



Figur 1: NIBIOs flukstårn som står på østsiden av Hurdalssjøen, sør i Hurdal kommune. Foto: Junbin Zhao (dronefoto)

Tårn som måler skogens karbonfangst

Klimaet forandrer seg, og vi vet at stigende temperaturer henger sammen med menneskeskapt utslipp av drivhusgasser til atmosfæren. Plantene tar opp rundt en fjerdedel av det vi slipper ut, men fluksene av drivhusgasser mellom atmosfæren og vegetasjon er komplekse og variable i rom og tid. For å kunne måle dem, må man ha et tårn med spesialutstyr. Siden september 2021 har NIBIO målt CO₂-fluks i et tårn som står i skogen i Hurdal.

Opptak eller frigjøring av drivhusgasser i et landskap bestemmes ved hjelp av gasskonsentrasjoner og vindstyrke og -retning. Disse variablene måles ved hjelp av den såkalte eddy-kovarians-metoden¹, hvor sammenheng mellom vind og gasskonsentrasjon («kovarians») blir beregnet for å kunne konkludere fluksen inn og ut av økosystemene. Til nå er det installert om lag 2100 slike målestasjoner verden

rundt, med ganske forskjellige standarder og protokoller til å måle. I Europa ble det europeiske nettverket «Integrated Carbon Observation System» ICOS², dannet i 2015, blant annet for å harmonisere målemetoden. ICOS stiller veldig strenge krav til måleoppsett, rutiner og prosedyrer ved stasjonene som deltar. Data fra disse stasjonene benyttes som kilde til validering av klimamodeller i europeisk sam-

1 <https://no.wikipedia.org/wiki/Eddy-kovarians-metoden>

2 <https://www.icos-cp.eu/>

menheng – de utgjør grunnlaget for karbonrapportering i Europa. Totalt finnes det 103 ICOS-tårn fordelt over 16 land så langt (i 2024). ICOS opererer med flere klasser for sine stasjoner. I klasse 2 måles karbondioksid, mens stasjoner i klasse 1 også måler metan og nitrogendioksid.

Norge har vært med i ICOS siden 2018³. I 2021 ble det bygget et 42 meter høyt tårn med avansert utstyr som måler CO₂-fluksen og dermed karbonbalansen mellom vegetasjonen og atmosfæren. Tårnet, som er plassert med omhu slik at terrenget og landskapet rundt det er mest mulig homogent, befinner seg i en gammel gran-skog i Hurdal. Det er kjerneelementet i ICOS-stasjonen «NO-Hur», den eneste av sitt slag her i landet så langt. Målinger begynte i september 2021 og fortsetter uavbrutt med målefrekvens opp til 20 per sekund. Dataene blir overført til ICOS sentralt⁴ en gang per døgn, og kan nedlastes uten begrensninger. Etter omfattende kvalitetskontroll ble NO-Hur godkjent som offisielt ICOS stasjon 15. november 2023 (Figur 2).



Figur 2: Sertifikat som bevis at Hurdal er en offisielt ICOS klasse 2 stasjon. Foto: Holger Lange.

VARIABLER SOM MÅLES PÅ OMRÅDET

I tillegg til selve fluksmålingen som skjer på toppen av tårnet, er det også en lang rekke med andre observasjoner som til sammen utgjør en ICOS klasse 2-stasjon. Vi måler også vertikalt langs tårnet for å kunne si noe om konsentrasjonen av karbondioksid langs tårnets høyde (såkalte profilmålinger). Antallet målinger i profilen avhenger av tårnets høyde – i vårt tilfelle er det tolv målehøyder fra 30 cm over bakken til 42 m.

For å kunne si noe om biomassen i skogen og biomangfold måler vi trærnes egenskaper (treslag, høyde, diameter, helsetilstand) og bunnvegetasjonen (artssammensetning, biomasse). Med hjelp av et spealkamera bestemmer vi bladarealindeks (LAI) som sier noe om skogens tetthet og fotosyntesekapasitet. Jordprøver blir analysert for bl.a. karbon- og nitrogeninnhold. Jordklima som jordtemperatur og -fuktighet

i forskjellige dybder samt jordvarmefluks blir automatisk registrert løpende med tidsoppløsning på 10 minutter. Måling av inn- og utgående stråling i forskjellige bølgelengdeområder bidrar til beregninger av energibalansen i skogen. Vannflukser er også målt med eddy-kovarians, og danner sammen med jordvann og grunnvannsspeil grunnlag for å kunne beregne vannbalansen i systemet. Dette suppleres med målinger av vannbevegelser i utvalgte trær for å estimere fordampning i kroneskiktet.

Trærnes utvikling gjennom året blir dokumentert med et såkalt «fenologisk kamera» på toppen av tårnet som tar bilder døgnet rundt automatisk (Figur 3). I tillegg blir nåleprøver samlet inn. Det finnes også målinger på enkelt-trær relatert til vanntransport (evapotranspirasjon) og diametervekst, såkalte dendrometer og vannfluksmålinger inn i stammen. Siden oktober 2023 har det også vært et spektrometer på toppen av tårnet som måler et veldig svakt lyssignal – sol-indusert fluorescens (SIF) som kommer fra trærnes krone og henger direkte sammen med biomasse økning (brutto primærproduksjon) i området spektrometret ser. Intensiteten av SIF signal er om lag en timillions del av vanlig synlig lys, slik at det er usynlig med det blotte øye.

Dette er bare et utvalg av måleutstyr på og rundt tårnet. NIBIO har søkt Forskningsrådet om midler til oppgradering av Hurdal til en klasse 1 stasjon, med betydelig mer omfattende målinger, blant annet er det i så fall også flukser av metan og nitrogendioksid som kommer i tillegg.

Et annet tårn som tilhører NILU (Norsk institutt for luftforskning) ligger rundt 100 m unna, hvor luftkvaliteten (kjemisk sammensetning) har blitt målt siden 2000. I tillegg driver NIBIO et forsøksfelt på området (ICP-Forests)⁵ med langtidsmålinger på skogens tilstand siden 1996. Samlet sett er skogen i Hurdal veldig godt overvåket, slik at tilstand og hver endring blir observert og kan detekteres fra kontoret: dataene flyter inn til NIBIOs kontorer i Ås hver halvtime.

Tårnets fotavtrykk

Tårnet er plassert et godt stykke unna Hurdalssjøen for å ikke fange opp fluksen av gasser til og fra vannet. ICOS krever nemlig at 90 prosent av luftmolekylene som kommer til tårnet har gått gjennom skogen først, slik at man kan tolke karbonfluks som uttrykk for skogens aktivitet.

³ <https://no.icos-cp.eu/>

⁴ https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES_NO-Hur

⁵ <https://nibio.no/tema/skog/skogskadeovervaking-i-norge/intensiv-skogovervaking-level-ii/internasjonalt-forankring-icp-forests>

ICOS-NO-Hur1 - NetCam SC IR - Mon Mar 18 2024 10:06:06 CET - UTC-1
Camera Temperature: 20.5
Exposure: 63



Figur 3: På toppen av tårnet finnes et fenologisk kamera som tar hyppige bilder av skogens tilstand året rundt. Eksempelet viser situasjonen 18.3.2024. I bakgrunnen ser man Hurdalssjøen heldekket av is. Foto: Fenocam NO-Hur

Arealet som målingene i tårnet representerer er tårnets fotavtrykk, og er en funksjon av tårnets høyde, terrenghelning, vegetasjonshøyden og vindens retning mot tårnet. Tårnets høyde må ligge godt over trærnes høyde, men under begynnelsen av frie atmosfæren – det såkalte grensesjiktet over vegetasjonsflaten. Dette er et sjikt over vegetasjonen der lufta fortsatt er i full turbulens. Lenger oppe er ikke lufta så urolig, og vindhastigheten er tilnærmet konstant. Over grensesjiktet vil luftstrømmene komme mer langveisfra og dermed kunne stamme fra annen type landskap langt borte. For at målingene skal ligge i rett høyde, må tårnet som brukes være mellom 1,67 og to ganger så høyt som (gjennomsnittshøyden til) den omkringliggende vegetasjonen. I Hurdal er skogen om lag 25 m høy, slik at best mulig tårnhøyde er omtrent 38 m. Vårt tårn består av seks meter høye moduler og kan dermed høynes ved behov, opp til 100m. Vi valgte å ha syv slike moduler og har derfor for tiden en tårnhøyde på 42 m. Skogen er gammel og vokser mindre enn 20 cm per år, slik at systemet ikke må justeres så ofte.

Hvis området rundt tårnet er veldig bratt eller lufta er veldig stabil, for eksempel om natten, kan konsentrasjonen av CO_2 bli veldig høy ved bakken og synke ned-

over i terrenget. Dette kalles adveksjon, og gir en overestimert av karbonopptak i vegetasjonen – når CO_2 i virkeligheten bare beveger seg nedover i terrenget. Vi har løst dette ved å måle i veldig flatt terreng. Alternativet ville vært å benytte måleinstrumenter som måler lenger nede i terrenget i tillegg.

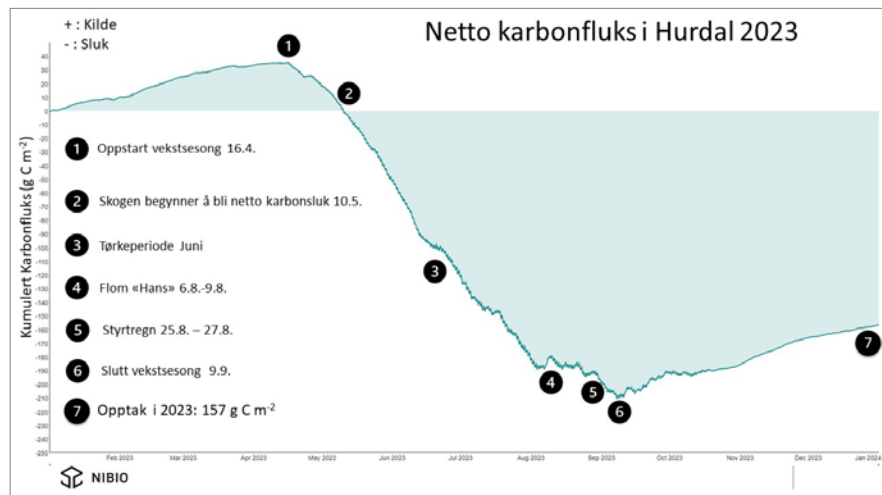
Det finnes også ICOS-stasjoner som måler konsentrasjoner av gasser over grensesjiktet. Slike stasjoner kalles atmosfæriske stasjoner, og er veldig høye – gjerne 150-200 meter. NILU har et slikt tårn i Birkenes, og er ansvarlig for den atmosfæriske delen av ICOS-målinger i Norge.

Vi har beregnet fotavtrykket til vårt tårn i Hurdal, som viser seg å være en uregelmessig mangekant med et areal på rundt 630 dekar. Alle målinger nevnt ovenfor skjer innenfor dette området.

Hvordan måles gassfluks i tårnet?

Vanlige værstasjoner måler bare vindens vannrette komponenter (to dimensjoner). Vi måler også dette, men i eddy-kovarians-metoden måler vi i tillegg også den tredje, vertikale retningen for å se om gass beveger seg oppover eller nedover. Gasskonsentrasjoner (karbondioksid, vann), lufttetthet og -temperatur må

Figur 4: Karbonbalansen til Hurdalskogen. På vertikalkalaksen vises kumulerte nettoprimærproduksjon (NEP), dvs. karbonopptak minus -tap. Skogen har tatt 157 g karbon ut av atmosfæren per m² i løpet av 2023, tilsvarende litt under 105 tonn innenfor fotavtrykket. NEP-kurven kan også benyttes til å bestemme start- og slutt-dato av vekstsesongen, og spesielle hendelser er synlig når stigningen endrer seg, f.eks. en tørkeperiode tidlig på sommeren og flom i august. Likevel ser året 2023 samlet ut som et ganske vanlig år i Hurdalsområdet.



også måles hyppig. Alle disse variablene måles 20 ganger per sekund (20Hz).

Gassflukser blir omregnet til skogens produktivitet, eller nettoøkosystemproduksjon (NEP). Det er ganske stor variasjon i karbonregnskapet til fotavtrykket til et tårn; det vanlige er karbonopptak (dvs. NEP > 0) på dagtid og karbontap (NEP < 0) på natten. Forskjellen mellom dag- og natt-NEP er avhengig av årstid. Dermed kan man konkludere med karbonbalansen til fotavtrykket. På landskapsnivå bør man likevel aller helst ha flere tårn, ettersom variasjonen i karbonregnskapet til et landskap kan være stor.

Ofte ser man på årsregnskapet for karbon i skogen. Er alle årstider tatt med, kan vi konkludere med om økosystemet innenfor fotavtrykket samlet sett har vært et karbonsluk eller -kilde. Siden Hurdalskogen er gammel og svekket, var vi usikre på utfallet.

Så langt har vi to fullstendige kalenderår med målinger, 2022 og 2023. Begge viser at skogen er et karbonsluk – og at karbonopptak disse to årene var ganske likt: 165 gram karbon per m² i 2022 og 157 gram karbon per m² i 2023, tilsvarende rundt 100 tonn av karbon innenfor fotavtrykket. Særlig tallet for 2023 er overraskende siden noe spesielt har skjedd gjennom året (Figur 4): etter en utstrakt tørkeperiode i juni kom flom «Hans» i begynnelsen av august. Begge ekstremhendelser fører til mindre opptak, noe som er tydelig synlig i Figur 3; «Hans» førte til tap av rundt 10% av årsproduksjon i løp av 3 døgn. Skogens alder på rundt 100 år og estimert produktivitet skulle tilsi

at den burde ta opp omtrent to ganger så mye som det vi målte disse to årene. Noen døde trær som falt under en storm høsten 2019 bidrar til et høyere utslipp av CO₂. Skogen er også i ferd med å svekkes på grunn av et pågående angrep av barkebiller.

SAMMENFATNING OG PLANLAGT OPPGRADERING AV TÅRNET

Hurdalstårnets to første hele år, 2022 og 2023, var samlet sett relativt udramatiske med gjennomsnittlig årsnedbør og vanlige temperaturer. Ekstremhendelser, først og fremst tørkeepisoder og hetebølger, men også styrregn og flom, kan føre til mindre opptak og til og med nettoutslipp av karbon. I Sverige, som har ni tilsvarende tårn, har man sett at skogen rundt et tårn med over tjue år med målinger har gått fra å være et karbonsluk til å bli en karbonkilde på grunn av barkebilleangrep med betydelig tap av levende biomasse. Vi er spente på om vi vil se en slik utvikling også i vår skog.

For tiden (mars 2024) venter vi på evalueringen av en søknad til Forskningsrådet. Skulle det bli et prosjekt, vurderer vi en samlokalisering av vår skogstasjon med en atmosfærisk stasjon (i regi av NILU), noe som innebærer at tårnet må vokse – til sannsynligvis 75 m høyde. I så fall blir Hurdal en av veldig få stasjoner hvor hele ICOS måleprogram er til stede. Vi kaller Hurdal i et slikt tilfelle en «supersite».

FORFATTERE:

Holger Lange, avdeling skogforvaltning, divisjon skog og utmark; Beatrice Helgheim, avdeling biogeokjemi og jordkvalitet, divisjon miljø og naturressurser