



SINTEF

SINTEF Energi AS
Postadresse:
Postboks 4761 Torgarden
7465 Trondheim
Sentralbord: 45456000
energy.research@sintef.no

Foretaksregister:
NO 939 350 675 MVA

Prosjektnotat

Klimagassutslipp fra oversvømt land i Norge

VERSJON

Endelig

DATO

2022-02-11

FORFATTERE

Atle Harby og Mauro Carolli

OPPDRAGSGIVER

Miljødirektoratet

OPPDRAGSGIVERS REFERANSE

Kathrine Loe Bjønness

PROSJEKTNUMMER

502003195

ANTALL SIDER

13

Sammendrag

Dette notatet viser en overslagsmessig beregning av utslipp av klimagasser fra oversvømt land i Norge. I Norge er det meste av oversvømt land knyttet til vannkraftmagasiner. Notatet viser først ulike måter å finne oversvømt areal i Norge. Problemstillinger og forslag til løsninger for å finne faktisk oversvømt land er vist. Det er valgt ut tre magasin for beregning av klimagassutslipp med den empiriske modellen G-res tool. Resultatene fra beregningen er forsøkt oppskalert til alt oversvømt land i Norge etter litt ulike metoder. De overslagsmessige resultatene viser at sannsynlige årlige utslipp fra oversvømt land ligger mellom 100 000 og 200 000 tonn CO₂-eq i gjennomsnitt per år. Dette er usikre tall som må betraktes som et første overslag. Notatet foreslår også videre arbeid som bør inkludere målinger av utslipp i flere magasin, mer detaljerte beregninger av oversvømt land, analyser i flere magasin med modellen G-res tool og tilordning av utslipp til enkeltår.

UTARBEIDET AV

Atle Harby

SIGNATUR

GODKJENT AV

Håkon Sundt

SIGNATUR

Håkon Sundt (Feb 11, 2022 10:04 GMT+1)

PROSJEKTNOTAT NR

AN 22.12.05

GRADERING

Åpen





Innledning

IPCC har laget nye retningslinjer for nasjonal rapportering av klimagassutslipp fra oversvømt land, "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" (IPCC 2019). Når de nye retningslinjene tas i bruk, vil det være viktig for Norge å rapportere de faktiske utslipp fra oversvømt land ("flooded land"). Oversvømt land omfatter norske vannkraftmagasiner og eventuelt andre menneskeskaptede reservoarer eller magasiner.

Miljødirektoratet har bedt SINTEF Energi om å beskrive hvor stort areal oversvømt land som finnes i Norge, å foreslå metoder for å beregne utslipp fra disse samt å gjøre en første beregning av klimagassutslipp fra noen utvalgte magasiner og oppskalere disse til hele Norge. Dette skal gjøres som en overslagsstudie med rom for forbedringer. Arbeidet rapporteres i dette notatet.

Notatet er utarbeidet av Atle Harby og Mauro Carolli. Atle Harby har jobbet med måling, beregning og analyser av klimagassutslipp fra vannkraftmagasiner i 15 år, og er godt kjent med IPCC sine retningslinjer da han er en av forfatterne bak disse. IPCCs retningslinjer brukte den empiriske modellen G-res tool (Prairie et al 2021) for å beregne standardverdier av utslipp fra magasiner. Denne modellen er også i bruk som et "screening tool" for nye vannkraftprosjekter. Atle Harby kjenner også G-res tool godt, da han har deltatt i arbeidet med å utvikle modellen. Vi retter en stor takk til Martin Dorber for å ha delt data, algoritme og metodikk for beregning av oversvømt land med oss.

Nesten alt oversvømt land i Norge over en viss størrelse er knyttet til vannkraftmagasiner. I dette notatet inkluderer vi ikke mindre oversvømt land som bassenger og dammer for drikkevannsforsyning, landbruk, industri eller andre typer av oversvømt land uten vannkraft. Det finnes ingen fullstendig oversikt over andre magasin enn vannkraftmagasiner. Notatet gir derfor først en oversikt over klimagassutslipp fra vannkraftmagasiner. Notatet tar videre opp hvor stort oversvømt areal som finnes i Norge, og diskuterer hvordan man kan finne dette. Notatet viser deretter utvalgte alternative overslagsmessige måter å beregne klimagassutslipp fra oversvømt land på. Til slutt diskuteres hvordan oppskalering til alt oversvømt land kan gjøres, og videre arbeid foreslås.

Målsetting

Prosjektet skal beregne hvor stort areal av oversvømt land (av IPCC definert som "Flooded land") som finnes i Norge. IPCC krever at alle vannkraftmagasiner inkluderes med vanddekt areal på HRV (høyeste regulerte vannstand), der arealet før oppdemming skal trekkes fra. Tre magasin velges ut for videre analyser, der man tar hensyn til geografisk beliggenhet, høyde over havet, forhold i nedbørfeltet, størrelse, dybde og hvordan magasinet drives. Videre analyser gjøres med G-res tool. Data for bruk i G-res tool hentes fra NVEs databaser og eventuelt kontakt med kraftselskap. Sammen med resultater fra tidligere studier, vil dette gi et grunnlag for oppskalering til et første estimat på samlede klimagassutslipp fra oversvømt land i Norge. Prosjektet vil også foreslå videre arbeid.

Klimagassutslipp fra vannkraftmagasiner

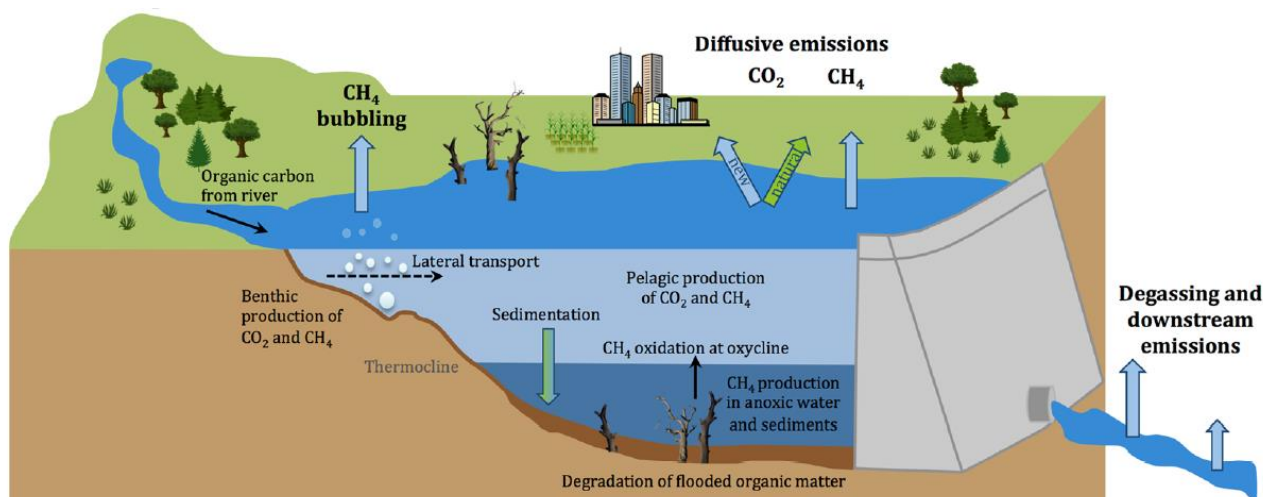
Klimagassutslipp fra bygging og drift av vannkraftanlegg og utslipp forbundet med produksjon av utstyr, komponenter og byggverk kan kvantifiseres gjennom livsløpsanalyser og bruk av databaser eller måledata slik det også gjøres for de fleste andre typer bygg og infrastruktur. Hovedutfordringen for vannkraft er imidlertid mulige klimagassutslipp fra magasiner, inkludert mulige nedstrøms utslipp forårsaket av magasinet. Det er kun utslipp fra magasiner som belyses i dette notatet.



Organisk materiale som er tilført fra nedbørfeltet eller gjennom prosesser i magasinet, brytes ned og slippes tilbake til atmosfæren som CO₂. Dette er en del av den naturlige karboncyklusen, og slike utslipp ville ha skjedd et annet sted i systemet hvis magasinet ikke var der. Noe ekstra CO₂ kan slippes ut når nye områder settes under vann ved mobilisering av karbonkilder lagret i jordsmonnet. Det er også mulig at netto effekt av neddemming kan redusere utslipp dersom området før neddemming var en vesentlig karbonkilde som for eksempel rismarker. Se Figur 1 som illustrerer ulike prosesser og utslipp fra magasiner.

Dersom nedbryting av organisk materiale skjer i anoksiske miljø (mangel på oksygen), blir det organiske materialet brutt ned til metan (CH₄) i stedet for CO₂. Mange magasin og naturlige innsjøer har anoksiske forhold i sedimentene og i områder nært bunnen som vil gi metanproduksjon. Metan kan lett omdannes til CO₂ hvis den passerer gjennom om lag 10 m med oksygenrikt vann. Dette betyr at det er mer sannsynlig at grunne områder med stillestående vann produserer metan, noen ganger også i form av såkalt bobling. Når inntak for vannkraftverk er lokalisert i en anoksiske sone i magasinet, er det mulig at metan trekkes gjennom turbinene og slippes ut til atmosfæren nedstrøms kraftverket.

Mange studier hevder å vise at vannkraft har betydelig klimagassutslipp, hovedsakelig på grunn av utslipp fra magasiner og såkalt avgassing nedstrøms magasiner. Imidlertid tar mange studier ikke hensyn til netto utslipp fra magasinet der naturlige utslipp skal trekkes fra. Med naturlige utslipp menes utslipp som også ville funnet sted uten magasinet. Annen menneskeskapt aktivitet kan forårsake utslipp, for eksempel industri, landbruk eller husholdninger oppstrøms eller direkte knyttet til magasinet. Mange magasin brukes også til mer enn vannkraft, slik at utslipp bør fordeles på flere aktører. Disse faktorene bør tas i betraktning ved evaluering av klimagassutslipp fra vannkraft. Beregningsmetoder som fokuserer på hva atmosfæren "ser" (Prairie 2017a) og som gir mulighet til å trekke fra utslipp som ellers ville ha funnet sted (IPCC 2019) er nå anerkjent og brukes blant annet i verktøyet G-res Tool (Prairie 2021, Prairie 2017b, IHA 2021).



Figur 1. Prosesser og utslippveier for klimagasser i magasin (fra Prairie et al 2017a).

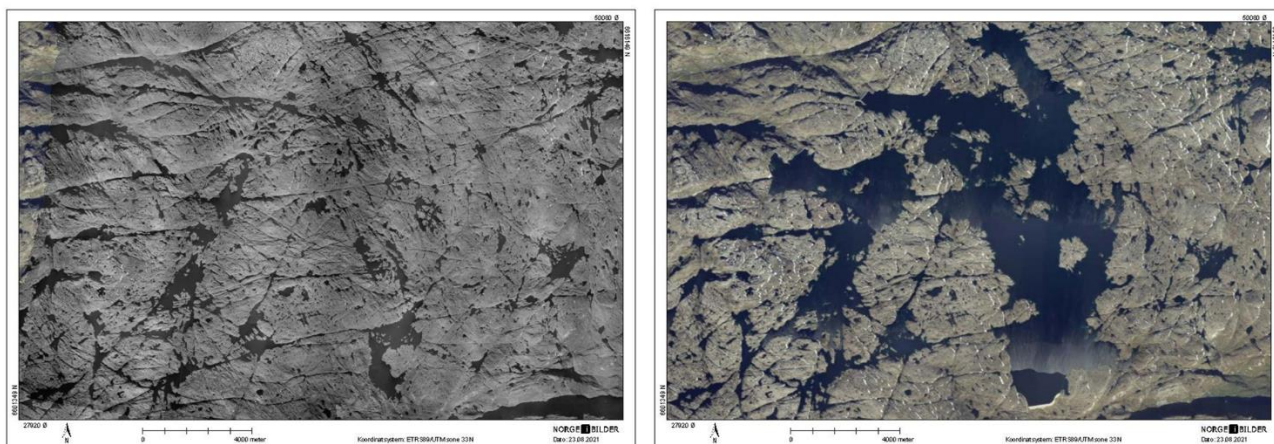
Flere studier forsøker å anslå samlede klimagassutslipp fra vannkraft, men det er stor spredning i resultater (Barros 2011; Bastviken 2011; Deemer 2016; Hertwich, 2013; St. Louis 2000; Rosentreter 2021). Nye studier av IHA (2018) estimerer globale utslipp til 18,5g CO₂-eq/kWh fra vannkraft, mens Harrison I (2021) mener nyere beregninger viser at globale utslipp er 29 prosent høyere enn tidligere antatt. For norsk vannkraft er klimagassutslipp estimert til 3,33 g CO₂-eq/kWh, der 2,11g CO₂-eq/kWh knyttes til utslipp fra



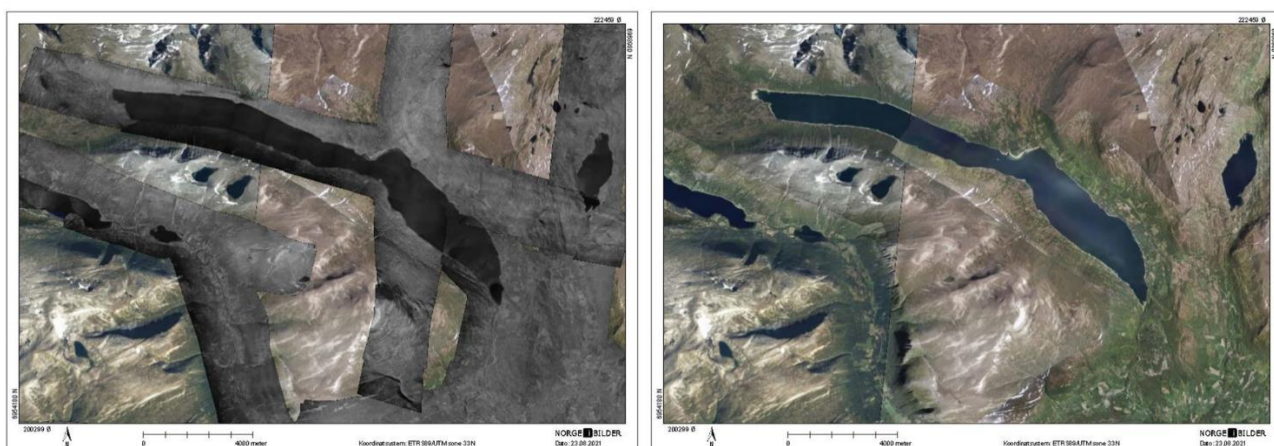
magasiner (Silva and Modahl 2019). Beregningene fra Silva and Modahl (2019) bygger blant annet på SINTEFs hittil upubliserte målinger i Follsjø magasin.

Hvordan definere oversvømt land

Det er ikke helt enkelt å definere hva som er oversvømt land i Norge. Mange vannkraftmagasiner var opprinnelig en eller flere innsjøer før de ble tatt i bruk som magasin. Noen magasin er bare litt større enn de var som innsjø, og har da bare oversvømt en liten del av innsjøens omkringliggende areal. Andre magasin var bare en elv før de ble oversvømt, og hele arealet unntatt elva må da regnes som oversvømt land. Det finnes også en del innsjøer som er tatt i bruk som *senkningsmagasin*, dvs. at vannstanden kan tappes ned gjennom regulering slik at arealet aldri blir større enn opprinnelig innsjø. Vi kaller neddemmet areal eller oversvømt land for netto areal, mens hele magasinets areal kalles brutto areal. Figur 2 viser at området som i dag er oversvømt av Blåsjø besto av noen små innsjøer og en god del landområder som nå er oversvømt. Blåsjø har dermed et stort både brutto og netto areal. Figur 3 viser et eksempel på et senkningsmagasin før og etter vannkraftutbygging. På bildet til høyre i figur 3 skimter man en nedtappingszone rundt vannkanten. Figur 4 viser et kunstig magasin der man kan se opprinnelig elveløp.



Figur 2. Blåsjøområdet fra 1957 før vannkraftutbygging til venstre, og dagens Blåsjø til høyre (fra norgebilder.no).



Figur 3. Gjevilvatnet senkningsmagasin før utbygging til venstre og etter utbygging til høyre. Det er mulig å skimte en reguleringszone langs breddene til høyre. (fra norgebilder.no)



Figur 4. Gråsjø magasin nedtappet for vedlikehold av dammen sommeren 2021. Det er mulig å se hvor opprinnelig elv rant. (foto Atle Harby).

I IPCC-rapporten "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" defineres "flooded land" som følgende:

"Flooded Lands are defined in the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Wetlands) as water bodies where human activities have caused changes in the amount of surface area covered by water, typically through water level regulation. Here, we also consider: i) waterbodies where human activities have changed the hydrology of existing natural waterbodies thereby altering water residence times and/or sedimentation rates, in turn causing changes to the natural flux of greenhouse gases, and ii) waterbodies that have been created by excavation, such as canals, ditches and ponds. Flooded Lands include waterbodies with seasonally variable degrees of inundation, but would be expected to retain some inundated area throughout the year under normal conditions."

Denne definisjonen betyr at både magasin som er laget ved neddemming av land og såkalte senkningsmagasin som ikke har økt arealet til tidligere innsjø, i utgangspunktet skal regnes med. Det er ulike regler for metan og CO₂, noe som henger sammen med at det kan forekomme metanutslipp fra vannkraftmagasiner i hele dets levetid, mens CO₂-utslipp som skyldes menneskelig aktivitet stort sett bare foregår i de første årene etter etablering av et magasin. IPCC definerer 20 år som skillet mellom nye og eldre magasin, hvor nye magasin defineres som "Land Converted to Flooded Land" og eldre magasin som "Flooded Land Remaining Flooded Land".



Ifølge IPCC skal metanutslipp regnes for hele arealet (brutto areal) av magasinet for både nye og eldre magasin. For CO₂-utslipp, skal man bare regne utslipp for magasin yngre enn 20 år. I magasin eldre enn 20 år antas alle CO₂-utslipp som en del av den naturlige karbonsyklusen, og skal ikke tas med i utslippsberegninger.

IPCC tillater to metoder for beregning av klimagassutslipp fra oversvømt land, som åpner for å bruke enten brutto eller netto areal av vannkraftmagasin. Det er også tillatt å trekke fra utslipp som ikke skyldes neddemming av land, noe som vil gi netto utslipp. Med netto utslipp har man da først bare regnet med utslipp fra netto areal, og så i tillegg trukket fra utslipp som stammer fra annen aktivitet som for eksempel jordbruk, skogsdrift, industri eller urbane områder. Dette vil også hindre dobbelt-telling, da for eksempel landbruksvirksomhet i nedbørfeltet allerede må rapportere sine utslipp. Vi anbefaler sterkt å benytte netto-metoden, da dette gir et mer korrekt bilde av menneskeskapt utslipp.

Areal av oversvømt land

NVE har samlet mye informasjon om vannkraft og vannkraftmagasiner i sine databaser. NVE oppgir arealet av vannkraftmagasiner i kategorien "InnsjøRegulert" til 7 118 km². Dette inkluderer i alt 1 478 regulerte innsjøer (magasiner). Store innsjøer som Enaresjøen i Finland, Mjøsa, Randsfjorden og Holsfjorden (Tyrifjorden) er også inkludert. De har alle en veldig liten regulering og svært lite oversvømt land. Vi har forsøkt å utelate enkelte magasin fra totalt areal på litt ulike metoder:

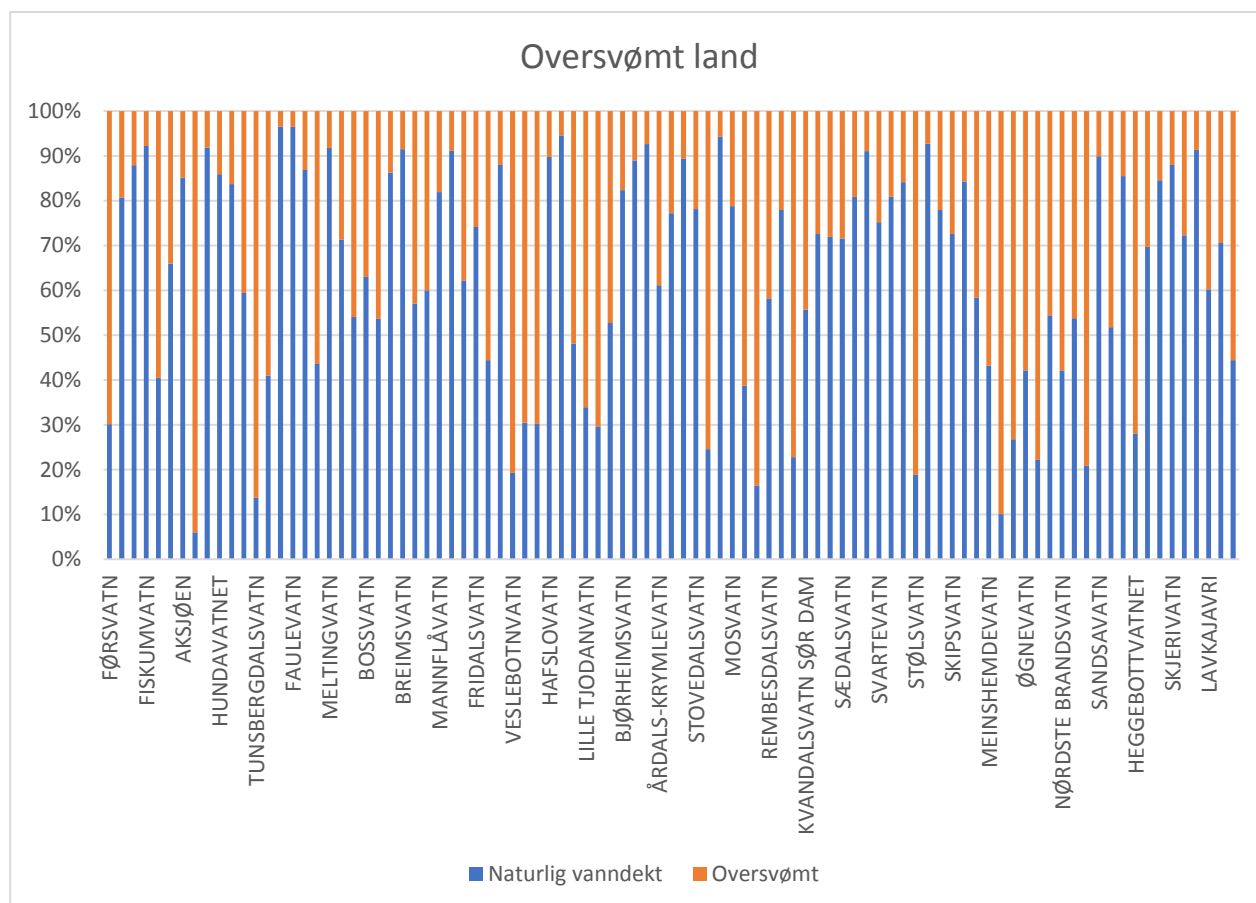
- a) 6 026 km² om vi utelater Enaresjøen i Finland. Dette er åpenbart, da Enaresjøen ligger utenfor Norge selv om den bidrar som reguleringsmagasin til norske og russiske kraftverk i Pasvikelva.
- b) 5 373 km² om vi utelater Enaresjøen, Mjøsa, Randsfjorden og Holsfjorden (Tyrifjorden). Disse store innsjøene har nesten ikke noe oversvømt land i forhold til naturtilstanden. Det er også mulig at flere av disse har mindre areal enn de ville hatt naturlig under flom, nettopp fordi de er regulert.
- c) 4 722 km² om vi utelater alle magasin med reguleringshøyde under 2 meter i tillegg til b). Vi regner da med at disse oversvømmer neglisjerbare landområder.

I artikkelen "Modeling Net Land Occupation of Hydropower Reservoirs in Norway for Use in Life Cycle Assessment" har Dorber (2018) beregnet oversvømt land fra norsk vannkraft ved hjelp av satellittbilder fra Landsat og fra "Norge i bilder". Piksler i bilder fra før magasin ble etablert ble klassifisert som vanddekt eller ikke ved hjelp av maskinlæringsteknikk med "*maximum likelihood algorithms*" der et treningsdatasett først ble brukt. På denne måten ble vanddekt areal før etablering av magasiner bestemt. Teoretisk kan denne metoden anvendes på bilder tilbake til 1937 fra Norge i bilder. En begrensning for metoden er bilder som er dekt av snø og is eller skyer.

Vi brukte en variant av denne metoden for å teste analysing av historiske bilder. Vi brukte først maskinlæringsmetoden "random forest" for å trene opp modellen til å klassifisere piksler som vann eller land i Google Earth Engine (Gorelick 2017). Deretter testet vi metoden på mange satellittbilder fra Sentinel 2 med tilstrekkelig liten dekning av snø, is og skyer. Denne metoden viste seg godt egnet til å identifisere hva som ikke var vanddekt areal, og kan dermed brukes til å finne hva som har blitt oversvømt land. Ved bruk av mange bilder reduseres usikkerheten. Metoden vil også fungere på satellittbilder fra Landsat som går lengre tilbake i tid, men har dårligere romlig oppløsning. Det vil da være mulig å finne oversvømt land for de fleste norske magasin med Norge i bilder, Landsat-data eller eventuelt egne flybilder som regulantene kanskje besitter, dersom det ikke er gjort egne undersøkelser før neddemming av hva som ble oversvømt. Figur 5 viser forholdsvis fordeling mellom naturlig vanddekt areal og oversvømt land fra



magasin i Dorber (2018) sin analyse. Vi ser at andelen oversvømt land kan variere stort fra magasin til magasin.



Figur 5. Fordeling mellom naturlig vanndekt areal og oversvømt land i del norske vannkraftmagasin (data fra Dorber 2018).

Gjennomsnittlig forholdstall mellom oversvømt land og naturlig vanndekt areal er 36 prosent, med en medianverdi på 29 prosent for alle magasin i Dorber et al (2018) sin studie. Dersom vi antar at forholdstallet mellom totalt areal og oversvømt land fra Dorber et al (2018), er tilsvarende for alle norske magasin, kan vi regne oversvømt land til 2 169 km². Ettersom Dorber et al (2018) har med magasin som har alt mellom 4 og 94 prosent oversvømt land, har vi derfor beregnet dette kun uten Enaresjøen i Finland, men inkludert Mjøsa, Randsfjorden og Holsfjorden (Tyrifjorden), samt alle magasin med reguleringshøyde under 2 meter.

Overlagsmessig beregning av klimagassutslipp fra oversvømt land

Silva and Modahl (2019) estimerer klimagassutslipp fra norsk vannkraft til 3,33 g CO₂-eq./kWh der 2,11 g CO₂-eq./kWh kan tilordnes magasinutslipp. Oppskalert til all norsk vannkraftproduksjon som ifølge NVE er på 136,6 TWh pr år i gjennomsnitt, gir dette et årlig utslipp på 288 000 tonn CO₂-eq. Denne metoden å beregne totale utslipp på har ingen direkte forankring til areal av oversvømt land eller magasin. Beregningen forutsetter at forholdene mellom oversvømt land og magasinkarakteristika for Follsjø og



kraftproduksjonen i Trollheim kraftverk er representativt for andre magasin og kraftverk i Norge. Dette er ganske sikkert ikke tilfelle, og en slik beregning er det ikke mulig å feste stor tiltro til.

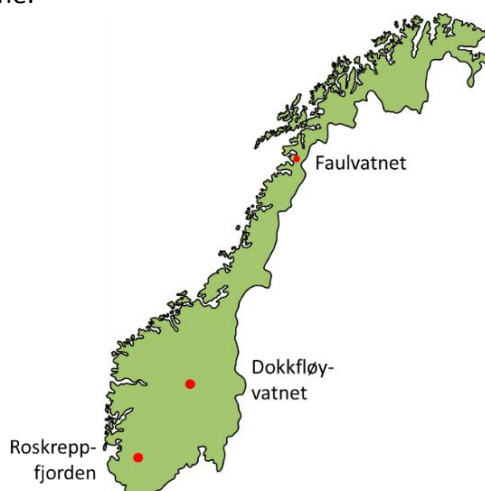
SINTEF Energi har målt klimagassutslipp fra Follsjø magasin i fem år (Harby et al 2006), der netto utslipp er beregnet til 1,577 tonn CO₂-eq. per år. Follsjøen er et helt kunstig magasin som tidligere bare var en elv, og vi kan regne hele arealet som oversvømt. Follsjø er i dag langt over 20 år gammelt, og det er bare metanutslipp som bør regnes med. Et gjennomsnitt av alle målte metanutslipp fra Follsjø er 0,52 g CH₄/m²/y. Med et "Global Warming Potential" (GWP) på 32, gir dette om lag 17 g CO₂-eq./m² per år. Hvis vi regner om utslipp per kWh til utslipp per m², blir det 100 g CO₂-eq./m² per år.

Dersom vi multipliserer disse tallene med areal av oversvømt land, gir dette mellom 80 000 og 605 000 tonn CO₂-eq. per år hvis vi ikke tar med Enaresjøen. Hvis vi i tillegg ikke tar med Mjøsa, Randsfjorden og Holsfjorden (Tyrifjorden) eller magasin med under 2m reguleringszone som oversvømt areal, blir utslipp mellom 80 000 og 480 000 tonn CO₂-eq. per år. Hvis vi bruker forholdstallet mellom totalt areal og oversvømt areal fra Dorber (2018), blir årlige utslipp mellom 36 000 og 218 000 tonn CO₂-eq. per år.

Beregningene over inkluderer ikke magasin yngre enn 20 år, noe som vil gi et tillegg i utslipp fra CO₂. Det er trolig få magasin som er satt i drift etter 2001. Det kan ellers diskuteres om vi bør inkludere brutto areal i beregningene, da menneskeskapt metanutslipp som følge av neddemming kan forekomme fra hele magasinet uavhengig av hvor mye areal som har blitt oversvømt. Dette betyr at minste verdi på 36 000 tonn CO₂-eq. per år er lite sannsynlig et korrekt estimat. Disse beregningene er koblet til oversvømt land, men som oppskalering forutsetter de da at Follsjø magasin er representativ for all norsk oversvømt land. Det er imidlertid veldig stort sprik mellom resultatene fra en slik overslagsberegning.

Beregning av utslipp fra tre magasin med G-res tool

Tre magasin som representerer litt ulike forhold, ble valgt ut for analyser med G-res tool. Det er ikke gjort en grundig analyse for å finne representative magasin, men det er valgt ut magasin i forskjellige deler av landet i ulike høyder med ulikt klima og forhold i nedbørfeltet, ulik reguleringshøyde, størrelse og driftsmønster. Roskreppfjorden, Dokkfløymagasinet og Faulvatnet ble valgt ut for analysene (Figur 6). Tabell 1 viser noen karakteristiske forhold og inngangsdata, mens tabell 2 viser resultater fra analyser med G-res tool for de valgte magasinene.



Figur 6. Plassering av tre magasin for beregninger med G-res tool.



Tabell 1. Karakteristika for tre utvalgte magasin

	Benevning	Roskrepp	Dokkfløy	Faulvatnet
Nedbørfelt areal	km ²	281	602	77
Befolkning i nedbørfelt ¹	antall	0	0	0
Årlig avrenning	mm/år	2104	705	1783
Arealbruk i nedbørfelt				
Bare områder	%	36,2 %	15,5 %	64,5 %
Dyrket mark	%	0,0 %	0,3 %	0,0 %
Skog	%	0,0 %	30,8 %	7,7 %
Gress, lyng, hei	%	46,1 %	22,3 %	7,3 %
Permanent snø og is	%	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Bosetting	%	0,0 %	0,4 %	0,0 %
Vann (elv, innsjø)	%	17,5 %	3,8 %	20,5 %
Våtmarker	%	0,1 %	26,9 %	0,0 %
Arealbruk i magasin før neddemming ²				
Bare områder	%	18,0 %	0,0 %	1,5 %
Dyrket mark	%	0,0 %	5,0 %	0,0 %
Skog	%	2,0 %	52,0 %	0,0 %
Gress, lyng, hei	%	30,0 %	22,2 %	1,5 %
Permanent snø og is	%	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Bosetting	%	0,0 %	3,0 %	0,0 %
Vann (elv, innsjø)	%	50,0 %	5,8 %	97,0 %
Våtmarker	%	0,0 %	12,0 %	0,0 %
Magasindata				
Årstall satt i drift	år	1968	1989	1999
Areal	km ²	29,8	9,4	7,3
Volum	km ²	0,695	0,250	0,026
Vannstand HRV	m.o.h.	929	735	317,5
Maksimal dybde ³	m	80	83,5	0
Årlig vannføring	m ³ /s	70	38	11
Reguleringshøyde	m	49	65	3,5

¹⁾ Befolkning er satt lik null da selv en liten befolkning vil ha lite å si

²⁾ Arealbruk i magasin før neddemming er noe skjønsmessig bestemt siden det finnes lite tilgjengelig informasjon

³⁾ Maksimal dybde er antatt ut fra tilgjengelig informasjon



Tabell 2. Resultater fra G-res tool for tre utvalgte magasin

	Areal [km ²]	Høyde [moh]	Brutto totalt [gCO ₂ eq/m ² /y]	Før oversvømt [gCO ₂ eq/m ² /y]	Netto totalt [gCO ₂ eq/m ² /y]	Metan [gCO ₂ eq/m ² /y]
Roskreppfjorden	29,75	929	20	15	5	13
Dokkfløyvannet	9,42	735	21	-22	43	20
Faulvatnet	7,26	317,5	43	28	15	15
Gjennomsnitt	15,48	660	28	7	21	16

Resultatene fra G-res tool på årlig utslipp per areal i de tre magasinene blir relativt like, selv om forholdene i magasinene varierer. Det er også interessant å observere at et rent uvektet gjennomsnitt av de tre magasinene gir et metanutslipp på 16 g CO₂-eq./m² per år fra G-res tool som er nesten identisk med et gjennomsnitt av metanmålingene fra Follsjøen på 17 CO₂-eq./m² per år.

Oppskalering til oversvømt land i Norge

Vi har samlet resultater fra de ulike beregningsmåtene for oppskalering til oversvømt land i Norge i tabell 4. I tabellen representerer "minste verdi" en kombinasjon av beregningsmetode og et lavt estimat for areal av oversvømt land. Vi har forsøkt å estimere en sannsynlig verdi ut fra dette, men vi understreker at det er stor usikkerhet knyttet til tallene.

Vi har også forsøkt å vekte resultatene fra G-res ved å anta at de tre magasinene er representative for et visst antall magasin i Norge. Vi har derfor vektet resultatene etter følgende faktorer: landsdel (areal i hver landsdel), totalt areal, høyde over havet og reguleringshøyde. Tabell 3 viser hvordan vektingen etter ulike faktorer faller ut.

Tabell 3. Vekting av resultater fra G-res tool etter ulike metoder

Faktor	Inndeling	Roskrepp	Dokkfløy	Faulvatnet
Areal i landsdel	Roskrepp = Sørlandet og Vestlandet; Dokkfløy = Østlandet og Midt-Norge; Faulvatnet = Nord-Norge	0,35	0,43	0,21
Areal-fordeling	Faulvatnet for < 8 km ² ; Dokkfløy for mellom 8 og 16 km ² ; Roskrepp for > 16 km ²	0,50	0,15	0,35
Høyde over havet	Faulvatnet for < 400 moh; Dokkfløy for mellom 400 og 800 moh; Roskrepp for > 800 moh	0,28	0,32	0,40
Reguleringshøyde	Faulvatnet for < 6 m; Roskrepp for mellom 6 og 800 moh; for > 800 moh	0,54	0,14	0,33

Tabell 3 viser at vektingen ikke forandrer seg veldig mye avhengig av de ulike måtene å vekte på. Dette kan ha sammenheng med det begrensede antallet magasin brukt i G-res tool-beregningene. Dette medfører også at resultatene i figur 4 ikke viser så stor spredning i overslagene over totale utslipp etter litt ulike metoder for oppskalering fra G-res tool. Overslag basert på målinger fra Follsjø gir et større spenn i utslipp, men vår beste antakelse faller i samme størrelsesorden som overslag basert på G-res tool. Overslagene basert på oppskalering av utslipp pr kWh eller fra global gjennomsnittsverdi er tatt med i tabell 4 for å vise at disse gir helt andre resultater. Som en foreløpig konklusjon antar vi at samlet utslipp fra oversvømt land i Norge befinner seg i størrelsesorden mellom 100 000 og 200 000 tonn CO₂-eq. per år.



Tabell 4. Resultater fra overslagsberegning av klimagassutslipp fra oversvømt land

Metode	Minste verdi tonn CO ₂ -eq. per år	Høyeste verdi tonn CO ₂ -eq. per år	Beste antagelse tonn CO ₂ -eq. per år
Overslag basert på Trollheim kraftverk pr kWh			288 000
Overslag basert på målinger i Follsjø magasin	79 988	605 290	101 007
Overslag fra gjennomsnitt av 3 G-res Tool analyser	100 212	126 546	112 833
Overslag fra brutto utslipp med G-res Tool	133 616	168 728	150 444
Vektet overslag G-res Tool – landsdel	112 417	141 958	126 575
Vektet overslag G-res Tool – arealfordeling	66 974	84 574	84 574
Vektet overslag G-res Tool – høyde over havet	101 411	128 060	114 183
Vektet overslag G-res Tool – regulerings høyde	64 349	81 259	72 453
Overslag basert på globalt middel for vannkraft			2 527 100

Diskusjon

Det er mange usikkerheter rundt beregning av utslipp av klimagasser fra oversvømt land. Usikkerheten er både knyttet til å finne ut hva som skal inkluderes som oversvømt land, og å estimere utslipp fra det som defineres som oversvømt land. Videre er det en del forhold som kan tolkes ulikt og som avhengig av detaljeringsgrad kan gi ulike svar. Vi skal ikke her belyse slike forhold grundig, men vi nevner momenter som bør diskuteres nærmere:

- Det er enklere å finne brutto areal enn netto areal. Med brutto areal menes totalt areal av alle naturlige og kunstige innsjøer som brukes til vannkraft. Det er imidlertid vitenskapelig enighet om at det er riktig å bruke netto areal, dvs. kun det arealet som er oversvømt. Vår studie har vist at det er mulig å finne netto areal ut fra satellittbilder og norgebilder.no i mange tilfeller.
- Selv om det anbefales å bruke netto areal, bør egentlig metanutslipp regnes fra brutto areal. Dette henger sammen med at metan produseres når det blir liten sirkulasjon i vannmassene og påfølgende oksygenmangel i og nær bunnen. Når vi likevel ikke har gjort dette for beregninger her, henger det sammen med at for norske forhold mener vi at det ikke vil produseres metan i deler av et magasin som også var vanddekt for oppdemming.
- Forskning viser at menneskeskapte CO₂-utslipp bare finner sted i de første årene etter neddemming. Dette henger sammen med utslipp knyttet til at organisk materiale settes under vann, og mobilisering av organisk materiale i jordsmonnet som settes under vann. Etter de første årene vil CO₂-utslippene bare være naturlige utslipp som uansett ville funnet sted. IPCC estimerer at CO₂-utslipp bare finner sted de første 20 årene etter neddemming. I de fleste tilfeller hender dette før de første 20 årene. Dette vil gi noen rare utslag akkurat når et magasin passerer 20-års aldersgrense, men i en nasjonal rapportering vil det trolig gi et veldig lite utslag.
- I Norge finnes det en del såkalte senkningsmagasin, der reguleringen fører til et mindre vanddekt areal når vannstanden senkes. Slike magasin har ikke noe oversvømt land, men de vil likevel kunne få endret status i forhold til klimagassutslipp. Det er fortsatt stor usikkerhet knyttet til hvordan klimagassregnskapet ser ut for den såkalte nedtappingssonen, altså arealet som tørrlegges når vannstanden senkes. I enkelte land vil det kunne vokse vegetasjon i denne sonen som kan føre til både opptak og utslipp av klimagasser. Dette er trolig et fenomen som i liten grad gjelder norske forhold, da de fleste senkningsmagasin tappes ned om vinteren og våren, og fylles opp av snøsmelting og nedbør



om våren og sommeren. Vi anbefaler derfor å se bort fra denne sonen og kun regne med eventuelle metanutslipp fra senkningsmagasin.

- G-res tool kan gir i dag ikke resultater for enkeltår, men en gjennomsnittsverdi for et år beregnet ut fra 100 år med utslipp. Det jobbes imidlertid med å gjøre resultater tilgjengelig for hvert enkelt år i G-res tool. Når dette er klart, vil det være mulig å beregne utslipp for alle enkeltår. Fram til dette er klart, anbefaler vi å fordele utslipp på enkeltår etter formelverket som brukes for dette i Prairie (2021).
- Vi har ikke gjort en omfattende jobb for å finne grunnlagsdata for å bruke G-res tool i magasin som det ikke enkelt finnes informasjon om arealbruk av oversvømt land. For Roskrepfjorden og Dokkfløymagasinet er dette estimert.
- Oppskalering av resultater fra enkelte magasin er gjort etter fire ulike litt grove metoder. Denne oppskaleringen kan trolig gjøres mer detaljert. Den viktigste forbedringen vil være å bruke flere magasin som representative for de ulike forholdene i Norge.

Forslag til videre arbeid

Det klart viktigste som kan gjøres for å få bedre og sikrere data for å beregne utslipp fra oversvømt land i Norge, er å gjennomføre målinger av utslipp i flere magasin som til sammen vil gi et representativt bilde av forholdene i Norge. Slike målinger kan også brukes til å verifisere beregninger med G-res tool eller andre metoder.

Vi anbefaler å jobbe mer med å finne faktisk oversvømt land. Vi har skissert noen metoder med bruk av bilder fra www.norgebilder.no og satellitter som kan brukes. Det er også helt sikkert mulig å finne eldre kart og annen informasjon hos myndigheter, kommuner og kraftselskap om forholdene før magasin ble etablert.

Vi anbefaler også å velge ut flere magasin for beregning av utslipp med G-res tool, noe som vil styrke grunnlaget for oppskalering. For hvert enkelt magasin kan det undersøkes mer for å få sikrere inngangsdata. Videre anbefaler vi å gjennomføre noen sensitivitetsanalyser der man varierer inngangsdata litt i G-res tool. Resultatene fra sensitivitetsanalyser vil vise hvilke inngangsdata det er viktig å ha, og hvilke inngangsdata som ikke påvirker resultatene mye selv om de er usikre. Dette vil også bidra til å avgrense jobben med å finne nøyaktige inngangsdata, da det kan være tilstrekkelig å tillate større usikkerhet i noen typer data.

For utslippsrapportering er det viktig å kunne beregne utslipp for enkeltår. Det bør utvikles gode rutiner for å tilordne utslipp for enkeltår både tilbake og framover i tid.

EUs taksonomi for bærekraftige investeringer og aktiviteter setter krav til rapportering av klimagassutslipp for vannkraft. Aktører i vannkraftbransjen har derfor et behov for å dokumentere utslipp fra sine magasin. Det anbefales derfor et samarbeid og informasjonsutveksling med vannkraftbransjen.

Referanser

Barros, N., Cole, J. J., Tranvik, L. J., Prairie, Y. T., Bastviken, D., Huszar, V. L. M., et al. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature*.

Bastviken, D., Tranvik, L. J., Downing, J. A., Crill, P. M., & Enrich-Prast, A. 2011. Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1196808>.



Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., Delsontro, T., Barros, N., et al. 2016. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. *BioScience*.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*.

Harby, A., Brakstad, O.G. and Sundt, H. 2006. Greenhouse gas (GHG) emissions from hydropower reservoirs. Net emission rates calculated for Follsjø reservoir. SINTEF project memo 060124AHAR144823.

Harrison, J. A., Prairie, Y. T., Mercier-Blais, S., & Soued, C. (2021). Year-2020 global distribution and pathways of reservoir methane and carbon dioxide emissions according to the greenhouse gas from reservoirs (G-res) model. *Global Biogeochemical Cycles*, 35, e2020GB006888.
<https://doi.org/10.1029/2020GB006888>

Hertwich, E. G. (2013). Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA. *Environmental Science and Technology*, 47(17), 9604–9611.

IHA: <https://g-res.hydropower.org/> (2021)

IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.

Prairie, Y.T., Mercier-Blais, S., Harrison, J., Soued, C., del Giorgio, P., Harby, A., Alm, J., Chanudet, V. and Nahas, R. 2021. A new modelling framework to assess biogenic GHG emissions from reservoirs: The G-res tool. *Environmental Modelling and Software*. 143:105117

Prairie, Y., Alm, J., Beaulieu, J., Barros, N., Battin, T., Cole, J., del Giorgio, P., DelSontro, T., Guérin, F., Harby, A., Harrison, J., Mercier-Blais, S., Serça, D., Sobek, S. & Vachon, D. (2017a). Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs: What Does the Atmosphere See? *Ecosystems*.

Prairie, Y., Alm, J., Harby, A., Mercier-Blais, S. & Nahas, R. (2017b). The GHG Reservoir Tool (G-res) Technical documentation, UNESCO/IHA research project on the GHG status of freshwater reservoirs. Version 1.12. In: p. 76

Rosentreter, J. A., Borges, A. V., Deemer, B. R., Holgerson, M. A., Liu, S., Song, C., et al. 2021. Aquatic ecosystems are highly variable sources contributing half of the global methane emissions. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/https://doi.org.10.1038/241561-021-00715-2>

Silva, M. and Modahl, I.S. 2019. The inventory and life cycle data for Norwegian hydroelectricity. AR 01.19 Open memo, Østfoldforskning.

St. Louis, V. L., Kelly, C. a., Duchemin, É., Rudd, J. W. M., & Rosenberg, D. M. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *BioScience*, 50(9), 766–775.