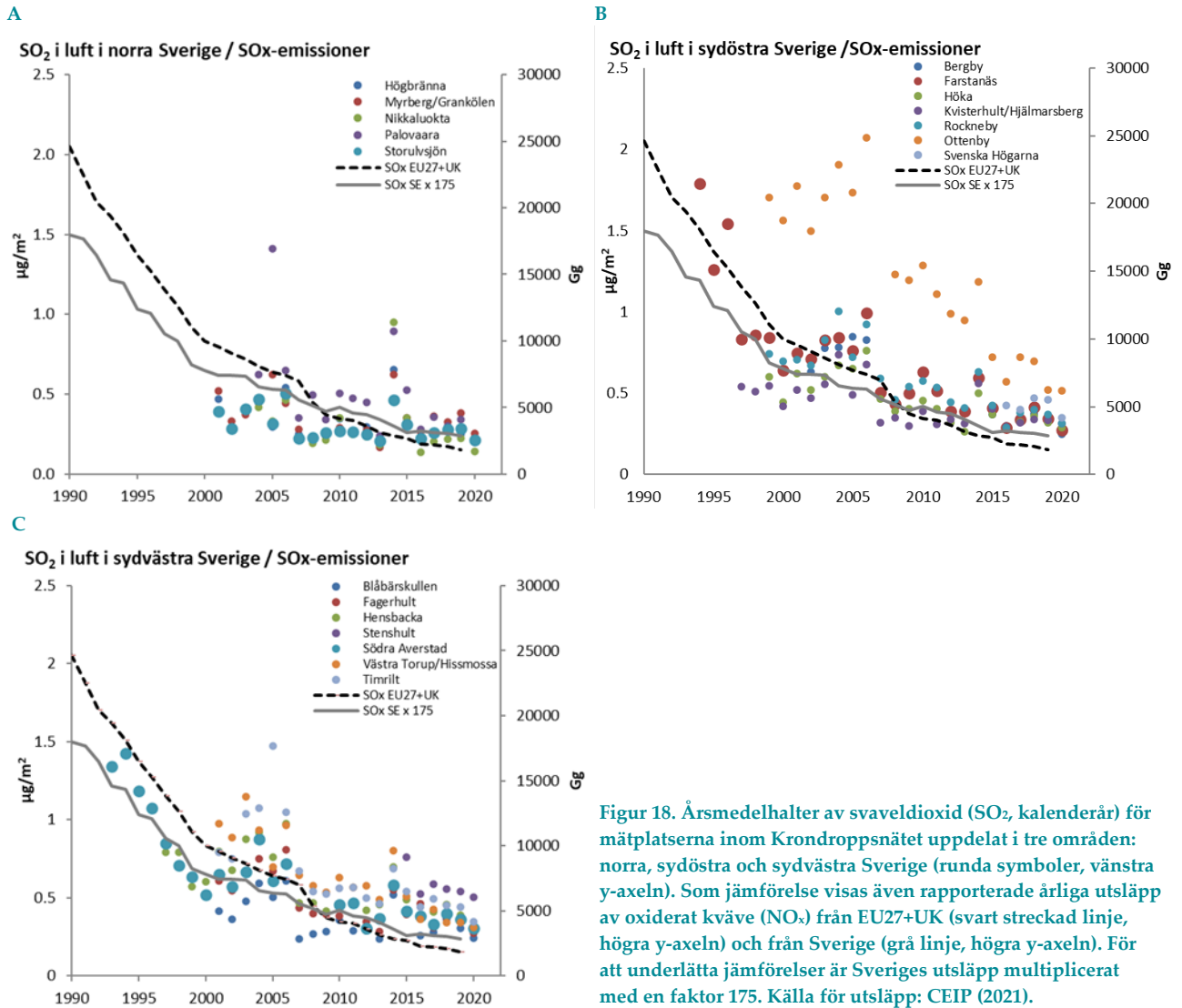
I Figur 18 visas årsmedelhalter (kalenderår) av svaveldioxid (SO<sub>2</sub>) i luft från de olika mätplatserna inom Krondroppsnetet i olika områden av Sverige, Figur 3. I figurerna visas även den årliga utvecklingen när det gäller utsläpp av SO<sub>x</sub> från Sverige respektive Europa som helhet (EU27+UK). Skalorna för såväl lufthalter som utsläpp är valda så att de så långt möjligt sammanfaller i början av mätserierna. När det gäller skalorna för emissionerna är Sveriges utsläpp avseende SO<sub>2</sub> multiplicerat med en faktor 75, för att de svenska emissionerna i figurerna ska ligga på liknande nivå som utsläppen för EU27+UK.

Utsläppen av svavel från såväl Sverige som från övriga Europa minskade kraftigt under 1990-talet, medan minskningstakten under 2000-talet var något lägre. Svavelutsläppen har dock fortsatt minska ända fram till idag. I januari 2015 infördes en begränsning av svavelinnehållet i fartygsbränsle inom svavelkontrollområdet (SECA), Östersjön, Nordsjön och engelska kanalen. Detta beräknas ha medfört en betydande minskning av svavelutsläppen från Östersjön och Västerhavet (Naturvårdsverket, 2019). Emellertid påverkade även ett kraftigt vulkanutbrott på Island mellan september 2014 och februari 2015 förekomsten av svavel över Sverige (Hellsten m.fl., 2017). Minskningen i SO<sub>x</sub>-utsläpp under perioden 2001–2019, var 88 procent för EU27+UK och 67 procent i Sverige (CEIP, 2021). Under perioden 2001–2020 har SO<sub>2</sub>-halterna i luften minskat på ett statistiskt säkerställt sätt vid 11 av 14 mätplatser som har mätningar under den perioden med mellan cirka 40 och 75 procent.

Uppmätta lufthalter av svaveldioxid över Sverige har i stort sett minskat i samma takt som svavelutsläppen, Figur 18. För de flesta mätplatser i sydvästra och norra Sverige syns förhöjda lufthalter av SO<sub>2</sub> under 2014 som en följd av bidraget från vulkanutbrottet på Island. I synnerhet gäller detta för de två nordligaste mätplatserna Nikkaluokta och Palovaara. För flera av mätplatserna var halterna av SO<sub>2</sub> under kalenderåret 2020 bland de lägsta som uppmätts under respektive mätserie. I kapitel 7.4 diskuteras inverkan av nedstängningar av olika samhällsaktiviteter som gjordes under 2020 på grund av Covid-19 på bland annat svaveldioxidhalterna i luft.

Vid mätplatserna i norra Sverige följer minskningen av halterna av SO<sub>2</sub> i luft de rapporterade emissionsminskningarna relativt väl. Vid en del platser var dock minskningen av lufthalterna något mindre, till exempel vid Storulvsjön i Västernorrlands län, som visas med en större blå markering i Figur 18A. Vid Farstanäs, söder om Stockholm, i sydöstra Sverige (något större röda markeringar i Figur 18B) följer minskningen i SO<sub>2</sub>-halterna de rapporterade emissionsminskningarna väl. Även vid flertalet andra mätplatser i sydöstra Sverige minskar lufthalterna på ett liknande sätt som emissionerna. Halterna av svaveldioxid är höga vid Ottenby på Ölands södra udde, främst beroende på svavelutsläpp från fartygstrafiken, men även där har lufthalterna minskat kraftigt.

Även i sydvästra Sverige minskar lufthalterna i takt med minskade utsläpp. Exempel på detta är Södra Averstad i Värmlands län (större blåa prickar i Figur 18C), där minskningen av SO<sub>2</sub>-halterna följer de rapporterade emissionsminskningarna väl.



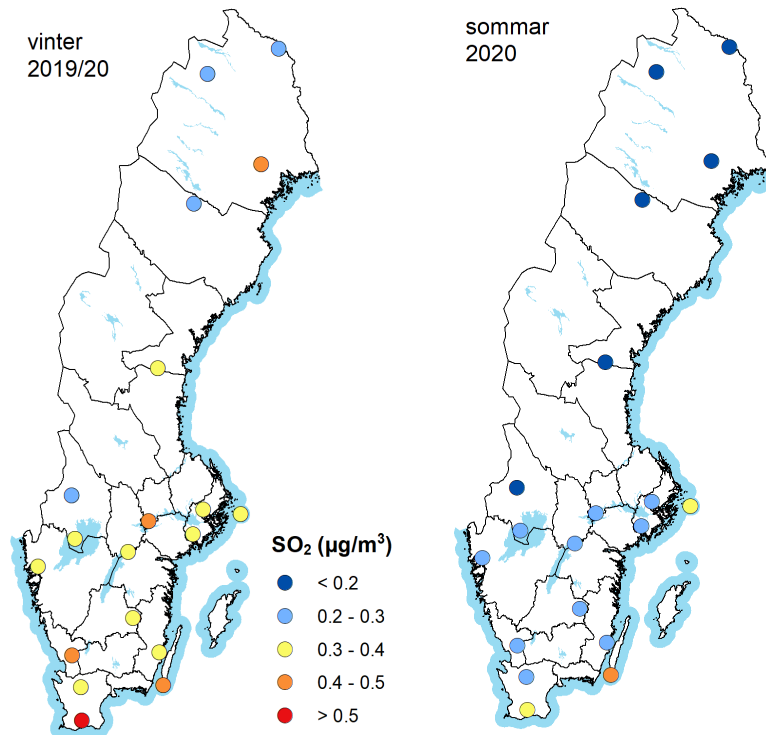
Figur 18. Årsmedelhalter av svaveldioxid (SO<sub>2</sub>, kalenderår) för mätplatserna inom Krondroppsnetet uppdelat i tre områden: norra, sydöstra och sydvästra Sverige (runda symboler, vänstra y-axeln). Som jämförelse visas även rapporterade årliga utsläpp av oxiderat kväve (NO<sub>x</sub>) från EU27+UK (svart streckad linje, högra y-axeln) och från Sverige (grå linje, högra y-axeln). För att underlätta jämförelser är Sveriges utsläpp multiplicerat med en faktor 175. Källa för utsläpp: CEIP (2021).

Minskade svavelutsläpp från fartygstrafiken från januari 2015 kan förväntas ha resulterat i tydligt minskade lufthalter av SO<sub>2</sub> vid kustnära mätplatser i främst södra Sverige. Det kan emellertid vara svårt att utskilja en sådan effekt, eftersom utsläpp av svavel från Europa som helhet har fortsatt att minska samt att utsläpp från vulkanutbrottet på Island påverkade halterna av svavel över Sverige under 2014 och 2015. Ett sätt att analysera detta kan vara att jämföra tidsutvecklingen vad gäller lufthalter av SO<sub>2</sub> vid kustnära platser med motsvarande tidsutveckling vid platser längre inåt landet i södra Sverige, före och efter minskningen av svavelhalter i fartygsbränsle 2015.

För att genomföra denna analys bildades femårs medelvärden för lufthalter av SO<sub>2</sub> vid kustnära platser respektive platser mer i inlandet i sydvästra och sydöstra Sverige, före och efter sänkningen av svavel i fartygsbränsle. Åren 2014 och 2015 uteslöts från analysen på grund av påverkan från svavelutsläpp från vulkanen på Island. Jämförelser gjordes därför mellan medelvärden för lufthalter av SO<sub>2</sub> för perioderna 2009–2013 respektive 2016–2020. För de kustnära platserna i sydvästra Sverige, Hensbacka, Södra Averstad, Timrilt samt Hissmossa, var halterna av SO<sub>2</sub> för den senare perioden 2016–2020 12, 11, 17 och 36 procent lägre, jämfört med den tidigare perioden 2009–2013. För kustnära platser i sydöstra Sverige, Farstanäs, Rockneby och Ottenby, var halterna av SO<sub>2</sub> 31, 30 och 45 procent lägre för den senare perioden jämfört med den första perioden. För platser som ligger mer i inlandet, Blåbärskullen, Fagerhult, Höka och Kvisterhult, var halterna av SO<sub>2</sub> 0, 5, 15 och 3 procent lägre för den senare perioden, jämfört med den första perioden. Sammantaget var minskningen mellan de två tidsperioderna 26 +/- 13 procent (standardavvikelse) för de kustnära platserna och 6 +/- 6 procent för platserna som var belägna mer i inlandet. Det finns därmed en indikation på att lufthalterna

av SO<sub>2</sub> har minskat mer efter sänkningen av svavelhalterna i fartygsbränsle vid de kustnära platserna, jämfört med platser belägna mer inlandet. Ett minskat svavelinnehåll i fartygsbränsle efter januari 2015 kan därför ha resulterat i en minskad svavelbelastning vid kustnära platser i södra Sverige.

I Figur 19 visas medelvärden för lufthalterna av svaveldioxid under vinterhalvåret 2019/20 och sommarhalvåret 2020 vid samtliga mätplatser inom Krondroppsnetet. Under vintern 2019/20 uppmättes de högsta SO<sub>2</sub>-halterna vid Stenshult på Romeleåsen i södra Skåne, följt av Ottenby vid Ölands södra udde, Timrilt öster om Halmstad, samt vid Grankölen i Norrbotten. Under sommaren 2020 var halterna generellt lägre, men fortfarande var halterna höga vid Ottenby följt av Stenshult och även Svenska Högarna i Stockholms skärgård.



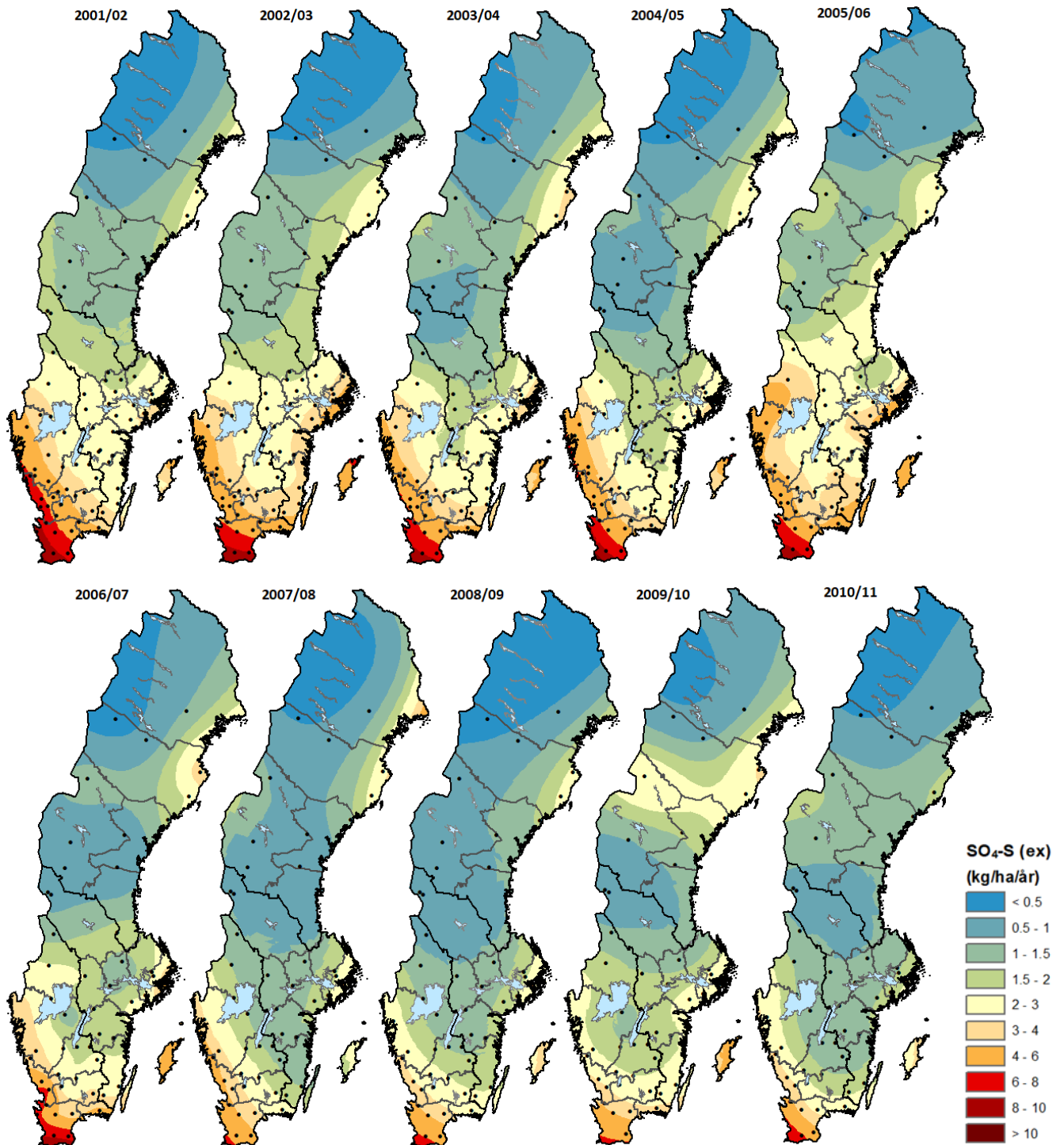
Figur 19. Lufthalter av svaveldioxid (SO<sub>2</sub>) som medelvärden för vinter- (karta till vänster) respektive sommarhalvår (karta till höger) 2019/20 vid mätstationerna inom Krondroppsnetet i Sverige. Vinterhalvåret omfattar oktober till mars och sommarhalvåret omfattar april till september.

## 4.2 Svavelnedfallet fortsätter att minska

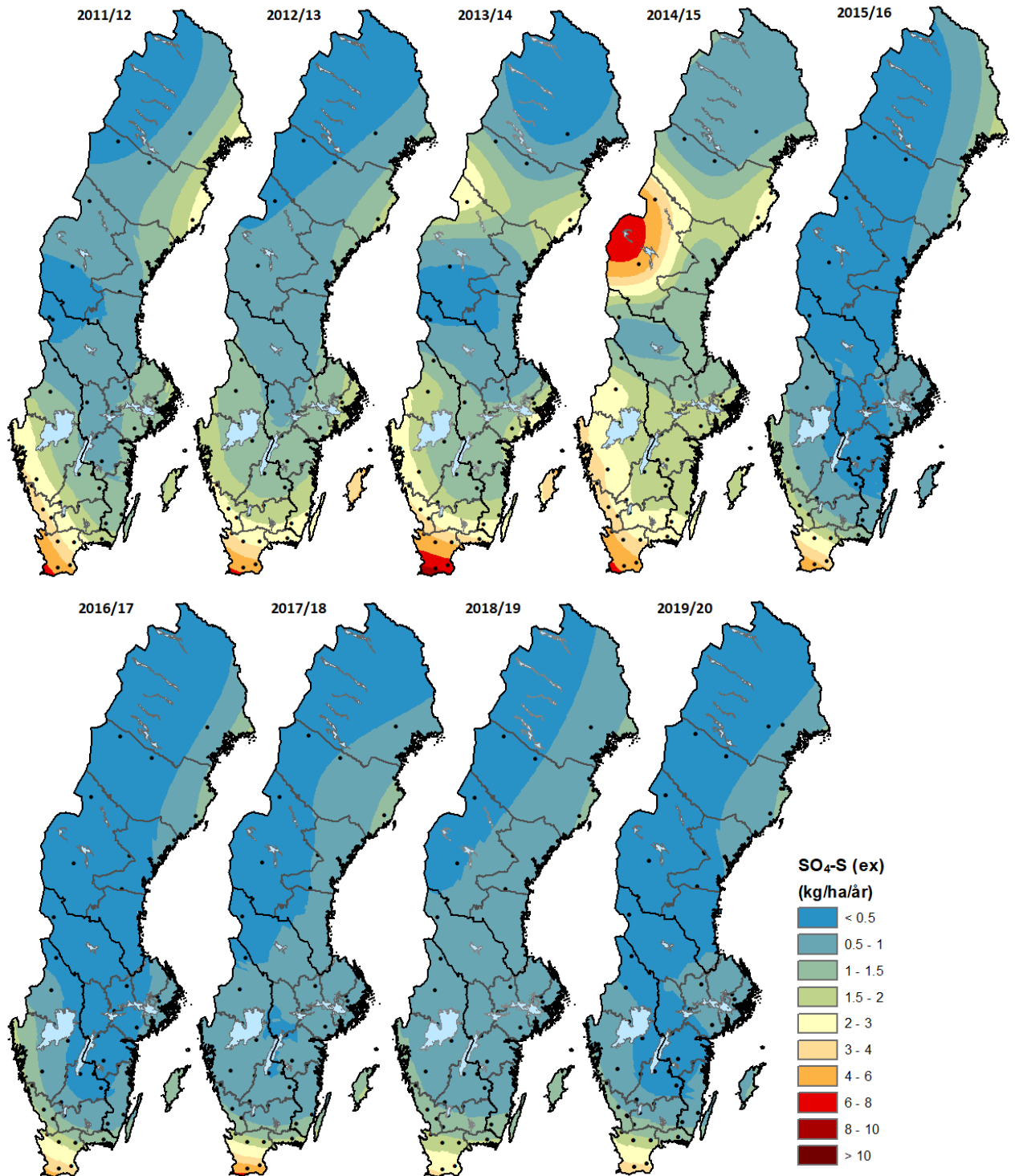
Nedfall av svavel till skog kan uppskattas relativt väl från mätningar av krondropp. Som diskuterats ovan har utsläppen av svavel minskat kraftigt både i Sverige och övriga Europa.

Nedfallet av svavel till granskog i Sverige uppmätt som krondropp visas i Figur 20A och 20B för samtliga år sedan 2001/02. Det framgår att svavelnedfallet minskat kraftigt, men att den högsta belastningen av svavelnedfallet fortsatt har varit i sydvästra Sverige. Skillnaderna över Sverige har dock minskat med åren. På kartan ser man tydligt det förhöjda svavelnedfallet som berodde på vulkanutbrottet på Island under 2014/15, framför allt i Jämtland (Hellsten m.fl., 2017). Det höga svavelnedfallet i sydligaste Sverige 2012/13 berodde sannolikt på en hög intransport av förorenad luft från Polen.

En visuell jämförelse av kartorna för åren 2011/12–2012/13 med motsvarande kartor för åren 2015/16 och därefter tyder också på att minskningen av svavelhalterna i fartygsbränsle resulterat i ett minskat svavelnedfall till skogen i stora delar av södra Sverige.



Figur 20A. Geografiskt interpolerade kartor över total nedfall (torr- och våtdeposition) av sulfatsvavel (exklusive bidraget från havssalt) SO<sub>4</sub>-S<sub>ex</sub> via krondropps­mätningar för hydrologiska år under perioden 2001/02 – 2010/11. Metoden baserar sig på resultat från mätningar av nedfall som krondropp vid grandominerade mätplatser och den geografiska interpoleringen har gjorts med Kriging-metodik (Empirical Bayesian kriging (EBK)). Svarta prickar anger de mätplatser som ingår för respektive år.

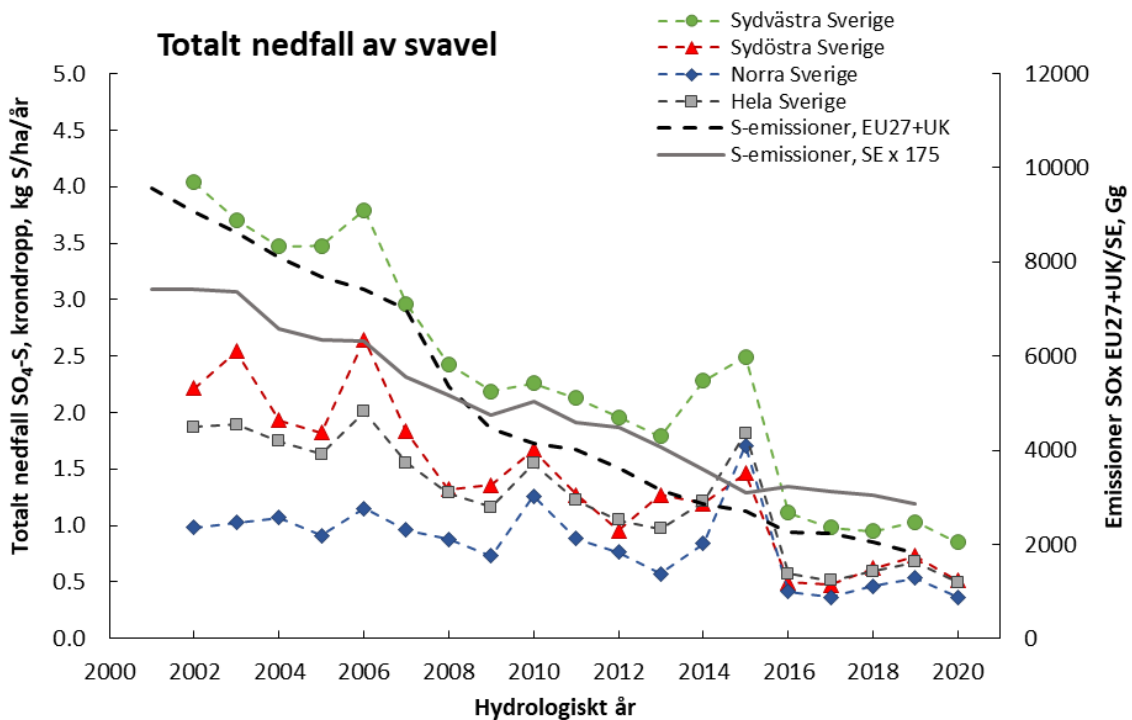


Figur 20B. Geografiskt interpolerade kartor över total nedfall (torr- och våtdeposition) av sulfatsvavel (exklusive bidraget från havssalt) SO<sub>4</sub>-Sex via krondroppsmätningar för hydrologiska år under perioden 2011/12 – 2019/20. Metoden baserar sig på resultat från mätningar av nedfall som krondropp vid grandominerade mätplatser och den geografiska interpoleringen har gjorts med Kriging-metodik (Empirical Bayesian kriging (EBK)). Svarta prickar anger de mätplatser som ingår för respektive år.



I Figur 21 visas tidsserier för nedfall av  $\text{SO}_4\text{-S}$ , utan bidrag från havssalt, som medelvärden för de tre olika regionerna över Sverige för 19-årsperioden 2001/02–2019/20, baserat på värden i geografiskt interpolerade kartor som de i Figur 20A-B. Dessutom visas tidsförloppet för minskade utsläpp av oxiderat svavel (som  $\text{SO}_2$ ), för EU27+UK och för Sverige. Dessa emissionskurvor är anpassade för att kunna jämföra tidsförloppen vad gäller minskningen av nedfallet respektive emissionerna.

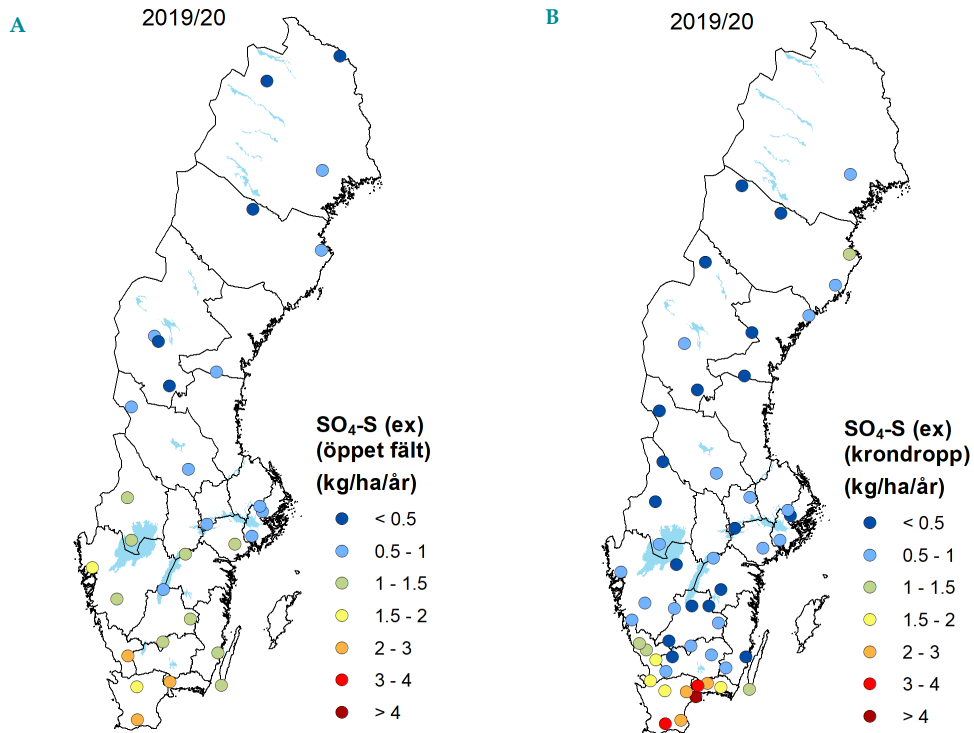
Svavelnedfallet till skog i Sverige minskar på ett statistiskt säkerställt sätt sedan 2001/02 med 74 procent för Sverige som helhet, med 82 procent för sydvästra Sverige, med 80 procent för sydöstra Sverige och med 58 procent för norra Sverige. Svavelnedfallet minskar i stort sett i takt med minskade rapporterade utsläpp av oxiderat svavel. Minskningen i  $\text{SO}_x$ -utsläpp mellan 2001 och 2019, var 88 procent för EU27+UK och 67 procent i Sverige (CEIP, 2021). Ett förhöjt svavelnedfall syns tydligt för åren 2014–2015 framför allt i sydvästra regionen, orsakat av svavelutsläppen från vulkanutbrottet på Island (Hellsten m.fl., 2017). Under början av 2000-talet låg svavelnedfallet i region sydöst klart högre jämfört med region norr, men under de senaste åren har svavelnedfallet i dessa regioner legat på samma nivå.



Figur 21. Tidsserier för årligt totalt nedfall av sulfatsvavel,  $\text{SO}_4\text{-S}$ , exklusive bidrag från havssalt, mätt som krondropp, till Sverige som helhet samt tre geografiska områden, Figur 3, under perioden 2001/02–2019/20. Beräknade värden gäller hydrologiska år. Medelvärden baseras på de geografiskt interpolerade värdena i Figur 20. Som jämförelse visas även rapporterade årliga utsläpp av oxiderat svavel ( $\text{SO}_x$ ) från EU27+UK (svart streckad linje, högra y-axeln) och från Sverige (grå linje, högra y-axeln). För att underlätta jämförelser är Sveriges utsläpp multiplicerat med en faktor 175. Källa för utsläpp: CEIP (2021).

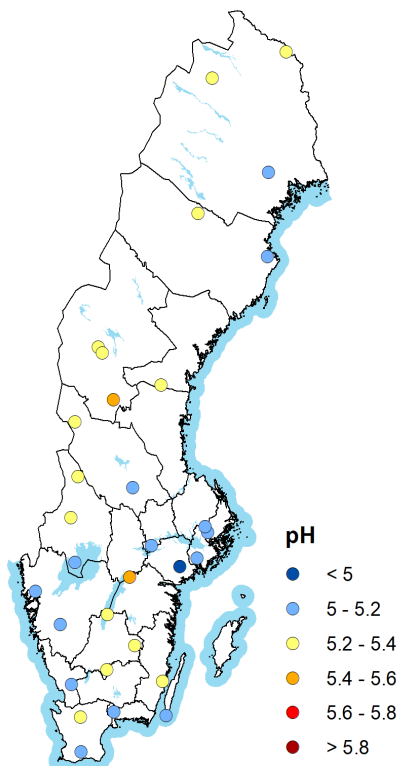
I Figur 22A-B visas svavelnedfallet med nederbörden och som krondropp för det hydrologiska året 2019/20. Som visats i Figur 20 och 21 var svavelnedfallet under det senaste hydrologiska året mycket lågt. Då svavel även är ett mikronäringsämne har detta medfört att vid vissa mätplatser har svavelnedfallet med nederbörden under 2019/20 varit något högre än svavelnedfallet som uppmätts via krondropp, Figur 22. För att denna effekt ska bli möjlig behöver torrdepositionen vara lägre än det eventuella direktupptaget av svavel som kan ske i trädskronorna. Samtidigt behöver tillväxten och därmed behovet av svavel som näringsämne vara relativt stort. Under den nya programperioden kommer vi att försöka utvärdera storleken på ett eventuellt direktupptag av svavel till trädskronorna i olika delar av Sverige.

För andra platser var svavelnedfallet mätt som krondropp fortfarande betydligt högre än svavelnedfallet med nederbörden. Till exempel var svavelnedfallet mätt som krondropp vid Stenshult i Skåne 3,7 kilo per hektar 2019/20 vilket var 1,7 kilo högre än svavelnedfallet som uppmättes med nederbörden på öppet fält.



Figur 22. Svavelnedfall med nederbörden (A) och som krondropp (B) under det hydrologiska året 2019/20 vid samtliga mätplatser inom Krondroppsnetet.

pH i nederbörden mätt på öppet fält visas i Figur 23 för olika platser i Sverige för det hydrologiska året 2019/20. pH varierade mellan 5,0 och 5,6, vilket är nära det pH som man beräknar att regnvatten skulle ha utan antropogen påverkan, (5,3–5,5). pH i krondropp är mer svårtolkat eftersom det påverkas starkt av de ämnen som interncirkuleras i trädkronorna och visas därför inte.



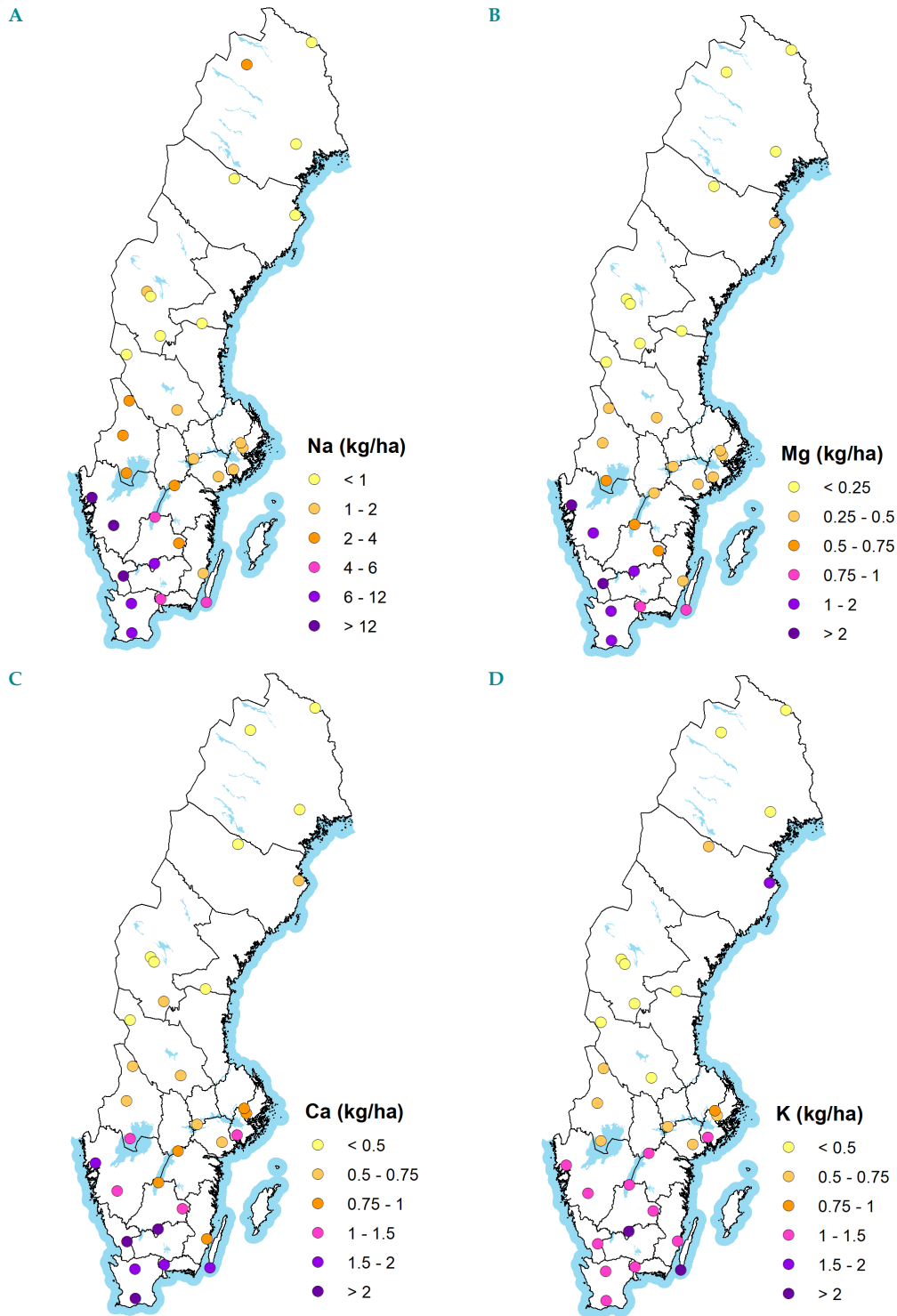
Figur 23. pH i nederbörden 2019/20.

Nedfallet av baskatjonerna kalcium, kalium, magnesium och natrium, utgör en betydelsefull faktor när det gäller att bedöma om baskatjonerna räcker till för att kompensera den bortförsl som sker i samband med uttag av biomassa från de svenska skogsekosystemen (Westling & Lövblad, 2004, Akselsson m.fl., 2007). Atmosfäriskt nedfall av baskatjoner har också en betydande roll för skogsekosystemens återhämtning från försurning eftersom det bidrar med buffrande kapacitet.

Utsläpp av baskatjoner kan ha både antropogent och naturligt ursprung (Westling & Lövblad, 2004). Natrium och magnesium kommer huvudsakligen från havssalt medan merparten av kalium och kalcium kommer från antropogena aktiviteter (Törseth m.fl., 1999). Även "naturliga" emissioner påverkas av mänsklig aktivitet i samband med förändrad markanvändning etc. Partiklar innehållande baskatjoner släpps ut i samband med förbränning av kol och ved samt i samband med olika industriella processer. För Storbritannien har man beräknat att förbränning från fasta industriella anläggningar bidrar stort till emissionerna av kalcium. Vad gäller magnesium beräknar man de största emissionerna kommer från brytning av dolomit. När det gäller kalium beräknar man att de största emissionerna kommer från stålindustrin, följt av kolförbränning och fyrverkerier.

Liksom för kväve är det svårt att mäta torrdepositionen av baskatjoner, eftersom det för dessa ämnen sker interaktioner med trädskronorna. Vi visar därför resultat för baskatjoner endast för nedfall med nederbörden på öppet fält, Figur 24A-D. Det finns dock även här ett bidrag av torrdeposition till själva mätutrustningen (Karlsson m.fl., 2021a).

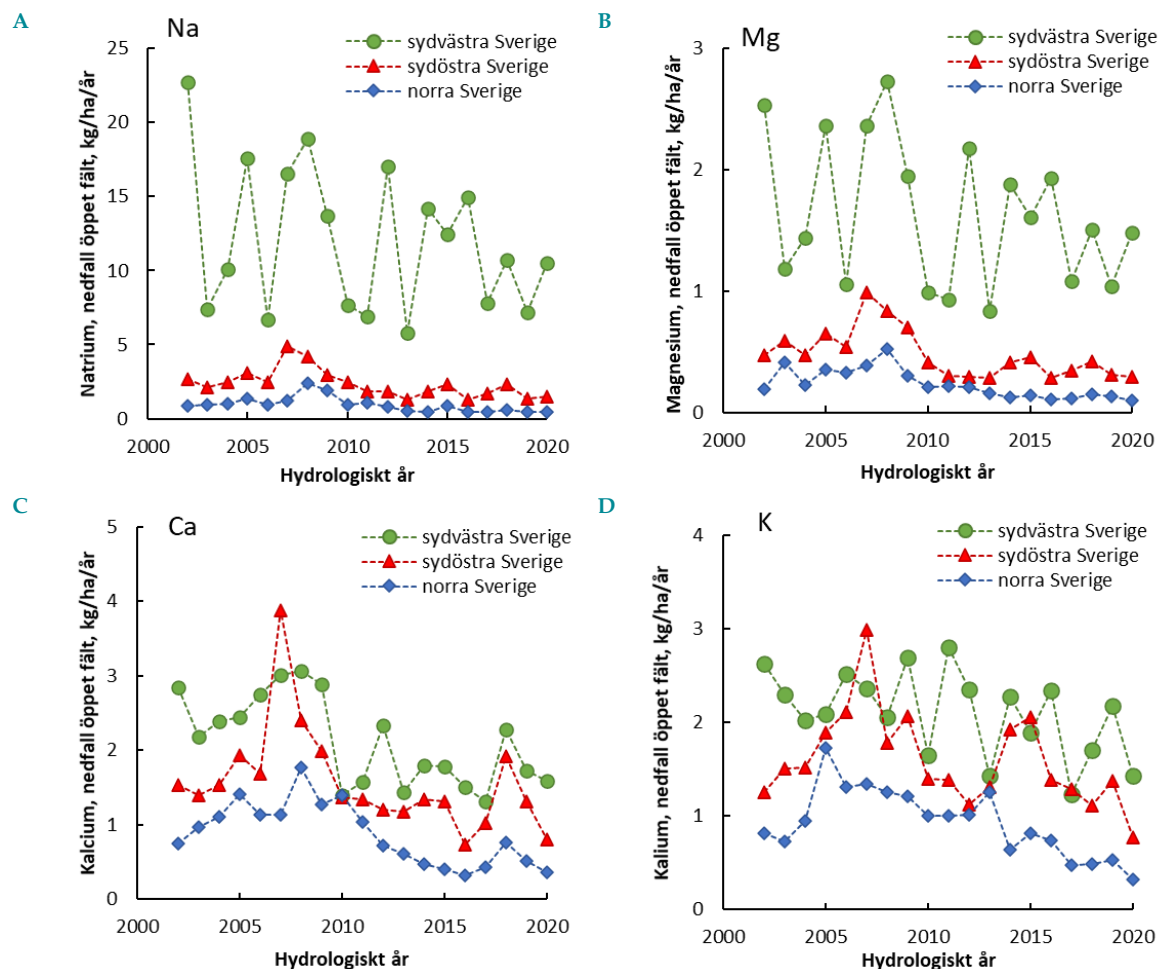
Nedfallet av alla baskatjonerna är högst i sydväst och avtar norrut, med undantag av kalium där mönstret är mer diffust, Figur 24. I synnerhet för natrium och magnesium är gradienten från sydväst stark, beroende på att båda dessa ämnen till stor del härrör från havssalt.



Figur 24. Nedfall med nederbörden på öppet fält för olika platser inom Krondroppsnetet för det hydrologiska året 2019/20. A, natrium; B, magnesium; C, kalcium; D, kalium.

I Figur 25 visas tidsserier för årligt nedfall med nederbörden på öppet fält för de olika basketjonerna. Dessa medelvärden har beräknats utifrån uppmätta mätvärden för de mätplatser som ingår i respektive region och som har årliga mätresultat som täcker en stor del av perioden 2001/02 – 2019/20. Mellanårsvariationen i nedfallet till öppet fält är stor för alla ämnen, i synnerhet i sydvästra Sverige. Nedfallet med nederbörden på öppet fält har minskat på ett statistiskt säkerställt sätt för alla olika basketjoner, (natrium, magnesium, kalcium och kalium) och för alla geografiska regioner, förutom för sydvästra Sverige där endast

kalciumnedfallet med nederbörden minskar. Tolkningen av dessa resultat kompliceras dock av att det finns en betydande andel torrdeposition av baskatjoner till själva insamlingsutrustningen för nederbörd på öppet fält (Karlsson m.fl., 2021a, se även kapitel 6.2 nedan).



Figur 25. Årligt nedfall med nederbörden på öppet fält för olika platser inom Krondroppsnetet för hydrologiska år under perioden 2001/02 – 2019/20, uppdelat i tre områden. A, natrium; B, magnesium; C, kalcium; D, kalium. För sydvästra regionen ingick 6 platser (Blåbärskullen, Fagerhult, Hensbacka, Tagel, Timrilt, Västra Torup/Hissmossa), för sydöstra regionen 7 platser (Arlanda, Bergby, Edeby, Farstanäs, Fulufjället, Kvisterhult, Rockneby) och för norra regionen 3 platser (Högbränna, Myrberg/Grankölen, Storulvsjön).

### 4.3 Markvattnets försurningsstatus

Ett högt försurande nedfall under lång tid har försurad mark och vatten. Den kraftiga minskningen av svavelnedfallet har dock minskat belastningen på mark och vatten, men det tar tid för systemen att återhämta sig. Försurningen har inneburit att koncentrationerna av buffrande ämnen, främst baskatjonerna kalcium, magnesium, kalium och natrium, har läckt ut från marken, och minskat basmättnad och pH, samtidigt som oorganiskt aluminium i marken har ökat. Vittring av mineraler samt deposition av baskatjoner fyller på baskatjonförråden igen, men det är en mycket långsam process.

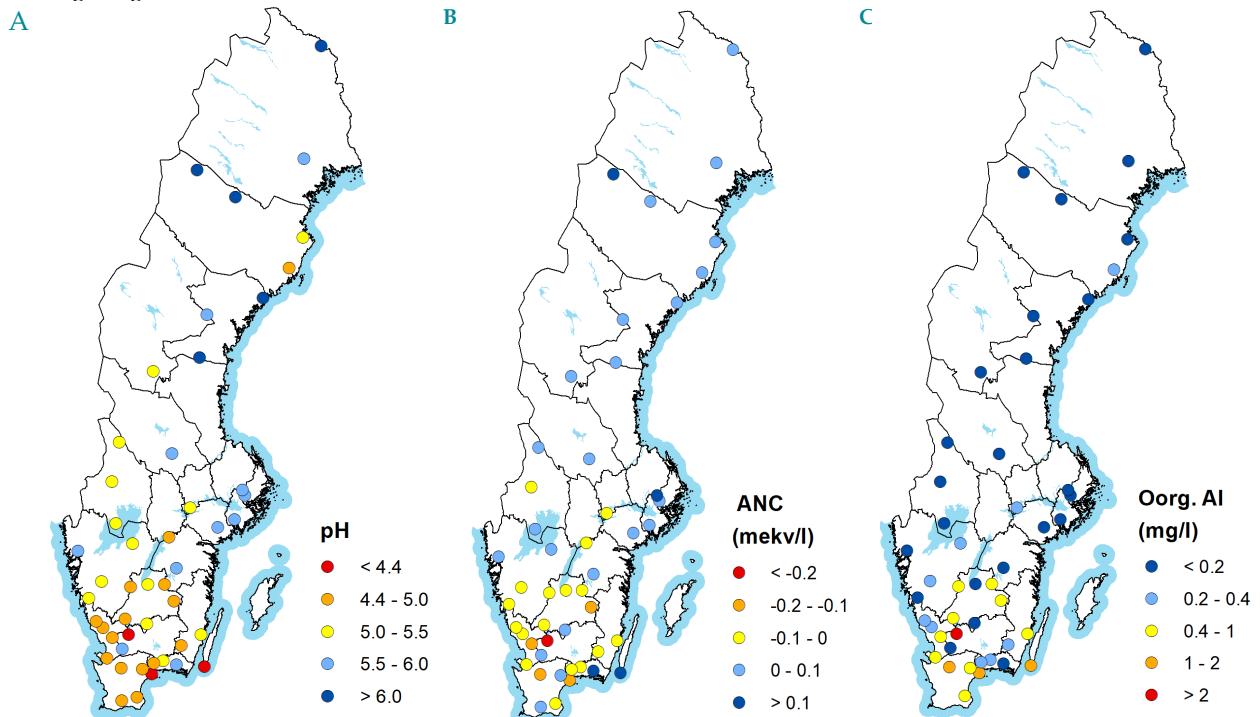
Samtidigt som det försurande nedfallet minskat har skogsbrukets bidrag till försurningen ökat, genom att skörd av grenar och toppar (grot) blivit vanligare. Bortförsel av biomassa, speciellt näringsrika grenar och toppar (grot), innebär att ytterligare buffringskapacitet förs bort, vilket motverkar återhämtningen.

I markvattnet återfinns samma försurningsgradient som för svavelnedfall, Figur 26 A-C. Medianvärdena från mätningar 2018–2020 visar på låga värden för pH i södra Sverige, oftast under 5 och i ett par fall under 4,4, Figur 26A. Enligt bedömningsgrunderna för försurad mark är marken sur om pH underskrider 4,4, medan

pH-värden mellan 4,4 och 5,5 innebär måttlig surhet. I Mellansverige var pH mellan 5 och 6 under samma period, och i norra Sverige var pH i flera fall över 6, men lägre på ett par platser längs norrlandskusten, där den lägsta noteringen var i Bäcksjö i Västerbottens län, 4,8.

En annan ofta använd försurningsindikator, den syraneutraliserande förmågan (ANC), visade upp en liknande bild, Figur 26B. Positivt ANC betyder att markvattnet har en buffrande förmåga, medan markvattnet med negativt ANC saknar detta. Flertalet mätplatser i södra Sverige uppvisade negativt ANC, medan mätplatserna i norra Sverige visade på positivt ANC.

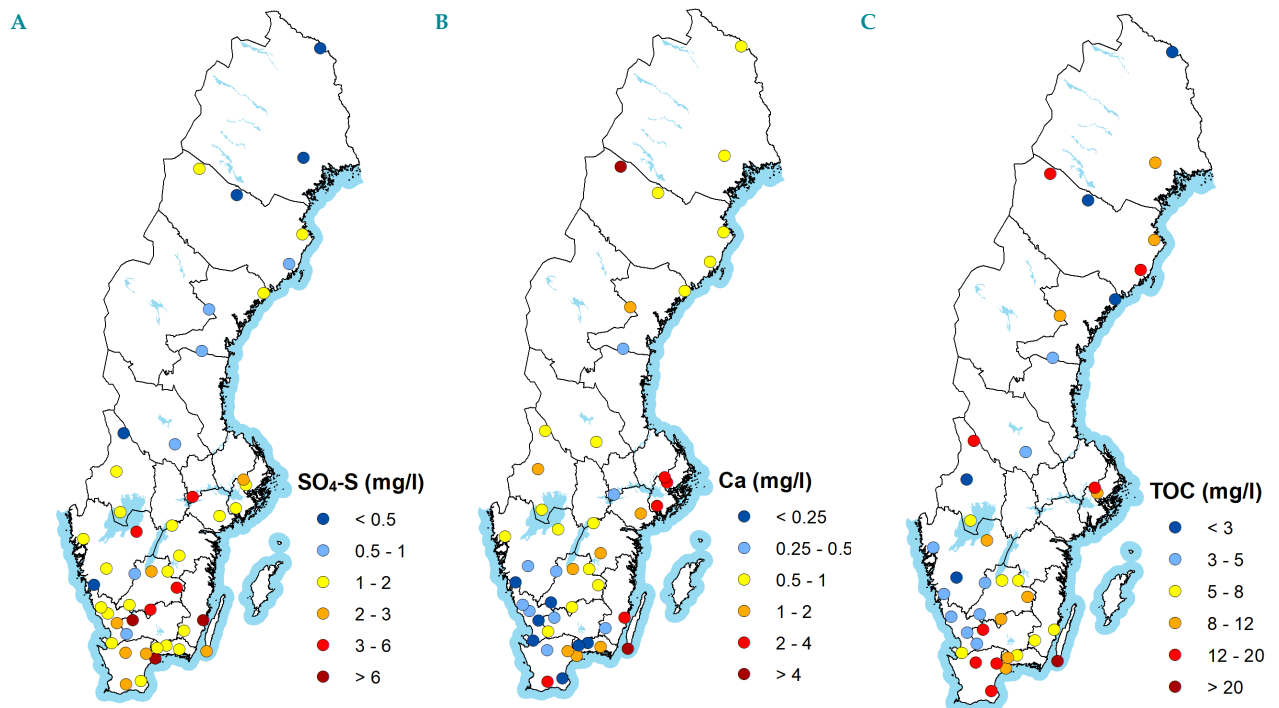
I försurade marker frigörs oorganiskt aluminium som är giftigt för växter och djur, vilket förklarar att mätningarna visar på förhöjda halter oorganiskt aluminium i markvattnet i södra Sverige. Medianhalterna överskred 1 mg/l på fyra mätplatser, vilket kan jämföras med halter under 0,2 mg/l på flertalet övriga platser i Sverige, Figur 26C.



Figur 26. pH (A), ANC (den syraneutraliserande förmågan) (B) och halten oorganiskt aluminium (C) i markvattnet på 50 cm djup vid olika platser inom Krondroppsnetet. Det värde som anges är medianvärdet under de senaste tre åren (2018–2020). Ytor med mindre än tre mätvärden under treårsperioden, samt ytor som har avverkats eller gödslats har tagits bort.

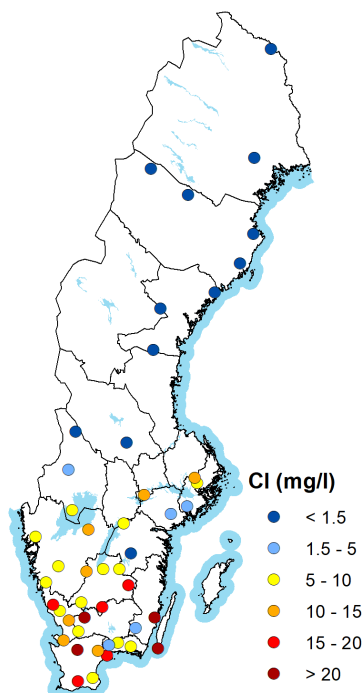
Nedfallsgradienten för svavel kan förklara mycket av variationen i markvattnets försurningsstatus. Minskningen i svavelnedfall har gjort att svavelhalter i markvattnet minskat och gradienten för svavelhalter i markvattnet, Figur 27A, är inte lika stark som tidigare. Det kan dessutom finnas andra orsaker till en hög svavelhalt i markvattnet, förutom svavelnedfallet. Det sura nedfallet har gjort att marken utarmats på baskatjoner, vilket syns till exempel på kalciumhalten i markvattnet, Figur 27B, samt på ovan nämnda försurningsindikatorer. På mark med hög buffringskapacitet, till exempel på grund av betydande kalkinnehåll, kan pH och ANC vara förhållandevis höga trots betydande försurande nedfall. Detta syns till exempel vid de tre mätplatserna i Stockholms län.

I skogsbestånd där det finns ett överskott av kväve sker nitrifiering som bidrar till försurningen. Under perioden 2018–2020 var det bara två mätplatser i Skåne, Stenshult och Hissmossa, där så var fallet, Figur 16A ovan, och i enlighet med detta var Hissmossa den lokal som hade lägst ANC i landet under denna period. I Stenshult var ANC positiv, trots förhöjda nitratkvävehalter, på grund av höga halter baskatjoner (Figur 26B). Markvattnets pH beror inte bara på surt nedfall, utan även på hur mycket organiskt kol som finns i marklösningen (totalt oorganiskt kol, TOC), Figur 27C. Detta syns till exempel i Ottenby på Ölands södra udde, där pH var mycket lågt (< 4,4) trots att ANC var positivt, vilket kan förklaras med hög TOC-halt.



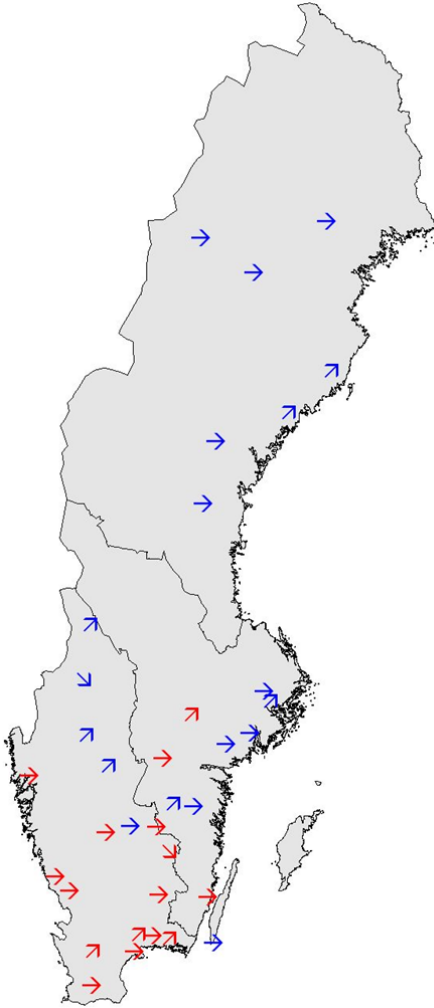
Figur 27. Halten sulfatsvavel (A), kalcium (B) och halten organiskt kol (TOC) i markvattnet på 50 cm djup vid olika platser inom Krondroppsnetet. Det värde som anges är medianvärdet under de senaste tre åren (2018–2020). Ytor med mindre än tre mätvärden under treårsperioden, samt ytor som har avverkats eller gödslats har tagits bort.

Olika typer av episoder kan påverka skogen på olika sätt. Stormar kan påverka dels genom att de kan föra med sig havssalt, som kan innebära att natriumjoner byter plats med vätejoner på markpartiklarna, vilket innebär att markvattnets pH minskar. Nedan används halterna av klorid som en markör för påverkan från havssalt. En annan effekt av stormar är att skogen kan stormfällas, vilket medför att trädens upptag av näringsämnen avbryts, och kväve kan frigöras, vilket också kan leda till försurning av markvattnet. Perioden 2018–2020 utmärkte sig dock inte när det gällde denna typ av effekter, Figur 28.



Figur 28. Halten av klorid på 50 cm djup vid olika platser inom Krondroppsnetet. Det värde som anges är medianvärdet under de senaste tre åren (2018–2020). Ytor med mindre än tre mätvärden under treårsperioden, samt ytor som har avverkats eller gödslats har tagits bort.

Till den senaste fördjupade utvärderingen av miljö kvalitetsmålet *Bara naturlig försurning* (Naturvårdsverket, 2019) gjordes en analys av trender för ANC i markvattnet på de av Krondroppsnetets mätplatser som var aktiva under de 22 åren mellan 1996 och 2017, Figur 29. Precis som kartorna ovan visade trendkartan att markvattnet var kraftigt försurat (ANC <0) på flertalet platser i sydvästra Sverige, och att återhämtning, i form av ökat ANC, enbart skett på en tredjedel av platserna. På två platser hade till och med en minskning av ANC skett. I norra delen, liksom delar av den sydöstra/mellersta delen, var markvattnet relativt välbuffrat, vilket återspeglas i högt ANC. Detta utgångsläge har gjort att ANC inte ökat i samma utsträckning i norra Sverige som i södra Sverige.



Figur 29. Nivåer och trender för ANC (syraneutraliserande förmåga) i markvattnet under rotzonen, baserat på data från Krondroppsnetet för perioden 1996–2017. Färgen på pilarna visar nivån på ANC, beräknat som medianen för perioden 1996–2017. Röda pilar indikerar att ANC <0 (marken saknar buffrande förmåga) medan blåa pilar visar ANC >0 (marken har en buffrande förmåga). Pilar upp eller ner visar på en signifikant ökning respektive minskning under perioden. Horisontella pilar innebär att ingen signifikant förändring kunnat påvisas. De tre landsdelarna motsvarar indelningen i försurningsregioner som används vid uppföljning av miljömålet *Bara naturlig försurning*.





## 5 Marknära ozon

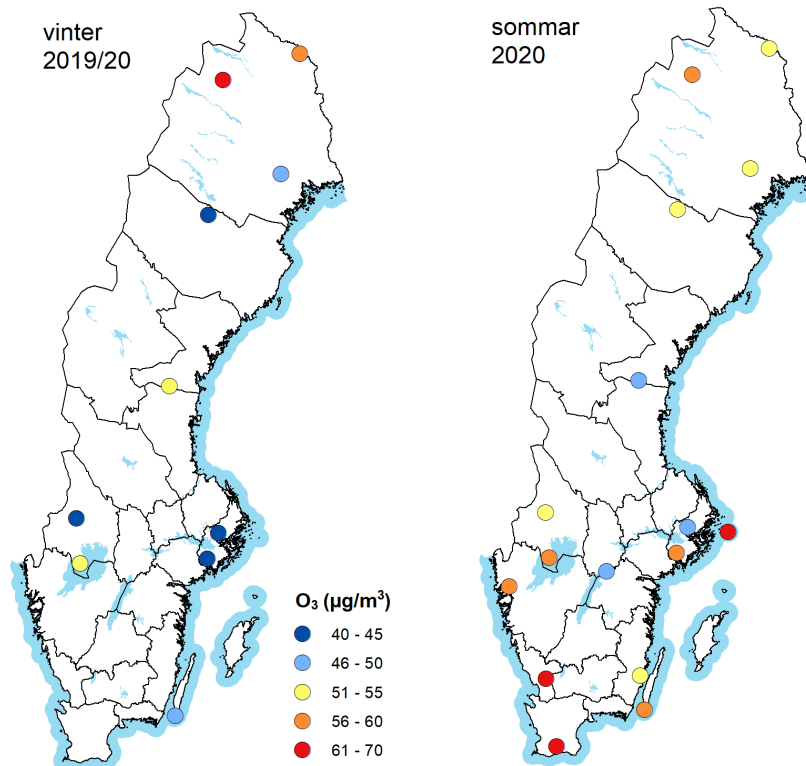
Mätningar av lufthalter av ozon vid Södra Averstad, Värmlands län. Fotograf: Per Erik Karlsson

**Ozon (O<sub>3</sub>) bildas i luften nära marken i närvaro av ozonbildande ämnen, främst kväveoxider och flyktiga organiska ämnen (VOC), genom kemiska reaktioner som drivs av energin från solljuset. O<sub>3</sub> inandas av människor samt tas upp i växters blad och barr. Hos människor ger O<sub>3</sub> irritation av ögon och slemhinnor, huvudvärk samt andningssvårigheter, speciellt hos personer med astma. Upptag av O<sub>3</sub> till bladen leder bland annat till minskad fotosyntes och för tidigt åldrande med åtföljande bladavfall. Dagens ozon-exponering orsakar stora produktionsförluster för det svenska jord- och skogsbruket.**

Förekomsten av ozon i bakgrundsmiljön utanför tätort beror av lokala, regionala, nationella och globala utsläpp av ozonbildande ämnen. Förorenade luftmassor med ozonbildande ämnen som förekommer över Sverige kan ha transporterats mycket långt, från olika delar av Europa, samt till viss del från andra kontinenter. När luftmassorna kommer in över land deponeras ozon mot mark och växtlighet, vilket gör att ozonhalterna i huvudsak avtar norrut i Sverige.

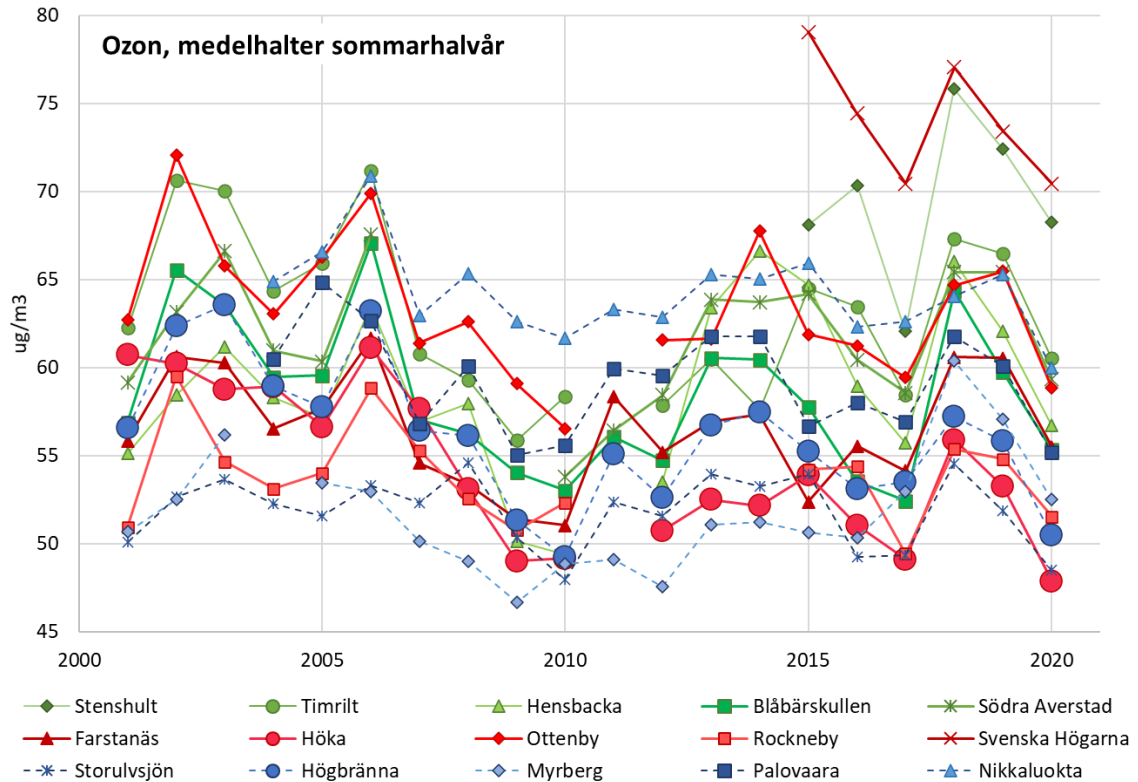
Ozonhalterna över Sverige förändras över tid beroende på förändringar i utsläppen av ozonbildande ämnen i olika delar av världen men även beroende på förändringar i klimatet. På senare tid har de högsta ozonhalterna minskat medan de lägsta ozonhalterna har ökat (Karlsson m.fl., 2017). Avseende människornas och ekosystemens exponering för ozon tenderar det att bli mer vanligt förekommande med "medelhöga" halter av ozon. I Sverige bedöms dagens ozonexponering orsaka produktionsförluster motsvarande ett årligt ekonomiskt värde på 1 470 MSEK, fördelat på 940 MSEK för skogsbruk och 530 MSEK för jordbruk (Karlsson, m.fl., 2019b).

Ozonhalterna i luft övervakas inom Krondroppsnetet med så kallade diffusiva provtagare, vilka ger ett medelvärde för ozonhalten dygnet runt under den tid de exponeras, vanligtvis månadsvis. I Figur 30 visas lufthalter av O<sub>3</sub> som medelvärdet för sommar- respektive vinterhalvår 2019/20 vid mätstationerna inom Krondroppsnetet i Sverige. Halterna är högst på sommaren, framför allt vid kustnära platser främst beroende på att ozonhalterna är relativt höga även nattetid. På vårvintern förekommer även höga ozonhalter i norra Sverige (Klingberg m.fl., 2019). Riskerna för ozonpåverkan på alpin och subalpin växtlighet i norra Fennoskandia har nyligen utvärderats av forskare från Sverige, Norge och Finland. Att det under sommaren är ljusst dygnet runt skulle kunna medverka till att öka upptaget av ozon genom klyvöppningarna till växternas blad. De övergripande slutsatserna blev dock att denna nordliga växtlighet troligen inte är mer känslig för ozonexponering jämfört med växtligheten vid mer sydliga breddgrader (Karlsson m.fl., 2021c).



Figur 30. Lufthalter av marknära ozon ( $\text{O}_3$ ) som medelvärden för vinter- (karta till vänster) respektive sommarhalvår (karta till höger) 2019/20 vid mätstationerna inom Krondroppsnetet i Sverige. Vinterhalvåret omfattar oktober till mars och sommarhalvåret omfattar april till september.

Trender i ozonhalter bör analyseras över långa tidsperioder, eftersom mellanårsvariationen är stor med avseende på hur meteorologiska förhållanden påverkar ozonbildningen. I Figur 31 visas ozonmedelhalter för sommarhalvår för 13 mätplatser inom Krondroppsnetet där det finns tidsserier som relativt väl täcker de senaste tjugo åren, 2001–2020. Dessutom visas ozonhalter för två platser där uppmätta halter är betydligt högre än andra platser, Stenshult på Romeleåsen i södra Skåne och Svenska Högarna i Stockholms yttre skärgård. Av de 13 platserna är det endast vid två platser där halterna minskat på ett statistiskt säkerställt sätt, vid Högbränna i inlandet i Västerbottens län och vid Höka i inlandet i Östergötlands län. Vid övriga platser har medelvärdena för ozonhalter sommartid inte förändrats över dessa tjugo år. Att ozonmedelhalterna inte förändrats under dessa tjugo år kan bero på kombinationen som nämnts ovan, att de högsta halterna minskat medan de lägsta halterna ökat.



Figur 31. Medelhalter för ozon under sommarhalvår för mätplatser inom Krondropps nätet där det finns tidsserier som relativt väl täcker de senaste tjugo åren, 2001–2020. Därutöver visas kortare mätserier av ozonhalter för två platser där uppmätta halter är betydligt högre än andra platser, Stenshult på Romeleåsen i södra Skåne och Svenska Högarna i Stockholms yttre skärgård. Vid två platser har halterna minskat på ett statistiskt säkerställt sätt, vid Högbränna i inlandet i Västerbottens län och vid Höka i inlandet i Östergötlands län (dessa har markerats med extra stora runda symboler). Vid övriga platser har medelvärdena för ozonhalter sommartid inte förändrats. Platser i sydvästra Sverige är markerade med gröna symboler, platser i norra Sverige med blåa symboler och platser i sydöstra Sverige med röda symboler.

## 6 Händelser/specialprojekt under programperioden 2015–2020



Mätningar av krondropp med sommarutrustning, Storulvsjön Västernorrland. Fotograf: Anna Sundeberg

## 6.1 Lista över vilka artiklar som har skrivits och publicerats inom rådande programperiod

### 2015

Hellsten, S., Stadmark, J., Pihl Karlsson, G., Karlsson, P.E. & Akselsson, C. (2015): Increased concentrations of nitrate in forest soil water after windthrow in southern Sweden, *Forest Ecology and management* 356, 234-242. (doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.009)

Waldner, P., Thimonier, A., Graf Pannatier, E., Eitzvold, S., Schmitt, M., Marchetto, A., Rautio, P., Derome, K., Nieminen, T., Nevalainen, S., Lindroos, A.-J., Merilä, P., Kindermann, G., Neumann, M., Cools, N., De Vos, B., Roskams, P., Verstraeten, A., Hansen, K., Pihl Karlsson, G., Dietrich, H.-P., Raspe, S., Granke, O., Fischer, R., Iost, S., Lorenz, M., Sanders, T.G.M., Michel, A., Nagel, H.-D., Scheuschner, T., Simonic, P., Von Wilpert, K., Meesenburg, H., Fleck, S., Ingerslev, M., Gundersen, P., Stupak, I., Vesterdal, L., Jonard, M., Clarke, N., Benham, S., Vanguelova, E., Potocic, N. & Minaya, M. (2015). Exceedance of critical loads and of critical limits impacts tree nutrition across Europe. *Annals of Forest Science*, Volume 72, Issue 7, pp 929-939.

### 2016

Pleijel, H., Grundström, M., Pihl Karlsson, G., Karlsson, P.E. & Chen, D. (2016). A method to assess the inter-annual weather-dependent variability in air pollution concentration and deposition in south-west Sweden based on weather typing. *Atmospheric Environment* 126 (2016). (doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.053.)

Yu, L., Belyazid, S., Akselsson, C., van der Heijden, G. & Zanchi, G., 2016. Storm disturbances in a Swedish forest - A case study comparing monitoring and modelling. *Ecological Modelling* 320, 102-113. (doi: 10.1016/j.ecolmodel.2015.09.025)

### 2018

Akselsson, C. & Belyazid, S., 2018. Critical biomass harvesting – Applying a new concept for Swedish forest soils. *Forest Ecology and Management* 409, 67-73. (doi: 10.1016/j.foreco.2017.11.020)

Johnson, J., Graf Pannatier, E., Carnicelli, S., Cecchini, G., Clarke, N., Cools, N., Hansen, K., Meesenburg, H., Nieminen, T.M., Pihl Karlsson, G., Titeux, H., Vanguelova, E., Verstraeten, A., Vesterdal, L., Waldner, P. & Jonard, M. 2018. The response of soil solution chemistry in European forests to decreasing acid deposition. *Global Change Biology*. 2018;1–17. DOI: 10.1111/gcb.14156

Karlsson, P.E., Akselsson, C., Hellsten, S. & Pihl Karlsson, G. 2018. A bark beetle attack caused elevated nitrate concentrations and acidification of soil water in a Norway spruce stand. *Forest Ecology and Management* 422, 338-344. doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.021

Yu, L., Zanchi, G., Akselsson, C., Wallander, H. & Belyazid, H., 2018. Modeling the forest phosphorous nutrition in a southwestern Swedish forest site. *Ecological Modelling* 369, 88-100. (doi: 10.1016/j.ecolmodel.2017.12.018)

### 2019

Akselsson, C., Belyazid, S., Stendahl, J., Finlay, R., Olsson, B.A., Erlandsson Lampa, M., Wallander, H., Gustafsson, J.P. & Bishop, K., 2019. Quantifying weathering rates for sustainable forestry. *Biogeosciences*, 16, 4429–4450. (doi: 10.5194/bg-16-4429-2019)

Ferm M., Granat L., Engardt M., Pihl Karlsson G., Danielsson H., Karlsson P.E. & Hansen K. 2019. Wet deposition of ammonium, nitrate and non-sea-salt sulphate in Sweden 1955 through 2017. *Atmospheric Environment: X* 2 (2019) 100015. doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100015

Karlsson, P.E., Pihl Karlsson, G., Hellsten, S., Akselsson, C., Ferm, M., & Hultberg, H. 2019. Total deposition of inorganic nitrogen to Norway spruce forests – Applying a surrogate surface method across a deposition gradient in Sweden. *Atmospheric Environment* 217. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116964

Kronnäs, V., Akselsson, C. & Belyazid, S., 2019. Dynamic modelling of weathering rates – the benefit over steady-state modelling. SOIL 5: 33-47. (doi:10.5194/soil-5-33-2019)

## 2021

Akselsson, C., Kronnäs, V., Stadlinger, N., Zanchi, G., Belyazid, S., Karlsson, P.E., Hellsten, S., Pihl Karlsson, G. 2021. A Combined Measurement and Modelling Approach to Assess the Sustainability of Whole-Tree Harvesting – A Swedish Case Study. Sustainability 13, 2395. (doi: 10.3390/su13042395)

Lucander, K., Zanchi, G., Akselsson, C. & Belyazid, S., 2021. The Effect of Nitrogen Fertilization on Tree Growth, Soil Organic Carbon and Nitrogen Leaching—A Modeling Study in a Steep Nitrogen Deposition Gradient in Sweden. Forests 12, 298. (doi: 10.3390/f12030298)

## 6.2 Korrigering för torrdeposition till utrustning för insamling av nederbörd

Beräkningar av våtdeposition görs utifrån mätningar med provutrustning för insamling av nederbörd på öppet fält. Det sker dock en viss torrdeposition av gaser och partiklar till själva insamlingsutrustningen, vilket gör att det man mäter kallas bulkdeposition. Med finansiering från Naturvårdsverket har jämförande mätningar genomförts inom Krondropps nät under två år, inom projektet Rör-Under-Tak, RUT. Två parallella insamlingsutrustningar för bulkdeposition har använts, under och utanför ett tak, Figur 32 (Karlsson m.fl., 2021a). Avsikten har varit att utrustningen under tak endast samlar torrdeposition medan utrustningen utanför taket samlar summan av torr- och våtdeposition.

En metodik har utvecklats som syftar till att kunna korrigera mätresultat för bulkdeposition till beräknade



Figur 32. Insamlingsutrustning för nederbörd (WoF-provtagare), under och utanför ett tak.

värden för våtdeposition för valfri mätplats i Sverige. Korrigeringar görs separat för den nu använda mätutrustningen, WoF-provtagare och för en tidigare använd mätutrustning, Tratt och Dunk.

För natrium, sulfatsvavel, nitrat- och ammoniumkväve görs korrigeringar regionvis för respektive ämne på månadsbasis, baserat på separata korrigeringsfaktorer beroende på om bulkdepositionen under månaden över- eller underskrider ett tröskelvärde.

Korrigeringsfaktorerna för sulfatsvavel, nitrat- och ammoniumkväve för månader med hög bulkdeposition ligger mellan 0,83 och 0,92, det vill säga torrdepositionen utgör i storleksordningen 10–20 procent av den bulkdeposition som uppmätts. För natrium var torrdepositionens andel något högre.

För kalcium, magnesium, kalium och klorid görs korrigeringar regionvis på årsbasis genom att ett korrigeringsvärde används som är konstant över tid för respektive ämne och region. Korrigeringen beror inte av storleken på bulkdepositionen. För kalcium, magnesium och kalium var andelen torrdeposition av den uppmätta bulkdepositionen relativt stor för den provtagare som nu används, WoF provtagaren. För södra och mellersta Sverige är andelen torrdeposition 30–50 procent, i norra Sverige ännu högre.

För fosfor kan bulkdeposition i nuläget utifrån tillgängliga mätresultat inte separeras till våt- och torrdeposition. Detta på grund av att variationen i mätdata varit alltför stor.

## 6.3 Modelleringsstudier baserat på Krondropps nätets mätplatser under programperioden

Tidsserierna för nedfall och markvattenkemi på Krondropps nätets mätplatser gör dem lämpliga för användning inom olika typer av modellering. På många av mätplatserna finns även mätningar av markkemi, tr addediameter och höjd, antingen genom att de ingått i Skogsstyrelsens obsytenät, eller genom att de ingått i en mätkampanj i ett FORMAS-projekt, vilket ökar användbarheten ytterligare. Under programperioden har en rad modelleringsstudier baserat på mätplatser inom Krondropps nätet utförts inom ramen för olika externa projekt.

- Inom vittringsprogrammet QWARTS, finansierat av FORMAS, utfördes en modelleringsstudie i Västra Torup och Hissmossa i Skåne (Kronnäs m.fl., 2019). Syftet var att undersöka vilka fördelar som finns med att använda den dynamiska ForSAFE-modellen för modellering av vittring, jämfört med den enklare PROFILE-modellen. Studien visade att årsmedelvärdena blev ungefär de samma för de båda modellerna, men med ForSAFE kan man också se hur vittringen varierar under året, och vilka effekter klimatförändring, förändrat nedfall och skogsbruk har på vittringen. En slutsats var även att det är viktigt att ha ett bra mått på markfuktigheten för att kunna modellera vittringen på ett bra sätt (Kronnäs m.fl., 2019).
- Vittringsresultaten från Västra Torup och Hissmossa ingick även i en syntesartikel om vittringshastigheten i skogar i Sverige, där en sammanställning av vittringshastigheter gjordes för alla platser där mer än en metod använts för att uppskatta vittringen (Akselsson m.fl., 2019).
- Den skånska krondroppsytan i Klintaskogen har modellerats med ForSAFE-modellen i två studier (Yu m.fl., 2016; 2018). I den första studien analyserades effekten på markvattenkemin efter två stormar som inföll 1999 och 2005. Återhämtningen från försurning påverkades negativt av stormarna. I den andra studien testades en ny version av ForSAFE, där fosforcykeln lagts till. Detta kan förväntas förbättra modelleringsresultaten framför allt i skogsområden med hög kvävebelastning, där fosfor kan begränsa tillväxten.
- En riskklassificering för helträdssuttag har gjorts baserat på 26 krondroppsytor i granskog i Akselsson m.fl. (2021). Konceptet "kritiskt baskatjonuttag" där PROFILE-modellen använts tillsammans med massbalansberäkningar (Akselsson & Belyazid, 2018) kombinerades med ANC i markvattnet för att ta fram tre riskklasser. Resultaten visade på en generell gradient, med högst riskklass i söder, men det fanns även lokala variationer som kunde förklaras av exempelvis variationer i vittring.
- Effekten av kvävegödsling på tillväxt, kväveutlakning och organiskt kol i marken har modellerats med ForSAFE på tre mätplatser inom Krondropps nätet, Högbränna i Västerbottens län, Södra Averstad i Värmland och Västra Torup i Skåne, inom ramen för ett doktorandprojekt vid Lunds universitet (Lucander m.fl., 2021). Enligt modellen var tillväxteffekten störst i norr och mycket liten i söder, medan kväveutlakningen var störst i söder. Effekten på markkol var generellt liten, men framför allt i den nordliga ytan ledde gödsling till mer kol i marken under andra generationen.

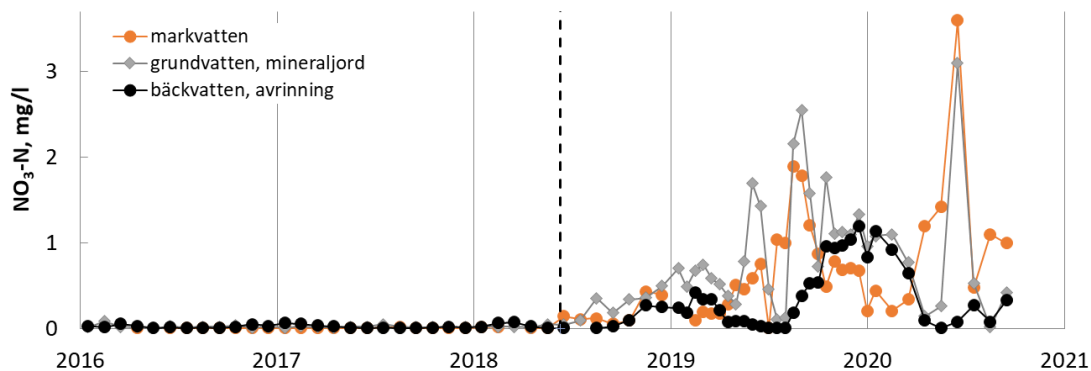
## 6.4 Rapport från Storskogen

IVL Svenska Miljöinstitutet har, i samarbete med Lunds universitet och med finansiering från främst Havs- och vattenmyndigheten samt Länsstyrelsen i Västra Götaland, under sex år, 2014–2020, bedrivit mätningar av markvatten-, grundvatten- och bäckvattenkemi i ett 7,1 ha stort avrinningsområde, "Storskogen" i Västra Götalands län (Hellsten m.fl., 2021; Karlsson m.fl., 2021b). Storskogen är även en mätplats inom Krondropps nätet. En slutavverkning som omfattade 74 procent av avrinningsområdet, genomfördes 2018. Avverkningen av granbeståndet resulterade i en kraftigt ökad uttransport av kväve från området under två år efter avverkningen. Avverkningen medförde också kraftigt ökade halter av metylkvicksilver i avrinningen.



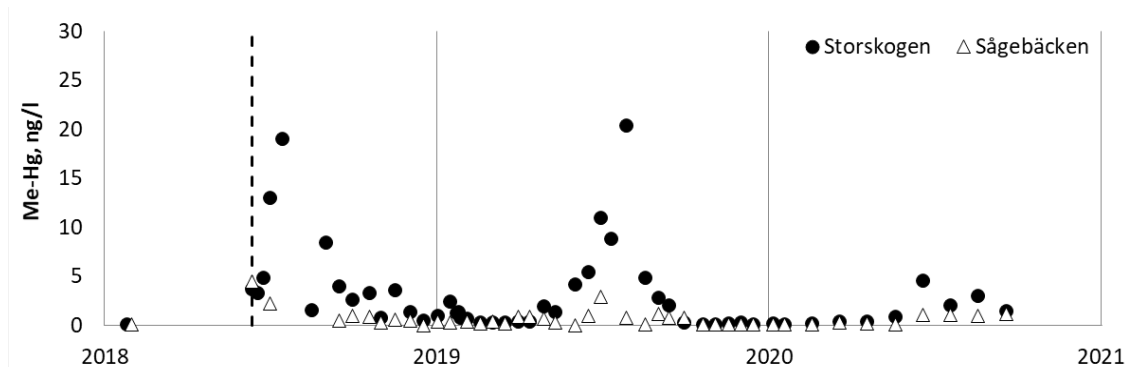
Att det frigörs kväve till markvattnet, främst i form av nitrat, efter slutavverkning eller andra störningar såsom stormfällan och barkborreangrepp har tidigare visats för ett stort antal krondroppsytor. Hur mycket kväve som når ytvattnet beror på avrinningsområdets egenskaper, hur avverkningarna utförts och om kantzoner till fuktiga marker och vattendrag sparats. Avverkningen vid Storskogen genomfördes med en hög grad av hänsyn, bland annat gjordes ingen körning i våtmarken med maskiner. Vid Storskogen kvarlämnades några klungor med självföryngrade granar i det avverkade området men någon kantzon vid vattendraget genom avrinningsområdet lämnades dock ej. Grenar och toppar (grot) kvarlämnades på hygget.

Före avverkningen överskred halterna av nitratkväve ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) inte 0,1 mg/l i någon del av avrinningsområdet Storskogen. Efter avverkningen i juni 2018 ökade halterna av  $\text{NO}_3\text{-N}$  kraftigt, Figur 33, med början i markvattnet redan två veckor efter att avverkningen påbörjades. I grundvattnet i mineraljorden ökade halterna drygt två månader efter avverkning och i bäckvattnet i avrinningen efter cirka fem månader. Den årliga uttransporten av kväve från avrinningsområdet, inklusive alla kväveformer, ökade från cirka 2 kg N/ha/år före avverkning till 4 kg N/ha/år första året och till nästan 12 kg N/ha/år andra året efter avverkning. Det fanns inga tecken på att uttransporten av kväve från området kulminerat när mätningarna avslutades drygt två år efter avverkningen.



Figur 33. Periodvisa halter av  $\text{NO}_3\text{-N}$  i olika delar av avrinningsområdet Storskogen. Vertikal streckad linje visar tidpunkten för slutavverkning. Mätningarna startade redan i april 2014, men för tydlighetens skull visas inte mätresultat för 2014 och 2015. Dessa resultat var dock mycket lika resultaten för åren 2016 och 2017. Från Hellsten m.fl., (2021).

I samband med slutavverkningen påbörjades regelbundna provtagningar och analyser av total- och metylkvicksilver. Jämförande provtagningar gjordes vid ett närliggande vattendrag, Sågebäcken. Koncentrationerna av metylkvicksilver vid Storskogen var sommartid efter avverkning bland de högsta som någonsin har uppmätts i skog i Sverige, Figur 34. Den årliga uttransporten av metylkvicksilver i det avverkade området var tre gånger högre än i närliggande Sågebäcken, vilket är i linje med resultat från andra studier. Framför allt förekom mycket höga halter av metylkvicksilver vid låg vattenföring sommartid.



Figur 34. Koncentrationer av metylkvicksilver, MeHg, i avrinningen genom nedre provtagningsdammen i avrinningsområdet Storskogen, samt i Sågebäcken. Vertikal streckad linje visar tidpunkten för slutavverkningen. Från Hellsten m.fl., 2021.

## 6.5 Fosfordeposition till Östersjön-HELCOM-HaV

Med finansiering från Havs- och vattenmyndigheten inom ramen för SMED-Vatten har IVL Svenska Miljöinstitutet inventerat kunskapsläget vad gäller deposition av fosfor (P) till havsområden och andra vattenytor, med en särskild inriktning på torrdeposition och med ett fokus på Östersjön (Karlsso m.fl., 2018c).

Inom HELCOM använder man för närvarande ett konstant årligt värde över hela Östersjön för nedfallet av totalfosfor på 5 kg fosfor per km<sup>2</sup>. Detta värde baseras främst på mätningar av bulkdepositionen av fosfor inom de olika medlemsländerna. Resultat från en tysk undersökning med mätningar vid två kustnära platser vid Tysklands kust mot Östersjön tydde på att det nu använda värdet för fosfordeposition till Östersjön, 5 kg fosfor per km<sup>2</sup> och år, var för lågt och att det verkliga värdet ligger närmre det tidigare använda värdet inom HELCOM, 15 kg fosfor per km<sup>2</sup> och år. En sammanställning av tillgängliga svenska mätningar, från den svenska miljöövervakningen, vid platser inom 50 km från kustlinjen vid Östersjön och Kattegatt, visar på en mycket stor mellanårsvariation i den årliga bulkdepositionen av totalt fosfor. För fem platser i södra delen av Sverige varierar medelvärdet för bulkdepositionen vid dessa platsen mellan 11,9 och 25,6 kg fosfor per km<sup>2</sup> och år, under åren 2013 - 2017. Dessa resultat stödjer således slutsatserna från den tyska studien att det nuvarande värde som används inom HELCOM för det årliga, samlade nedfallet av totalt fosfor, 5 kg fosfor per km<sup>2</sup>, sannolikt är satt för lågt.

En uppföljande studie kommer att göras under 2021 med finansiering från Havs- och vattenmyndigheten inom ramen för SMED-Vatten. Studien syftar till att sammanställa alla tillgängliga mätresultat för torr- och våtdeposition av fosfor till skog och öppet fält i olika delar av Sverige. Den årliga fosfordepositionen beräknas med en så hög geografisk fördelning som möjligt för att kunna beräkna årligt nedfall av P till land- och sjöyta i Sverige.

## 7 Nyheter & notiser

Mätningar av krondropp med sommarutrustning, Hjärtsjömåla, Blekinge län. Fotograf: Per Erik Karlsson

## 7.1 Ny programperiod, 2021–2026, inom Krondropps nätets startar

Under 2021 startar en ny programperiod, Program 2021. Perioden sträcker sig fram till 2026 och det är glädjande att Krondropps nätets fortsätter under ännu en programperiod. Under den nya programperioden kommer resultat och analyser av mätningar samt yttäckande kartläggningar redovisas på Krondropps nätets webbplats, samt med länsvisa/områdesvisa rapporter och som en nationell rapport. År 2025 firar Krondropps nätets 40 år och då planerar vi även att genomföra Krondropps dagar. Under 2025 kommer även ett förslag till nytt program att tas fram. Vidare kommer en temainriktad rapport att skrivas under programperioden om något intressant, då aktuellt, ämne.

## 7.2 Revision klar angående Naturvårdsverkets delprogram ”Försurande/Övergödande ämnen”

Naturvårdsverket startade 2015 en utvärdering av den pågående verksamheten inom Programområde Luft och 2018 påbörjades en fördjupad revision, med internationella utvärderare, som omfattade delprogrammen Försurande och övergödande ämnen i luft och nederbörd, Krondropps nätets-NV (den del av Krondropps nätets som finansieras av Naturvårdsverket) och MATCH-Sverigesystemet. Utgående från de internationella utredarnas rapport sammanställde Naturvårdsverket ett förslag till revision av verksamheterna som rör försurande och övergödande ämnen. I mars 2020 skickades Naturvårdsverkets förslag ut på remiss till berörda parter. Sedan 2021 är revisionen klar och ett nytt delprogram har utformats av Naturvårdsverket (<https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhället/Miljoarbete-i-Sverige/Miljoovervakning/Miljoovervakning/Programomrade-Luft/Delprogram--Forsurande-och-overgodande-amnen-i-bakgrundsluft/>). Det nya delprogrammet Svenska Luft- och Depositionsnätverket (SveLoD) bygger på en sammanslagning av tre befintliga mätprogram (LNKN, Krondropps nätets-NV och EMEP). Istället för tre delprogram kommer stationerna att vara uppdelade i olika typer av mätningar; EMEP (Luft- och nederbörds-mätningar); LN (månatliga luft- och nederbörds-mätningar); SNK (månatliga strängprov, nederbörd- och krondropps-mätningar) och N (månatliga nederbörds-mätningar). Naturvårdsverket kommer i och med detta nya delprogram att finansiera all provtagning för de mätyper som de ska finansiera vid berörda provytor. För Krondropps nätets-NV:s del innebär detta nya delprogram tyvärr att Naturvårdsverket valde att avsluta mätningar vid vissa mätplatser. För 2021 har dock annan finansiering möjliggjort fortsatta mätningar vid samtliga dessa platser förutom att mätningar av lufthalter och markvattenkemi tyvärr avslutades vid Storulvsjön i Västernorrlands län.

## 7.3 Pågående projekt där Krondropps ytor modelleras

I ett modelleringsprojekt finansierat av Energimyndigheten, ”Effekter av helträdsuttag på baskatjon-omsättning och försurning - uppskalning till nationell nivå med ekosystemmodellen ForSAFE”, används ForSAFE-modellen för att studera effekter av helträdsuttag på baskatjonomsättning och försurning. Sammanlagt ingår ungefär 25 mätplatser i projektet, som utförs vid Lunds universitet.

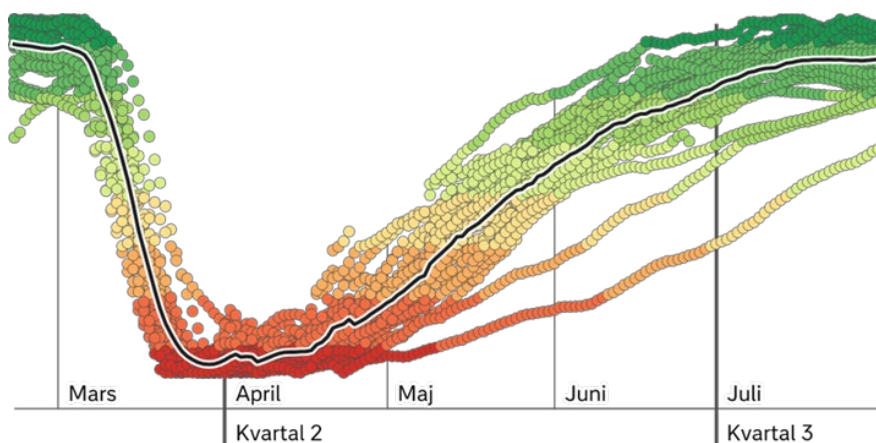
Inom ett doktorandprojekt vid Lunds universitet studeras Västra Torup och Hissmossa, två Skånska Krondropps ytor som ligger nära varandra men där Västra Torup inte läckte nitratkväve innan avverkning, medan Hissmossa uppvisade kraftigt förhöjda halter av nitratkväve i markvattnet. Syftet med projektet är att ta reda på om olikheter i markegenskaper kan förklara denna skillnad.

I ett annat doktorandprojekt vid Lunds universitet studeras effekten av återkommande torkepisoder på vittringshastigheten på mätplatser i olika klimatregioner: Amarnäs, Högbränna och Holmsvattnet i Västerbottens län samt Hyttskogen i Västmanlands län, Södra Averstad i Värmlands län, Bordsjö i Jönköpings län och Västra Torup i Skåne.

## 7.4 Har Covid-19 påverkat nedfallet?

Utbrotten av Covid-19 orsakade omfattande nedstängningar av samhället såväl i Sverige som globalt. I samband med det uppstod frågan om det medförde effekter som man kan se i mätningarna inom Krondroppsnetet. Man ska dock ha i åtanke att vädret i Sverige var ovanligt mildt under perioden december 2019 – februari 2020, vilket också påverkade utsläppen av luftföroreningar.

Nedstängningarna i olika länder var omfattande under våren 2020. Ett sätt att uppskatta omfattningen av nedstängningen är att använda sig av "Google Mobility Report", som i sin tur baserar sig på rörelsemönster hos mobiltelefonernas signaler. SVT gjorde under våren 2020 en sammanställning av rörelsemönster i Europas länder, Figur 35. Det som illustreras är rörelsemönster på till exempel affärer, restauranger, caféer, gallerior, museum, bibliotek och biografier. För varje dag i källmaterialet kan man läsa ut hur stor rörlighet det var i förhållande till en jämförelseperiod, vilket utgjordes av perioden 3 januari–6 februari 2020. Materialet har bearbetats så att det visar rullande tvåveckors-perioder. Vidare har värdet skalats om utifrån landets högsta och lägsta värde under perioden. En brant nedgång i rörlighet i olika länder i Europa skedde i slutet av mars. Det var en låg aktivitet i april men i maj börjar det klättra uppåt igen. I slutet av juni börjar de flesta länder komma tillbaka till ett mer normalt läge.



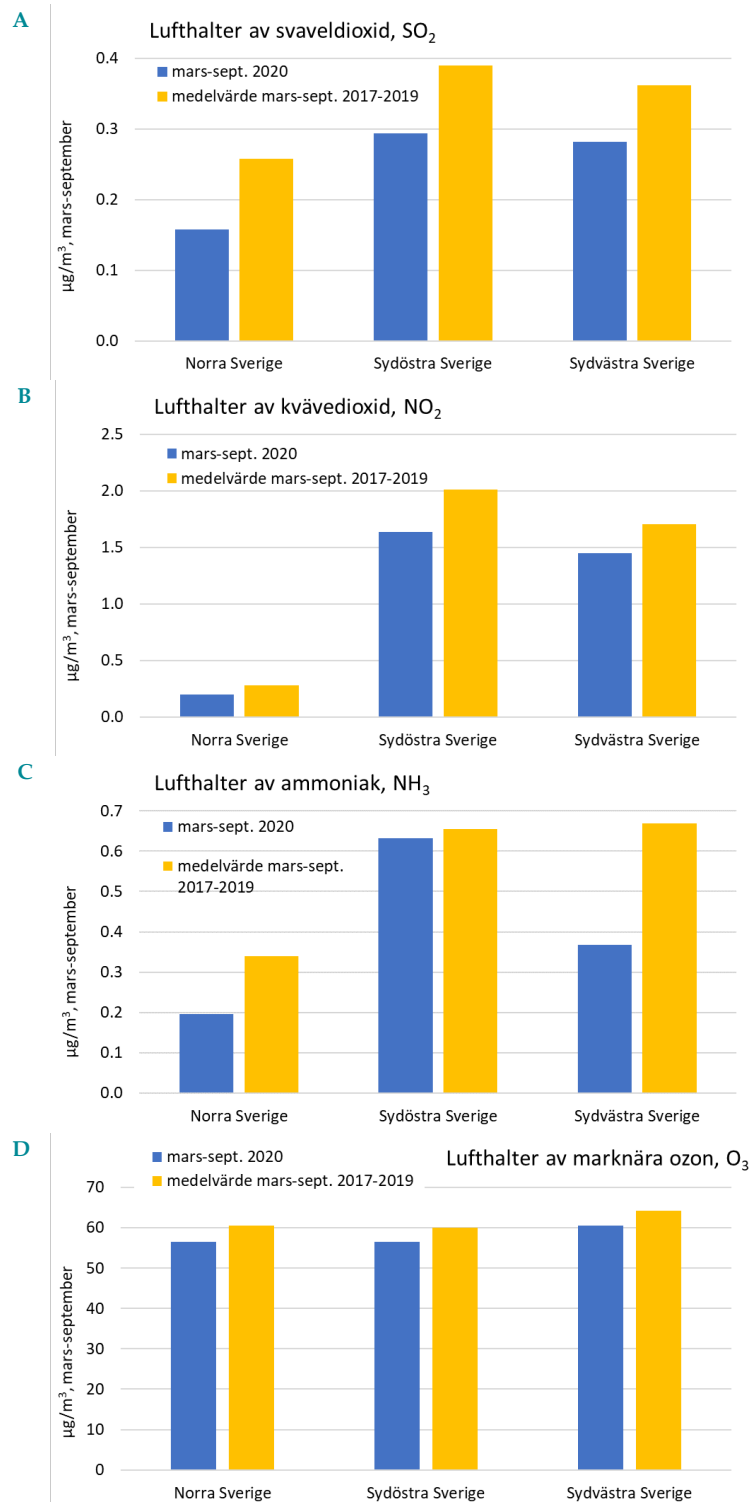
Figur 35. En illustration av förändringar hos människors rörelser i olika europeiska länder under våren 2020. Varje linje av prickar är ett land och varje prick är en dag. Det svarta strecket är det genomsnittliga värdet. Högt upp i grafen med grön färg är hög rörlighet, och långt ner med röd färg är låg rörlighet. Källa: SVT, 2020-10-14. <https://www.svt.se/datajournalistik/corona-andra-kvartalet/>

Även kartor över olika länders nedstängning visar ett liknande mönster. Italien och Norge stängde ner redan i mitten av mars, och i slutet av mars hade de flesta europeiska länder stängt ner. I slutet av april började de flesta länder öppna upp igen, men Storbritannien var ett av de länder som var nedstängt längst. Utsläppen av luftföroreningar i världen minskade kraftigt som en konsekvens av olika nedstängningar av samhällen.

Venter m.fl. (2020) analyserade observerade halter av NO<sub>2</sub> globalt och korregerade dessa uppmätta halter utifrån rådande vädersituationer, baserat på en modell som kalibrerades för åren 2017–2019. Man jämförde uppmätta halter under den period under våren 2020, då nedstängningar rådde i respektive land, med förväntade halter utifrån vad som uppmätts under åren 2017–2019. Man beräknade att halterna av NO<sub>2</sub> i Sverige var cirka 50 procent lägre jämfört med vad som kunde förväntas utan nedstängningen av samhället. Myllyvirta & Thieriot (2020) uppskattade att halterna av kvävedioxid i Europa var 40 procent lägre under april månad 2020, jämfört med vad de skulle ha varit under normala omständigheter utan nedstängning av samhället, och att halterna för Sveriges del var 28 procent lägre.

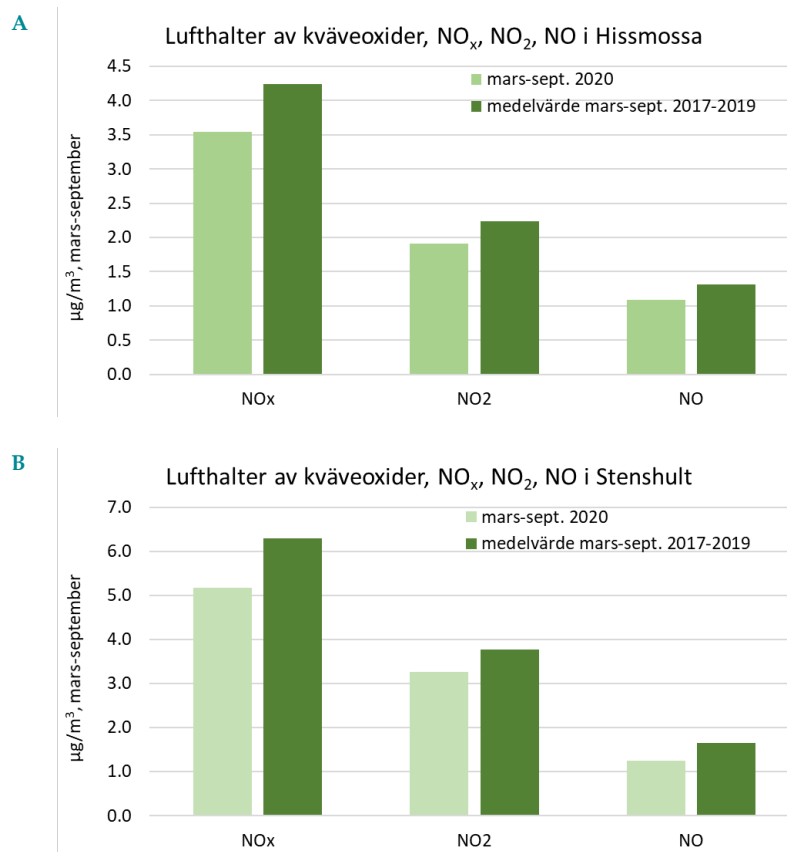
Vi har analyserat om lufthalterna av svaveldioxid (SO<sub>2</sub>), kvävedioxid (NO<sub>2</sub>), ammoniak (NH<sub>3</sub>) och marknära ozon (O<sub>3</sub>) över olika delar av Sverige var lägre under perioden mars – september 2020, jämfört med ett medelvärde för motsvarande månader under de tre föregående åren 2017–2019. Analysen omfattar mätplatser inom Krondroppsnetet och vi har gjort medelvärden för de tre geografiska områdena sydvästra-, sydöstra-, och norra Sverige, Figur 3. Vi visar resultat för SO<sub>2</sub>, Figur 36A, NO<sub>2</sub>, Figur 36B, NH<sub>3</sub>, Figur 36C samt för O<sub>3</sub>, Figur 36D. Resultaten visar att det eventuellt fanns en effekt av nedstängningen av samhället i samband med Covid-19 genom att halterna av SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> och O<sub>3</sub> var lägre under mars-september 2020, jämfört med ett medelvärde för samma månader 2017–2019, Figur 36A-D. Halterna av SO<sub>2</sub> var 22, 24 och 39 procent lägre för

respektive sydvästra, sydöstra och norra Sverige. Motsvarande värden för NO<sub>2</sub>-halterna var 15, 19 och 30 procent, för NH<sub>3</sub>-halterna: 45, 3 och 42 procent och för ozonhalterna: 6, 6 och 7 procent lägre. För att säkerställa om detta beror på nedstängningen av samhällena behövs dock en mer noggrann analys. Allt blev dock inte bättre under pandemin, i en del större städer var ozonhalterna högre än normalt. Detta beror på att under normala förhållanden bryts ozon ned av kväveoxid från bilavgaser och är därför oftast lägre i storstäder än på landsbygden. Men under 2020 när kväveoxiderna minskat i städerna så har dess "ozondödande" effekt minskat och ozonhalterna i städer har därför ökat. Till exempel var 2020 första året då Stockholms innerstadsluft hade högre ozonhalter än omgivande landsbygdsluft.



Figur 36. Lufthalter av svaveldioxid, SO<sub>2</sub>, kvävedioxid, NO<sub>2</sub>, ammoniak, NH<sub>3</sub> och marknära ozon, O<sub>3</sub> som medelvärde för månaderna mars-september 2020 samt för samma månader som medelvärde för åren 2017–2019. Resultaten visas som medelvärden för alla mätplatser inom Krondroppsnetet inom respektive geografisk region.

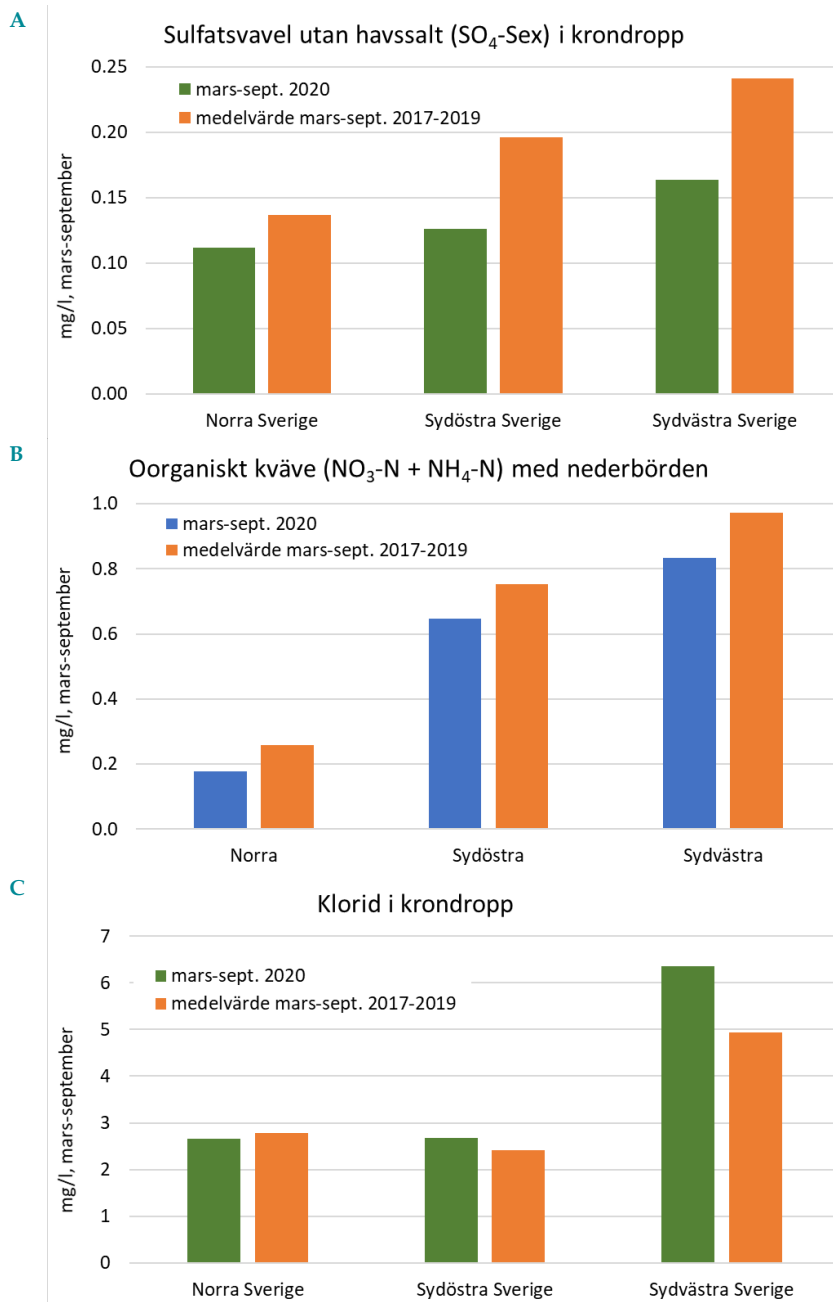
Vid Stenshult och Hissmossa i Skåne mäts även NO<sub>x</sub> i bakgrundsluften. Stenshult ligger mer utsatt på Romeleåsen medan Hissmossa ligger mindre utsatt mitt i Skåne. De samlade kväveoxiderna, NO<sub>x</sub>, minskade med 16 och 18 procent vid Hissmossa respektive Stenshult under mars-september 2020 jämfört med ett medelvärde för motsvarande månader 2017–2019, medan motsvarande kvävedioxidhalter minskade med 14 respektive 13 procent. Kvävemoxidhalterna, NO, minskade med 17 respektive 25 procent vid Hissmossa respektive Stenshult, Figur 37.



**Figur 37. Lufthalter av kväveoxider, NO<sub>x</sub>, kvävedioxid, NO, och kvävemoxid, NO som medelvärde för månaderna mars-september 2020 samt för samma månader som medelvärde för åren 2017–2019 vid Hissmossa (A) och Stenshult (B) i Skåne. Observera att det är stor skillnad mellan skalorna i diagrammen.**

Vi har även analyserat om nedfallet av olika ämnen över olika delar av Sverige var lägre under perioden mars – september 2020, jämfört med ett medelvärde för motsvarande månader under de tre föregående åren 2017–2019. Analysen omfattar aktiva mätplatser inom Krondroppsnetet och vi har gjort medelvärden för de tre geografiska områdena sydvästra-, sydöstra-, och norra Sverige, Figur 3. För att reducera påverkan från skillnader i nederbördsmängder analyserar vi koncentrationer av ämnen i nedfallet. Vi visar resultat för sulfatsvavel utan bidrag från havssalt (Figur 38A), oorganiskt kväve (NO<sub>3</sub>-N + NH<sub>4</sub>-N, Figur 38B) samt för klorid (Figur 38C).

Koncentrationerna av klorid var relativt lika mellan året 2020 och medelvärdet för åren 2017–2019, vilket tyder på att det inte var någon annan, betydande, icke-antropogen skillnad mellan dessa år som påverkade koncentrationerna i nedfallet. Koncentrationerna av såväl sulfatsvavel som oorganiskt kväve var däremot lägre under mars-september 2020, jämfört med ett medelvärde för motsvarande månader under 2017–2019. Detta gällde alla de tre geografiska regionerna sydvästra, sydöstra och norra Sverige. Koncentrationerna av sulfatsvavel var 32, 36 och 19 procent lägre under mars-september 2020, jämfört med ett medelvärde för samma månader 2017–2019 för respektive sydvästra, sydöstra och norra Sverige. Motsvarande värden för oorganiskt kväve var 14, 14 samt 31 procent för respektive sydvästra, sydöstra och norra Sverige.



Figur 38. Koncentrationer av olika ämnen i nedfall som medelvärde för månaderna mars-september 2020 samt för samma månader som medelvärde för åren 2017–2019. A, sulfatsvavel utan bidrag från havssalt i krondropp; B, oorganiskt kväve i nedfall med nederbörden på öppet fält ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ); C, i krondropp för klorid. Resultaten visas som medelvärden för alla mätplatser inom Krondroppsnetet inom respektive geografisk region.

Det finns således en indikation på att såväl lufthalter som det atmosfäriska nedfallet av både svavel och kväve till skog i Sverige var lägre under sommarhalvåret 2020, jämfört med ett medelvärde för de tre föregående åren, sannolikt beroende på de nedstängningar av olika samhällen i Sverige, övriga Europa och globalt som föranleddes av Covid-19-pandemin. För att helt säkerställa detta behövs dock en mer noggrann analys av meteorologiska förhållanden och luftmassornas rörelser under dessa år.



## 7.5 Korta notiser – vad hände under 2020?

- **Internationellt samarbete - Krondropps nätets data med i “the State of Europe's Forests 2020 report” och även i “ICP Forests Technical Report Forest Condition in Europe - The 2020 Assessment”.**

Resultaten som uppnås inom Krondropps nätets rapporter och används inom olika internationella sammanhang, främst inom vad som kallas ICP-Forest (The International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests). ICP Forest är ett samarbetsorgan inom luftkonventionen LRTAP (UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Air Convention).

Under vintern 2020/21 publicerades “the State of Europe's Forests 2020 report” av FOREST EUROPE Liaison Unit Bratislava. Rapporten ger omfattande information om skogens- och skogsbrukets status och trender i Europa, baserat på europeiska kriterier för ett hållbart skogsbruk. För första gången innehåller rapporten också en kort översikt över skogar och skogsbruk i enskilda länder. Den kompletteras med tabeller med information om indikatorer från enskilda länder. The State of Europe's Forests 2020 report är ett resultat av ett samarbete mellan många experter, regeringar och internationella organisationer, inklusive ICP Forests. Krondropps nätets data är med i denna rapport, detta då vi rapporterar våra data till ICP Forest. Rapporten samt en sammanfattning för beslutsfattare är tillgängliga via <https://foresteurope.org/publications/>.

Data från Krondropps nätets har även publicerats i “ICP Forests Technical Report Forest Condition in Europe - The 2020 Assessment”. Rapporten visar resultat och nationella rapporter från 31 länder. Den innehåller även speciella teman från 2019. Ett exempel är atmosfäriskt nedfall via krondropp i Europas skogar under 2018; Rapporten är tillgänglig via: [http://icp-forests.net/page/icp-forests-technical-report?xg\\_source=msg\\_mes\\_network](http://icp-forests.net/page/icp-forests-technical-report?xg_source=msg_mes_network).

- **Föredrag för “ICP Forest Expert panel on deposition”**

Inom ICP Forest finns ett flertal expertpaneler, där metodik och uppnådda resultat vad gäller miljöövervakning av skog diskuteras. Forskare från Krondropps nätets deltar regelbundet i dessa möten.

8–12 mars 2021 genomfördes inom ICP Forest ett vad som kallas “Joint expert panel meeting”, där forskare från ett flertal olika expertpaneler deltar. Forskare från Krondropps nätets deltog främst i den del av mötet som gällde “Expert panel on deposition”. Per Erik Karlsson gav ett muntligt föredrag med titeln “Total deposition of inorganic nitrogen to Norway spruce forests in Sweden”, främst inriktat på att beskriva de mätningar som bedrivs med så kallade “strängprovtagare” och som syftar till att beräkna torrdepositionen av olika kväveföreningar till barrskog i Sverige.

- **Övervakning av atmosfäriskt nedfall i USA**

I USA finns ett omfattande nätverk för övervakning av atmosfäriskt nedfall, kallat “National Atmospheric Deposition Program, NADP”, (<http://nadp.slh.wisc.edu/NADP/>), bildat 1997. NADP utgör en paraplyorganisation för flera olika nätverk, varav ett kallas “NADP National Trends Network (NTN)”. Inom detta nätverk mäts deposition vid 263 olika platser i USA, med provtagning huvudsakligen på veckobasis. Ett annat nätverk är “the Atmospheric Integrated Research Monitoring Network (AIRMoN)”, där nederbörds kemi provtas och analyseras på en daglig basis. Ett tredje nätverk är “Mercury Deposition Network (MDN)”, där man som namnet antyder främst är inriktade på nedfall av kvicksilver. Det ingår ytterligare några nätverk. För närvarande har NADP sitt högkvarter vid Wisconsin State Laboratory of Hygiene at the University of Wisconsin-Madison.

NADP hade ett årligt tekniskt och vetenskapligt symposium 27–30 oktober 2020. Under en av sessionerna, “Atmospheric Deposition Effects in Aquatic and Terrestrial Ecosystems”, gav Per Erik Karlsson ett muntligt föredrag med titeln “Total deposition of inorganic nitrogen to Norway spruce forests in Sweden”.

<http://nadp.slh.wisc.edu/committees/tdep/>.

- **Forskning som ska ge en bättre förståelse om hur mikroorganismer svarar på torka och variabel fuktighet i mark**

Under ett antal år kommer forskare från Lunds universitet (Johannes Rousk/Sara Winterfeldt) att undersöka hur markmikroorganismer påverkas av torka och nederbördscykler, vilket kommer bli mer förekommande i och med klimatförändringarna. De ska undersöka hur mikroorganismerna påverkas i en nederbördsgradient från väst till öst (inom samma temperaturspann) och även hur fysisk störning av marken, liknande plöjning, påverkar. De kommer i detta projekt att skapa små provplatser i närheten av Krondropps nätets öppet fält-provtagare. De 12 ytor som berörs ligger som ett band tvärs över landet från västkusten upp mot Stockholmsområdet på ostkusten.

- **Kväve i mossa 2020**

Under 2020 genomfördes återigen den stora mossundersökningen: "Metaller i mossa" som sedan 1975 sker i Sverige med 5 års mellanrum. Nytt för denna gång är att Kjeldahl-kväve analyserades på mossorna vid samtliga 500 provplatser. Tanken är att utnyttja sambandet mellan nedfall och halt i mossa för att kunna göra en mer detaljerad karta över ett genomsnittligt kvävenedfall för 2017–2019 där kvävenedfallet uppskattas baserat på halter av kväve i mossa från ett stort antal provplatser. Mossprover togs därför även i närheten av nedfallsmätningarna vilket gjorde att ett samband kunde upprättas. En tidigare pilotstudie genomfördes på ett mindre antal av 2015 års mossprover, då man kunde konstatera att ett starkt samband mellan halter i mossa och nedfall av kväve fanns med en relativt låg spridning (Pihl Karlsson m.fl., 2017). Resultaten kommer att publiceras under sensommaren 2021.

## 8 Tack

Vi vill uttrycka ett varmt tack till samtliga provtagare inom Krondropps nät som utför ett mycket ovärderligt arbete i fält. Vi vill även uttrycka ett varmt tack till all personal på IVL:s laboratorium för ett mycket bra arbete. Slutligen tackar vi Krondropps nätets samtliga medlemmar för gott och intressant samarbete.



Provtagning på hög höjd i Jämtlands län.

## 9 Referenser

- Akselsson, C., Westling, O., Örländer, G., 2004. Regional mapping of nitrogen leaching from clearcuts in southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 202: 235-243.
- Akselsson, C., Westling, O., Sverdrup, H., Holmqvist, J., Thelin, G., Uggla, E. 2007. Impact of Harvest Intensity on Long-Term Base Cation Budgets in Swedish Forest Soils. *Water Air Soil Pollut. Focus* 7,201–210.
- Akselsson, C., Belyazid, S., Hellsten, S., Klarqvist, M., Pihl-Karlsson, G., Karlsson, P.E., Lundin, L., 2010. Assessing the risk of N leaching from Swedish forest soils across a steep N deposition gradient in Sweden. *Environmental Pollution* 158: 3588–3595.
- Akselsson, C., Belyazid, S., 2018. Critical biomass harvesting – Applying a new concept for Swedish forest soils. *Forest Ecology and Management* 409, 67-73. DOI 10.1016/j.foreco.2017.11.020
- Akselsson, C., Belyazid, S., Stendahl, J., Finlay, R., Olsson, B.A., Erlandsson Lampa, M., Wallander, H., Gustafsson, J.P. & Bishop, K., 2019. Quantifying weathering rates for sustainable forestry. *Biogeosciences*, 16, 4429–4450.
- Akselsson, C., Kronnäs, V., Stadlinger, N., Zanchi, G., Belyazid, S., Karlsson, P.E., Hellsten, S., Pihl Karlsson, G. 2021. A Combined Measurement and Modelling Approach to Assess the Sustainability of Whole-Tree Harvesting – A Swedish Case Study. *Sustainability* 13, 2395. Lucander, K., Zanchi, G., Akselsson, C. & Belyazid, S., 2021. The Effect of Nitrogen Fertilization on Tree Growth, Soil Organic Carbon and Nitrogen Leaching – A Modeling Study in a Steep Nitrogen Deposition Gradient in Sweden. *Forests* 12, 298.
- CEIP, 2021. Emissionsdata är hämtade från: <https://www.ceip.at/webdab-emission-database/reported-emissiondata/>
- Ferm, M., Granat, L., Engardt, M., Pihl Karlsson, G., Danielsson, H., Karlsson, P.E., Hansen, K. 2019. Wet deposition of ammonium, nitrate and non-sea-salt sulphate in Sweden 1955 through 2017. *Atmospheric Environment: X* 2 (2019) 100015. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100015>.
- Hellsten, S., Stadmark, J., Pihl Karlsson, G., Karlsson, P.E., Akselsson, C., 2015. Increased concentrations of nitrate in forest soil water after windthrow in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*. 356, 234-242.
- Hellsten, S., Gustafsson, M., Pihl Karlsson, G., Danielsson, H., Karlsson, P.E., Akselsson, C. 2017. Påverkan på atmosfäriskt nedfall och luftkvaliteten i Sverige av SO<sub>2</sub>-emissioner från vulkanutbrottet på Island, 2014–2015. IVL Rapport C 234.
- Hellsten, S., Karlsson, P.E., Pihl Karlsson, G., Akselsson, C. 2021. Hur påverkas mark-, grund- och ytvatten vid en skogsavverkning? - Fallstudie Storskogen i Västra Götaland. IVL Rapport C 570.
- Hertel, O., Reis, S., Skjöth, C.A., Bleeker, A., Harrison, R., Cape, N.J., Fowler, D., Simpson, D., Jickells, T., Baker, A., Kumala, M., Gyldenkaerne, S., Sørensen, L.L., & Erisman, J.E., 2011. Nitrogen processes in the atmosphere. *The European nitrogen Assessment*. (M. Sutton et al., eds). Cambridge University press.
- Johnson, J., Graf Pannatier, E., Carnicelli, S., Cecchini, G., Clarke, N., Cools, N., Hansen, K., Meesenburg, H., Nieminen, T.M., Pihl Karlsson, G., Titeux, H., Vanguelova, E., Verstraeten, A., Vesterdal, L., Waldner, P. & Jonard, M. 2018. The response of soil solution chemistry in European forests to decreasing acid deposition. *Global Change Biology*. 2018;1–17. DOI: 10.1111/gcb.14156
- Karlsson, P. E., Klingberg, J., Engardt, M., Andersson, C., Langner, J, Pihl Karlsson, G. and Pleijel, H. 2017. Past, present and future concentrations of ground-level ozone and potential impacts on ecosystems and human health in northern Europe. *Science of The Total Environment* 576, 22–35.
- Karlsson, P.E., Pihl Karlsson, G., Hellsten, S., Akselsson, C. 2018a. Utveckling av en indikator för totalt nedfall av kväve till barrskog inom miljökvalitetsmålet Ingen övergödning. IVL Rapport C286.

- Karlsson, P.E., Akselsson, C., Hellsten, S., Pihl Karlsson, G., 2018b. A bark beetle attack caused elevated nitrate concentrations and acidification of soil water in a Norway spruce stand. *Forest Ecology and Management* 422, 338-344.
- Karlsson, P.E., Pihl Karlsson, G. 2018c. Deposition av fosfor till Östersjön. Kunskapsläge och möjligheter till löpande mätningar. SMED Rapport Nr 18, 2018.
- Karlsson, P.E., Pihl Karlsson, G., Hellsten, S., Akselsson, C., Ferm, M., & Hultberg, H. 2019. Total deposition of inorganic nitrogen to Norway spruce forests – Applying a surrogate surface method across a deposition gradient in Sweden. *Atmospheric Environment* 217. (doi:10.1016/j.atmosenv.2019.116964)
- Karlsson, P.E., Pihl Karlsson, G., Danielsson, H., Langner, J. & Pleijel, H. 2019b. En ekonomisk utvärdering av inverkan av marknära ozon på skog och jordbruksgrödor i Sverige baserat på ozonflux. IVL Rapport C 460.
- Karlsson, P.E., Pihl Karlsson, G., Danielsson, H., Hellsten, S., 2021a. Torrdeposition till insamlare för nedfall med nederbörden - Metodik och manual baserat på RUT-försöket, Rör under tak. IVL Rapport C 593.
- Karlsson, P.E., Pihl Karlsson, G., Hellsten, S., Akselsson, C. 2021b. Uttransport av olika ämnen i avrinningen från en granskog i västra Sverige före och efter en slutavverkning. Teknisk rapport från vattenkemiska mätningar i bäck-, grund-, och markvatten vid Storskogen 2014 – 2020. IVL Rapport C 569.
- Karlsson, P.E., Pleijel, H., Andersson, C., Bergström, R., Engardt, M., Eriksen, A., Falk, S., Klingberg, J., Langner, J., Manninen, S., Stordal, F., Tømmervik, H., Vollsnes, A. 2021c. The vulnerability of northern European vegetation to ozone damage in a changing climate. An assessment based on current knowledge. IVL Report C 586. ISBN 978-91-7883-270-5.
- Klingberg, J., Karlsson, P.E., Andersson, C., Engardt, M., Pihl Karlsson, G. and Pleijel, H. 2019. Observed annual surface ozone maxima and minima in northern and central Europe from 1990–2015 – latitude dependence and temporal trends. *Boreal Environment Research* 24: 201–214.
- Kronnäs, V., Akselsson, C., Belyazid, S., 2019. Dynamic modelling of weathering rates – the benefit over steady-state modelling. *SOIL* 5: 33-47.
- Lucander, K., Zanchi, G., Akselsson, C. & Belyazid, S., 2021. The Effect of Nitrogen Fertilization on Tree Growth, Soil Organic Carbon and Nitrogen Leaching—A Modeling Study in a Steep Nitrogen Deposition Gradient in Sweden. *Forests* 12, 298. (doi: 10.3390/f12030298)
- Myllyvirta, L. & Thieriot, H. 2020. 11 000 air pollution-related deaths avoided in Europe as coal, oil consumption plummeted, Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA). Länk till rapporten: <https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2020/04/CREA-Europe-COVID-impacts.pdf>
- Naturvårdsverket, 2019. Bara naturlig försurning – underlagsrapport till den fördjupade utvärderingen av miljömålen 2019. Naturvårdsverket RAPPORT 6860.
- Naturvårdsverket 2021. Delprogram Försurande och övergödande ämnen. (<https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Miljoovervakning/Miljoovervakning/Programomrade-Luft/Delprogram---Forsurande-och-overgodande-amnen-i-bakgrundsluft/>).
- Pihl Karlsson, G., Danielsson, H., Karlsson, P.E. och Wängberg, I. G., 2017. Samband mellan halter i mossor och deposition av metaller, kväve och svavel. IVL Rapport C 231.
- Pleijel, H., Grundström, M., Pihl Karlsson, G., Karlsson, P.E. & Chen, D. (2016). A method to assess the inter-annual weather-dependent variability in air pollution concentration and deposition in south-west Sweden based on weather typing. *Atmospheric Environment* 126 (2016), (doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.053.)
- Tamm, C.O., 1991. Nitrogen in terrestrial ecosystems. *Ecological Studies* 81. Springer Verlag, Berlin, Germany.

- Törseth, K., Hansen, J.E., Semb, B. 1999. Temporal and spatial variations of airborne Mg, Cl, Na, Ca and K in rural areas of Norway. *Science of the Total Environment* 234, 75-85.
- Venter, Z.S., Aunan, K., Chowdhury, S., Lelieveld, J. 2020. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *PNAS*, 117, 18984–18990. <https://www.pnas.org/content/117/32/18984>
- Waldner, P., Thimonier, A., Graf Pannatier, E., Eitzvold, S., Schmitt, M., Marchetto, A., Rautio, P., Derome, K., Nieminen, T., Nevalainen, S., Lindroos, A.-J., Merilä, P., Kindermann, G., Neumann, M., Cools, N., De Vos, B., Roskams, P., Verstraeten, A., Hansen, K., Pihl Karlsson, G., Dietrich, H.-P., Raspe, S., Granke, O., Fischer, R., Iost, S., Lorenz, M., Sanders, T.G.M., Michel, A., Nagel, H.-D., Scheuschner, T., Simoncic, P., Von Wilpert, K., Meesenburg, H., Fleck, S., Ingerslev, M., Gundersen, P., Stupak, I., Vesterdal, L., Jonard, M., Clarke, N., Benham, S., Vanguelova, E., Potocic, N. & Minaya, M. (2015). Exceedance of critical loads and of critical limits impacts tree nutrition across Europe. *Annals of Forest Science*, Volume 72, Issue 7, pp 929-939.
- Westling, O., Lövblad, G. 2004. Emission, transport, dispersion and effects of base cations in relation to acidification. Report from an UNECE LRTAP workshop in Gothenburg in november 2003. IVL Report 1585.
- Yu, L., Belyazid, S., Akselsson, C., van der Heijden, G. & Zanchi, G., 2016. Storm disturbances in a Swedish forest - A case study comparing monitoring and modelling. *Ecological Modelling* 320, 102-113.
- Yu, L., Zanchi, G., Akselsson, C., Wallander, H. & Belyazid, H., 2018. Modeling the forest phosphorous nutrition in a southwestern Swedish forest site. *Ecological Modelling* 369, 88-100.

**Webbplatser som nämns i rapporten:**

SVT, 2020-10-14. <https://www.svt.se/datajournalistik/corona-andra-kvartalet/>

Krondropps nätet: <http://www.krondroppsnetet.ivl.se/>

State of Europe's Forests 2020 report" av FOREST EUROPE Liaison Unit Bratislava. <https://foresteurope.org/publications/>.

ICP Forests Technical Report Forest Condition in Europe - The 2020 Assessment. Rapporten är tillgänglig via: [http://icp-forests.net/page/icp-forests-technical-report?xg\\_source=msg\\_mes\\_network](http://icp-forests.net/page/icp-forests-technical-report?xg_source=msg_mes_network).

SMHI, månadens väder. <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/manadens-vader-och-vatten-sverige>

National Atmospheric Deposition Program, NADP", <http://nadp.slh.wisc.edu/NADP/>



**BOLIDEN**



KALMAR LÄNS LUFTVÅRDSFÖRBUND



VÄRMLANDS LÄNS  
LUFTVÅRDSFÖRBUND  
[www.lvvarmland.se](http://www.lvvarmland.se)



LÄNSSTYRELSEN  
Södermanlands län



*Blekinge Kuststatten och Luftvårdsförbund*



LÄNSSTYRELSEN  
HALLANDS LÄN



VÄSTMANLANDS LÄNS  
LUFTVÅRDSFÖRBUND



LÄNSSTYRELSEN  
VÄSTRA GÖTALANDS LÄN



Länsstyrelsen  
Jämtlands län



Skånes Luftvårdsförbund



Länsstyrelsen  
Norrbotten



Östergötlands  
luftvårdsförbund



Länsstyrelsen  
Stockholm



VÄTTERNVÅRDS  
FÖRBUNDET



Länsstyrelsen  
Västernorrland



Länsstyrelsen  
Västerbotten



LÄNSSTYRELSEN  
DALARNAS LÄN



LUNDS  
UNIVERSITET



IVL Svenska Miljöinstitutet AB // Box 210 60 // 100  
31 Stockholm  
Tel 010-788 65 00 // [www.ivl.se](http://www.ivl.se)