

Oppdaterte vektfaktorer for BC og OC

M-1620|2020

Kort rapport skrevet av CICERO Senter for klimaforskning på oppdrag av Miljødirektoratet

Dato: 9. oktober, 2015

Forfattere: Borgar Aamaas, Øivind Hodnebrog, Bjørn H. Samset, Jan S. Fuglestad, Gunnar Myhre, Terje K. Berntsen



1. Sammendrag

En ny vurdering er gjort av vektfaktorene for klimaeffekten av utslipp av aerosolene sot (BC) og OC. Vi har tatt hensyn til ny kunnskap om den semidirekte effekten for BC. Alle andre vektfactorer er beholdt. Dette reduserer den totale GTP10-vektfaktoren for BC med 7 % til 2700. I tillegg viser vi nye GTP10-verdier utregnet for europeiske utslipp. Vi oppsummerer kort utviklingen i forskningen de siste to år, og viser at kunnskapsutviklingen for både den semidirekte effekten og den atmosfæriske levetiden til BC og OC vil kunne være betydelig fremover.

2. Definisjoner

Utslipp av BC og OC påvirker klimaet via ulike prosesser eller effekter, både direkte og indirekte.

- Direkte effekt/direkte aerosoleffekt: Når solinnstråling treffer aerosoler, blir strålingen spredt eller absorbert. Absorpsjon fører til en oppvarming, spredning til avkjøling.
- Albedoeffekt: Aerosoler vil avsettes på overflater, blant annet i snø og is. Svarte BC-partikler vil gjøre hvite snø- og isoverflater gråere. Mer solinnstråling vil absorberes av en gråere overflate og albedoen reduseres. Dette fører til oppvarming.
- Første indirekte effekt: Kan også kalles skyalbedoeffekt. I en sky tilført ekstra aerosoler vil det være flere partikler som kjemper om det samme vannet. Det vil føre til flere skypartikler, men hver enkelt vil være mindre. En sky med mange, små dråper er lysere enn en sky med få, store dråper. Altså vil skyen spre mer solinnstråling og gi en avkjøling.
- Semidirekte effekt: Mørke aerosoler som BC vil absorbere solinnstråling og dermed varme opp luften hvor disse aerosolene befinner seg. Dette vil endre på atmosfærens stabilitet og kan føre til at skyer fordamper. Som regel gir dette en avkjøling. Lyse aerosoler som OC endrer i langt mindre grad atmosfærens stabilitet, slik at denne effekten er minimal for disse aerosolene.

3. Metode

Basert på en helhetlig vurdering har vi gjort nye beregninger for den semidirekte effekten av BC, mens vi ikke endrer på de andre verdiene gitt i Hodnebrog et al. (2014a). Utregningene av vektfaktorene (emission metrics) følger metodikken i Hodnebrog et al. (2014a).

I Hodnebrog et al. (2014a) ble den direkte effekten av BC regnet ut ved å vekte konsentrasjonen i hver enkelt gridboks med normaliserte strålingspådriv, heretter kalt NRF, («Normalized Radiative Forcing») fra Samset og Myhre (2011). Disse NRF-feltene baserer seg på beregninger utført av den globale kjemitransportmodellen OsloCTM2 av konsentrasjonsfelter og «offline» beregninger av strålingspådriv. Et nytt studie (Samset og Myhre, 2015) har beregnet tilsvarende NRF-felter basert på den globale klimamodellen Community Atmosphere Model, versjon 4 (CAM4), både for direkte og semidirekte aerosoleffekt til BC. Disse NRF-feltene har blitt benyttet her til å beregne semidirekte aerosoleffekt til norske utslipp av BC.

Den semidirekte aerosoleffekten til BC har blitt skalert med den relative forskjellen i direkte aerosoleffekt til BC mellom CTM-beregnete NRF-felt og CAM-beregnete NRF-felt. Denne skaleringen resulterer i ca. 45% høyere semidirekte aerosoleffekt til BC. Bakgrunnen for å gjøre denne skaleringen er

at CTM-beregnete NRF-felt for den direkte aerosoleffekten er basert på mer detaljerte beregninger og antas å være mer realistiske enn NRF-feltene som baserer seg på CAM4-beregninger.

Absorpsjonskoeffisienten i de CTM-baserte (fra OsloCTM2) profilene har vist seg å være i bedre overensstemmelse med observasjoner enn generelle sirkulasjonsmodeller (GCMer) generelt (Myhre et al., 2009), og dette antas å utgjøre minst 25 % underestimering av direkte aerosoleffekt til BC i GCMene. I tillegg er det påvist ytterligere 10 % underestimering i GCMene fordi de bruker et enklere (to-strøms) strålingsskjema i forhold til (flerstrøms) strålingsskjemaet som ble brukt til å beregne de CTM-baserte profilene (Myhre og Samset, 2015). Det er grunn til å tro at semidirekte aerosoleffekt blir sterkere ved en økning i direkte aerosoleffekt, fordi absorpsjonen av sollys blir kraftigere, og det er bakgrunnen for en slik skalering. En slik skalering er også i samsvar med tidligere simuleringer som viser at semidirekte effekt øker relativt lineært med konsentrasjonen av BC. Ytterligere dokumentasjon på forskjellen mellom de to modellberegningene er gitt i Samset og Myhre (2015).

4. Resultater

Vektfaktorene Global Warming Potential (GWP) og Global Temperature change Potential (GTP) for BC og OC er uforandra i forhold til Hodnebrog et al. (2014a), med unntak at vi inkluderer et estimat for den semidirekte effekten for BC. De nye og gamle vektfaktorene er gitt i Tabell 1. Utslppsregionen Norge er summen av utslippene i regionene øst, vest, nord og offshore definert i Hodnebrog et al. (2014a). Vi presenterer ikke nye tall for Regional Temperature change Potential (RTP), men denne vektfaktoren vil også kunne endres med nye estimat av strålingspådriv og som en følge av utvikling i RTP-utregningene.

GTP10-verdien for norske utslipp er redusert med 7 % fra 2900 gitt i Hodnebrog et al. (2014a) til 2700. I Hodnebrog et al. (2014a) ga vi vektfaktorer med opptil 4 gjeldende siffer. For å få frem usikkerheten i beregningene presenterer vi her alle vektfaktorene med bare 2 gjeldende siffer. Usikkerheten er spesielt stor for den semidirekte effekten, og variasjoner i den semidirekte effekten er stor mellom år.

Tabell 1: Vektfaktorer for BC. Verdier for den semidirekte effekten for BC er nye, noe som også reduserer totalen for BC. De andre vektfaktorene er identiske med de presentert i Hodnebrog et al. (2014a). Verdiene er gitt med 2 gjeldende siffer.

Region	Komponent	Sesong	GWP			GTP		
			20 år	100 år	500 år	10 år	20 år	50 år
Norge	BC (direkte effekt)	Årlig	1400	400	120	1400	410	68
Norge	BC (albedoeffekten)	Årlig	1500	430	130	1500	440	73
Norge	BC (semidirekte effekt)	Årlig	-200	-57	-17	-200	-58	-10
Norway	BC (total)	Årlig	2700	780	240	2700	790	130
Norway	OC (total)	Årlig	-62	-18	-5,4	-62	-18	-3,0

Vi sammenligner disse vektfaktorene med nye tall estimert i EU-prosjektet ECLIPSE. GTP10-verdier for BC og OC ved europeiske utslipp er gitt i Tabell 2 og GWP100-verdier for globale utslipp i Tabell 3. Disse vektfaktorene (Aamaas et al., 2015) kommer fra multi-modell-studier hvor OsloCTM2 er en av de fire modellene involvert (Bellouin et al., In prep.). Den semidirekte aerosoleffekten av BC er svakere for norske utslipp sammenlignet med europeiske og globale utslipp. Nettoen av den semidirekte effekten er avhengig av mange faktorer som spiller inn, både oppvarmende og nedkjølende, bl.a. hvordan skydekket er, hvor stor mengde BC det er og hvor BC er plassert i forhold til skyene. Samset og Myhre (2015) har vist at netto semidirekte aerosoleffekt for BC blir positiv mot Arktis for den samme modellen som benyttet i dette studiet. Albedoeffekten er større for norske enn europeiske utslipp siden Norge ligger lenger nord og nærmere Arktis enn tyngdepunktet til Europa, altså nærmere snø og isflater. Den direkte aerosoleffekten er mindre for norske utslipp fordi mengden solinnstråling reduseres jo lengre nord man kommer. De samme argumentene gjelder når man setter norske og globale utslipp opp mot hverandre.

Tabell 1 er ikke direkte sammenlignbar med Tabell 2 og Tabell 3 siden vektfaktorene for norske utslipp (Hodnebrog et al., 2014a) baserer seg på modellen OsloCTM2, mens bak tallene for de europeiske og globale utslippene (Aamaas et al., 2015) er det fire modeller inkludert OsloCTM2. Dessuten er oppsettet forskjellig og utregningene mer ressurskrevende for de europeiske og globale vektfaktorene. Dette fører til at den første indirekte effekten er kvantifisert i vektfaktorene for europeiske utslipp, og det har større betydning for OC enn BC. Den relativt høye OC-vektfaktoren for europeiske utslipp skyldes en kombinasjon at den første indirekte effekten er inkludert og at en modell lå spesielt høyt og dro opp det beste estimatet. Altså er den reelle forskjellen i vektfaktorer for OC mellom norske og europeiske utslipp trolig mindre enn differansen mellom Tabell 1 og Tabell 2. Tabell 2: GTP10-vektfaktorer med 2 gjeldende siffer for europeiske utslipp av BC og OC utregna i ECLIPSE-prosjektet (Aamaas et al., 2015). Sommerperioden er mai-oktober og vinterperioden november-april. Årlig GTP10-vektfaktor er vekta basert på utslippenes størrelse i sesongene siden utslippene er størst om vinteren.

Komponent	Region	Sesong	GTP 10 år			
			BC (direkte og 1. indirekte effekt)	BC (albedoeffekten)	BC (semidirekte effekt)	Total
BC	Europa	Sommer	2700	86	-870	2000
	Europa	Vinter	1000	680	-35	1700
	Europa	Årlig	1700	450	-360	1800
OC	Europa	Sommer	-750			-750
	Europa	Vinter	-390			-390
	Europa	Årlig	-520			-520

Tabell 3: GWP100-vektfaktorer med 2 gjeldende siffer for globale utslipp av BC og OC utregna i ECLIPSE-prosjektet (Aamaas et al., 2015). Sommerperioden er gitt som sommer på den nordlige halvkule (NH), altså mai-oktober, mens vinterperioden er november-april. Årlig GWP100-vektfaktor er en vekting av de to sesongene.

Komponent	Region	Sesong	GWP100			
			BC (direkte og 1. indirekte effekt)	BC (albedoeffekten)	BC (semidirekte effekt)	Total
BC	Global	NH Sommer	930	15	-380	570
	Global	NH Vinter	560	77	-100	530
	Global	Årlig	730	48	-230	550
OC	Global	NH Sommer	-180			-180
	Global	NH Vinter	-150			-150
	Global	Årlig	-170			-170

5. Utvikling innen forskning på BC og OC siden AR5

Presentasjonen av klimaeffekten av BC og OC i IPCC AR5 (Boucher et al., 2013; Myhre et al., 2013) ble i stor grad påvirket av den grundige gjennomgangen Bond et al. (2013). Denne rapporten gjorde en del skjønnsvurderinger ut fra best tilgjengelig kunnskap opp til det punktet, og kom frem til et relativt høyt anslag for BCs klimapåvirkning frem til i dag.

Siden AR5 har forskningen gått videre, spesielt på to punkter: Levetiden til BC i atmosfæren, og evnen absorberende aerosoler har til å påvirke skydannelse gjennom å endre atmosfærisk stabilitet (den såkalte semidirekte effekten). I tillegg løper det en tredje diskusjon rundt hvor vidt OC har en absorberende komponent, såkalt brown carbon. Her er det imidlertid ikke kommet så klare nye resultater som i de første kategoriene, så vi evaluerer ikke brown carbon her.

5.1. Levetiden til BC

Etter utslipp vil BC holde seg svevende helt til den vaskes ut av nedbørsprosesser, eller avsettes direkte på bakken. Tiden dette i gjennomsnitt tar, kaller vi den atmosfæriske levetiden til BC. I dagens klimamodeller anslås denne gjerne til et sted mellom 5 og 10 dager. Nyere resultater fra flere grupper (Samset et al., 2014; Wang et al., 2014a; Wang et al., 2014b) tyder imidlertid på at en levetid med mot tre dager er nødvendig for å forklare observasjoner. Sentralt står flykampanjen HIPPO (Schwarz et al., 2013), som gjennom fem år har målt vertikale profiler av BC-konsentrasjon i Stillehavet. Siden det der ikke er noen lokale kilder vil alt BC være transportert inn. Stillehavet er dermed et godt område for testing av klimamodellene.

Konklusjonen fra en rekke artikler fra de siste par årene er at HIPPO-resultatene kun kan forklares hvis levetiden til BC er relativt kort. Implikasjonen av dette er at BC transporteres kortere enn hva modellene så langt har simulert, og at den ikke når fullt så høyt i atmosfæren. Siden BCs strålingspådriv per gram øker raskt med høyde i atmosfæren, innebærer en kortere levetid også en lavere total klimaeffekt rundt de viktigste kildeområdene.

Globale studier (Hodnebrog et al., 2014b; Samset et al., 2014; Wang et al., 2014a) antyder at en kortere levetid kan redusere den direkte effekten for BC med opp til en faktor 2. De indirekte og semidirekte effektene vil også påvirkes på grunn av endret romlig fordeling for BC. Hvordan oppdatert levetid vil slå ut for norske BC-utslipp er imidlertid vanskelig å anslå uten dedikerte simuleringer, da nettoeffekten avhenger av lokale nedbørsforhold, skyer og konveksjonsrate. Vi legger derfor ikke levetidsendringen inn i denne oppdateringen av kvantitative estimater for BCs vektfaktorer.

5.2. BCs semidirekte effekt

Den semidirekte effekten til aerosoler har, frem til nå, vært svært dårlig kvantifisert. Et lite knippe studier (Ghan et al., 2013; Hodnebrog et al., 2014b; Samset og Myhre, 2015) har de siste par årene gitt utvidede bidrag her, og trekker resultatene klart i retning av at bidraget fra den semidirekte effekten til BCs totale klimaeffekt er negativt. Dermed vil det motvirke, og redusere, den totale klimaeffekten av BC. Anslagene for dagens semidirekte effekt fra BC varierer mellom de modellene som har forsøkt å kvantifisere den, og regionalt vil den også variere sterkt fra år til år siden den er avhengig av fordelingen av skyer. Vi ønsker her å understreke at det fortsatt er stor vitenskapelig usikkerhet rundt viktigheten av BCs semidirekte effekt, men at den må tas med i totalbildet er det ikke lenger tvil om. En rekke klimamodeller har vist en relativ lav temperaturrespons av BC ved bakken (Baker et al., 2015; Stohl et al., 2015), som kan være et tegn på en markert avkjøling fra den semidirekte effekten siden den semidirekte effekten er automatisk inkludert i klimamodellene.

5.3. Oppdatert nettoeffekt for BC

Mange tidligere estimater for BCs klimapåvirkning per enhet av utslipp har kun basert seg på den positive direkte strålingseffekten, d.v.s. BCs evne til å ta opp ekstra energi fra innkommende solstråling. De nye utviklingene innen levetid og semidirekte effekt trekker imidlertid begge i motsatt retning, og reduserer nettoeffekten. Videre forskning, spesielt multi-modell-studier med nøyte kontrollerte oppsett og gjennomtenkt diagnostikk, er imidlertid nødvendig for å kvantifisere bidragene relativt til hverandre.

6. Kunnskapsutvikling fremover

Per i dag er det klart at de simulerte fordelingene av BC i klimamodellene har systematiske avvik relativt til observasjoner, både i horisontal og vertikal dimensjon. Hvor vidt avvikene skyldes gal levetid for BC, gale estimater for utslipp, manglende prosesser representert i modellene eller en kombinasjon av disse, er imidlertid et tema for sterk debatt. Spesielt kvantifisering av den semidirekte effekten, og hvor stor den er relativt til den direkte, vekker mye diskusjon. Dette henger til en viss grad sammen, fordi bidragene til negativ semidirekte effekt av BC vil være spesielt stor høyt oppe i troposfæren.

Resultatene fra HIPPO har vært toneangivende, men de dekker bare en begrenset del av kloden. Analyse av andre, nyere flykampanjer er alt i gang og vil bli publisert i løpet av 2016. CICERO deltar i analysen. I

de kommende årene (2016-2019) er det videre ventet at en rekke nye flybaserte målekampanjer vil bli gjennomført, både i fjerntliggende regioner som over hav og i Arktis, og nært utslippsområder som India. Sammenligning av resultater herfra med forutsigelser fra oppdaterte klimamodeller vil kunne gi en samtidig bedret forståelse av både global utslipp av BC og dets levetid i atmosfæren. Her vil CICERO bidra gjennom en rekke prosjekter finansiert av Forskningsrådet (bl.a. AC/BC, NetBC, BlackArc).

Multi-modell-studier av den semidirekte effekten er også planlagt, innenfor rammen av det godt etablerte AeroCom-samarbeidet. Her deltar miljøene rundt et titall av verdens ledende klimamodeller. Vi forventer at arbeidet i løpet av få år vil kunne sette langt bedre grenser for den semidirekte effekten av BC – og dermed dets netto klimaeffekt - enn hva som er tilgjengelig i dag. CICERO leder dette initiativet, men arbeidet er p.t. i hovedsak ufinansiert.

Kunnskapsforståelsen av den semidirekte effekten baserer seg på en rekke ulike modeller med forskjellig oppløsning fra høyoppløste modeller til globale klimamodeller. De globale estimatene av semidirekte effekt baserer seg på sistnevnte modeller. På CICERO har vi ulike modeller og vi har mulighet til å undersøke betydning av modellopløsning. En av modellene, WRF-Chem (Grell et al., 2015), kan benyttes med oppløsning rundt 1 km og til oppløsning tilsvarende en klimamodell. En stor styrke med modeller på oppløsning rundt 1 km er at skyene kan behandles mer direkte uten parametriseringer, spesielt gjelder dette konvektive skyer. CICERO har mulighet til å undersøke betydningen av høyoppløst modell for beregning av semidirekte effekt for norske utslipp.

Annex

Vi supplerer Hodnebrog et al. (2014a) med GTP10-verdier for noen perfluorkarboner (PFKer) basert på AR4 (se Tabell 4).

Tabell 4: GTP10-vektfaktorer med 3 gjeldende siffer for globale utslipp av noen perfluorkarboner (PFKer). Disse er utregnet på basis av AR4.

Komponent	Region	GTP 10 år
CF4	Global	4850
C2F6	Global	8040
C3F8	Global	5890

Referanser

- Aamaas, B., Berntsen, T.K., Fuglestad, J.S., Shine, K.P. og Bellouin, N., 2015. Multimodel emission metrics for regional emissions of short lived climate forcers. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 15(18): 26089-26130.
- Baker, L.H. et al., 2015. Climate responses to anthropogenic emissions of short-lived climate pollutants. Atmos. Chem. Phys., 15(14): 8201-8216.

- Bellouin, N. et al., In prep. Regional and seasonal radiative forcing by perturbations to aerosol and ozone precursor emissions.
- Bond, T.C. et al., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118: 5380–5552.
- Boucher, O. et al., 2013. Clouds and Aerosols. In: T.F. Stocker et al. (Editors), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ghan, S.J. et al., 2013. A simple model of global aerosol indirect effects. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12): 6688-6707.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G. and co-authors 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment* 39, 6957-6975.
- Hodnebrog, Ø. et al., 2014a. Climate impact of Norwegian emissions of short-lived climate forcers, Center for International Climate and Environmental Research – Oslo (CICERO), Oslo, Norway.
- Hodnebrog, Ø., Myhre, G. og Samset, B.H., 2014b. How shorter black carbon lifetime alters its climate effect. *Nat Commun*, 5.
- Myhre, G. et al., 2009. Modelled radiative forcing of the direct aerosol effect with multi-observation evaluation. *Atmos. Chem. Phys.*, 9(4): 1365-1392.
- Myhre, G. og Samset, B.H., 2015. Standard climate models radiation codes underestimate black carbon radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(5): 2883-2888.
- Myhre, G. et al., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: T.F. Stocker et al. (Editors), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Samset, B.H. og Myhre, G., 2011. Vertical dependence of black carbon, sulphate and biomass burning aerosol radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, 38(24): L24802.
- Samset, B.H. og Myhre, G., 2015. Climate response to externally mixed black carbon as a function of altitude. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(7): 2913-2927.
- Samset, B.H. et al., 2014. Modelled black carbon radiative forcing and atmospheric lifetime in AeroCom Phase II constrained by aircraft observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(22): 12465-12477.
- Schwarz, J.P. et al., 2013. Global-scale seasonally resolved black carbon vertical profiles over the Pacific. *Geophysical Research Letters*, 40(20): 5542-5547.
- Stohl, A. et al., 2015. Evaluating the climate and air quality impacts of short-lived pollutants. *Atmos. Chem. Phys.*, 15(18): 10529-10566.
- Wang, Q. et al., 2014a. Global budget and radiative forcing of black carbon aerosol: Constraints from pole-to-pole (HIPPO) observations across the Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(1): 195-206.
- Wang, X. et al., 2014b. Exploiting simultaneous observational constraints on mass and absorption to estimate the global direct radiative forcing of black carbon and brown carbon. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(20): 10989-11010.