

Finnes det alternativer til CCS for å redusere utslipp fra sement?¹

Oskar Vågerö, Stipendiat, Institutt for teknologisystemer, Universitetet i Oslo,

oskar.vagero@its.uio.no

Snorre Kverndokk, Seniorforsker, Frischsenteret, snorre.kverndokk@frisch.uio.no

Eric Nævdal, Seniorforsker, Frischsenteret, eric.navdal@frisch.uio.no.

Ingress

Regjeringens beslutningen om å investere i et demonstrasjonsanlegg for karbonfangst og lagring (CCS) på Norcems sementfabrikk i Brevik høsten 2020, la grunnlaget for CCS som et potensielt viktig utslippsreducerende tiltak for klimagasser. Det planlagte anlegget vil imidlertid bare redusere utslippene med 50%. CCS er i tillegg et dyrt, noe som gjør det interessant å utforske andre alternativer. Vår litteraturgjennomgang ser på hvilke alternativer og supplement til CCS som finnes i sementindustrien, og hvordan man kan redusere bruken av sement for få ned utslippene. Vi finner at det er potensielt mulig å oppnå utslippsreduksjoner uten CCS på ca. 50 prosent i sementproduksjon i dag til en lavere kostnad enn dagens kvotepris. Hvis målet er nullutslipp i sementproduksjon i nær framtid, er imidlertid CCS nødvendig. Men det finnes tiltak på etterspørselssiden som kan redusere utslippene fra sement, selv uten CCS. Slike tiltak, kombinert med tiltak på produsentsiden, kan redusere utslippene ved betongkonstruksjoner med over 80 prosent. I tillegg kan sement få økt konkurranse i framtiden både av trematerialer og alternative sementtyper med lavere utslipp av CO₂ i produksjonsprosessen.

¹ Dette prosjektet er muliggjort gjennom PLATON – Plattform for offentlig og nasjonalt tilgjengelig kunnskap om klimapolitikk som finansieres av Norges forskningsråd. Artikkelen bygger på Oskar Vågerös masteroppgave ved Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Snorre Kverndokk og Eric Nævdal var veiledere på oppgaven. Vi takker Ståle Aakenes, Rune Jansen Hagen og en anonym konsulent for kommentarer.

INNLEDNING

I september i fjor annonserte regjeringen gjennom en stortingsmelding (St. Meld. 33 (2019–2020)), at de går inn for å gi støtte til et demonstrasjonsprosjekt for karbonfangst og lagring (CCS) på Norcems sementfabrikk i Brevik. Prosjektet kalles Langskip og omfatter også planer for CCS på et søppelforbrenningsanlegg på Klemetsrud i Oslo. Dermed ser en lang prosess for å få til et fullskala-anlegg på fastlandet i Norge ut til å lykkes. Det planlagte anlegget i Brevik er et demonstrasjonsprosjekt der hensikten først og fremst er å skape en overføringsverdi i form av læring for andre sementprodusenter. Anlegget kan bli den første sementfabrikken i verden med CCS (Atkins og Oslo Economics, 2016, s. 70). I tillegg vil det selvsagt også redusere norske utslipp fra sementproduksjon, og det vil føre til at vi får etablert en kjede for transport og lagring i Nordsjøen, også kalt Northern Lights² som gjør Nordsjøen mer tilgjengelig som karbondeponi også for virksomheter utenfor Norge.

Det er mange grunner til at sement er en av de sektorene hvor det satses på CCS. Sementsektoren har blitt sett på som en sektor hvor det er vanskelig å redusere utslippene. Hovedårsaken er at i motsetning til for eksempel kraftproduksjon, er ikke substitusjon over til fornybar energi nødvendigvis den fulle løsningen for industribedrifter som sementprodusenter, da produksjonen også gir prosessutslipp. Ser vi bort fra energisektoren er også sement den industrisektoren som har de klart høyeste utslippene. Utslippene fra sementproduksjon ligger på nærmere 8 prosent av verdens CO₂-utslipp (Andrew, 2019; Friedlingstein m.fl., 2019; Ellis m.fl., 2019), mens utslippene fra fly og skip til sammenligning utgjør ca. 5 prosent av globale CO₂-utslipp. Utslippene har også økt betraktelig over flere år da sementproduksjonen globalt økte fra 130 megatonn i 1950 til 1,8 gigatonn i 2000 og 4,1 gigatonn i 2017, med Kina som den største produsenten (Hessen, 2020, s. 202), en økning som er høyere enn den globale befolkningsutviklingen. Skal verden nå langsiktige klimamål definert gjennom Parisavtalen, må derfor utslippene fra sementproduksjon på sikt reduseres betraktelig. De fleste fullskalaanlegg for CCS i dag er innen industri og energitransformasjon (IEA, 2020), men foreløpig er ikke CCS tatt i bruk i sementproduksjon.

² <https://northernlightscs.eu/>

I Norge er Norcem eneproduzent av sement med to produksjonsanlegg i henholdsvis Kjøpsvik i Nordland og Brevik i Telemark. Den norske produksjonen brukes for det meste innenlands. Norcem har markedsandel på 75 prosent i Norge (Multiconsult, 2019). Resten blir importert, hovedsakelig fra Tyskland, Danmark, Sverige og Nederland (SSB, 2019).

Det planlagte CCS-anlegget i Brevik vil redusere utslippene med 400.000 tonn CO₂ årlig, noe som utgjør ca. 50 prosent av fabrikkens utslipp.^{3,4} Prosjektet vil således ikke redusere alle utslippene fra sementproduksjon. I denne artikkelen vil vi derfor, ved en gjennomgang av forskningslitteraturen og andre rapporter, se nærmere på mulighetene for å oppnå reduksjoner både i produksjonen og gjennom etterspørselsreducerende tiltak, og vi vil gi anslag på kostnadene ved å gjøre dette. Disse utslippsreduksjonene vil kunne være et supplement til CCS, men også gjenspeile mulighetene uten CCS. Vi må likevel ta forbehold om at kostnadene og potensialene vi finner i litteraturen ikke nødvendigvis gjenspeiler mulighetene i hver enkelt fabrikk, heller ikke Norcem i Brevik, men de vil likevel gi en god indikasjon på mulighetene og kostnadene ved å redusere utslippene fra sement.

For å kunne studere muligheter for utslippsreduksjoner, må vi i første omgang se nærmere på hvordan utslippene fra sementproduksjon oppstår og hva sement brukes til. Det finnes ulike typer sement, hvorav den mest vanlige er Ordinary Portland Cement (OPC). Den norske produksjonen av denne tar utgangspunkt i kalkstein som hentes fra flere kalksteinsbrudd og gruver i Norge, også ved de norske sementfabrikkene. Kalksteinen blir knust, blandet med sand og leire og fraktet til sementfabrikken hvor den blir varmet opp. Under denne prosessen lages klinker, hovedingrediensen i sement, ved at varmen splitter kalsiumkarbonatet i kalsiumoksid og karbondioksid (CO₂). Utslippene fra dette kalles for prosessutslipp, og står i Norge for nærmere 2/3 av utslippene ved sementproduksjonen (Norcem, 2020a)⁵. De resterende utslippene kommer fra selve oppvarmingen. Ovnene skal ha en temperatur på opptil 1450 °C, og for at ovnene skal bli varme nok kan flere typer energikilder brukes. I Norge brennes avfall, biobrensler og fossile

³ <https://ccsnorway.com/capture-norcem/>

⁴ Det er verd å merke seg at det er designet som er valgt i Brevik som renser 50 prosent. Teknisk sett er det mulig oppnå rensing på opptil 90 prosent med CCS, men da trengs ytterligere energi (varme) i prosessen. I Brevik vil man bruke spillvarme/restvarme fra de andre delene av prosessen.

⁵ Globalt regnes det ofte med at ca. 40% av utslippene er fra oppvarming. Forskjellen kan skyldes den relativt store andelen biobrensler som brukes i oppvarmingen i Norge.

brensler i litt ulike forhold i de to fabrikkene.⁶ Etter at klinkeren er laget, blir den avkjølt før den blir kvernet og blandet med gips og eventuelt andre materialer til det vi kjenner som sement. Utslippsreduksjoner kan derfor bestå i reduksjoner i prosessutslipp og reduksjoner av utslipp fra forbrenningen.⁷ Prosessutslippene kan reduseres ved klinkersubstitusjon (dvs. å ha en lavere andel klinker i det ferdige sementproduktet), og ved å lage alternative typer sement, mens utslippene ved fyringen kan reduseres ved energieffektivitet og ved valg av andre typer brennstoff i forbrenningsprosessen. Vi går nærmere inn på disse komponentene nedenfor hvor vi lager marginalkostnadskurver for utslippsreduksjoner på produsentsiden og sammenligner dem med kostnadene ved CCS.

Alternativet til å redusere utslipp fra sementproduksjon er tiltak som kan redusere etterspørselen etter sement og som dermed reduserer utslippene fra sektoren. Sement brukes i mørtel ved muring, men hovedsakelig som bindingsmiddelet i betong.⁸ Betong har vært brukt som byggemateriale siden romertiden (Bjørnstad, 2014), og brukes i dag i alle typer konstruksjoner som f.eks. bygninger, veier og broer (Cembureau, 2018). Tall for EU fra 2015 viser at 50 prosent av all sement ble brukt til bygninger, ca. 30 prosent til infrastruktur og de resterende 20 prosent til vedlikehold (Material Economics, 2019). Vi vil se på om det går an å redusere bruken av sement i betong, deretter vil vi studere om det finnes eller kan komme alternativer til betong i ulike konstruksjoner som vil gi lavere utslipp.

Vi avslutter artikkelen ved å drøfte konklusjonene fra de ulike analysene.

UTSLIPPSREDUSERENDE TILTAK I SEMENTPRODUKSJON

Det er flere muligheter for å redusere utslippene fra sementproduksjon. Nedenfor skal vi fokusere på utslippsreduksjoner fra forbrenningen (energieffektivitet og valg av brennstoff i

⁶ I Brevik ble det i 2019 bruket 42 prosent avfall, 30 prosent biobrensler og 28 prosent fossile brensler, mens det tilsvarende forholdet i Kjøpsvik i 2016 var 19 prosent, 12 prosent og 69 prosent (Norcem, 2020a,b).

⁷ Noen av utslippene (ca. 10% prosent ifølge Schneider, 2019) blir absorbert av ferdige betongkonstruksjoner gjennom såkalt karbonatisering. Vi har ikke tatt med karbonatisering i beregningene i denne artikkelen, da det ikke er inkludert i nasjonale beregninger av CO₂-utslipp (UNFCCC, 2020).

⁸ Teknisk sett er mørtel laget med sement også en type betong.

forbrenningsprosessen) og reduksjon av prosessutslipp (klinkersubstitusjon, samt produksjon av alternative typer sement), i tillegg til utslippsreduksjoner ved CCS.

Energieffektivitet

Energieffektivitet blir ofte sett på som en av de mindre kontroversielle måtene å redusere klimagassutslipp på ettersom det reduserer kostnadene for brennstoff og elektrisitet. I Norcems to fabrikker ble det brukt henholdsvis 136-141,7 kWh/tonn sement og 111-146 kg brennstoff /tonn sement i 2016 der Brevik står for de øvre tallene og Kjøpsvik for de lavere.⁹Detaljert informasjon om hvor moderne teknologien er i Norcems prosesser er ikke offentlig tilgjengelig. I 2014 hevdet imidlertid representanter for Norcem (Bjerge og Brevik, 2014) at de fleste moderne sementanlegg er nær den teoretiske maksimale effektiviteten, og Scrivener m.fl. (2018) hevder at det er lite sannsynlig at den energiintensive kalkovnen har et betydelig potensial til å bli mer energieffektiv.

I Norcems visjon om å bli CO₂-nøytrale innen 2030, utgjør energieffektivitet en veldig liten del. Basert på denne informasjonen kan det anslås at potensialet for reduserte utslipp er omtrent 3 prosent, og at dette skjer i prosjekter der tilbakebetalingstiden for investeringen er kort. I beregningene av marginalkostnader ved utslippsreduksjoner nedenfor, har vi anslått at dette kan gjennomføres til en marginalkostnad tilnærmet lik null.

Bio- og avfallsbasert brennstoff

For å oppnå de høye temperaturene som kreves i produksjonsprosessen, brukes ofte fossile brensler som kull, koks og naturgass.¹⁰ Økte priser på fossile brennstoff samt miljøhensyn har imidlertid økt bruken av alternative brennstoff som avfall og biobrennstoff (Rahman m.fl., 2013). I EU er de vanligste alternative brennstoffene plast (37,1 prosent), etterfulgt av blandet industriavfall (17,7 prosent) og dekk (14,9 prosent), se IFC (2017). Til sammenligning er 37 prosent av alternativt brennstoff i Norcems to fabrikker biobasert og det resterende avfallsbasert.

⁹ Brevik har lavere utslipp per tonn sement (578 kg CO₂/tonn sement i Brevik og 626 kg CO₂/tonn sement i Kjøpsvik). Elektrisitetsforbruket er større i Brevik og det med mer brennstoff, men det brukes mindre fossile brensler, se fotnote 5 over.

¹⁰ Elektrisitet og hydrogen nevnes også i litteraturen som mulige kilder til oppvarming, men de antas først å kunne brukes på litt lenger sikt.

Av det totale brennstofforbruket utgjorde alternative brennstoff 59 prosent i 2016 (Norcem, 2020,a,b).

Det er teoretisk mulig å oppnå 100 prosent bruk av alternative brennstoff, men det medfører også andre endringer sammenlignet med bruk av fossilt brennstoff. Varmeoverføringen er dårligere, utslippene av SO₂, NO_x og CO₂ kan bli høyere, og klinkersammensetningen kan måtte endres (Rahman m.fl., 2013). Siden brennstoffrelaterte klimagassutslipp utgjør 33 prosent av de totale utslippene, kan biobaserte brennstoff dermed teoretisk redusere utslippene fra forbrenning med 33 prosent. For Norcem betyr dette potensielt reduserte utslipp med 26 prosent, hvis alt fossilt og avfallsbasert drivstoff erstattes med biobasert brennstoff.

Kostnadene for alternative brennstoff varierer med hvilke type råvare som brukes, men McKinsey (2013, 2018) har estimert disse til å ligge i intervallet 57-137 NOK/tCO_{2e} for biobasert brennstoff. Siden avfallsbasert brennstoff genererer utslipp har vi ikke inkludert dette som en relevant teknologi selv om utslippene kan være lavere enn fra kull og gass.

Klinkersubstitusjon

Utslipp av klimagasser i produksjonsprosessen skjer, som nevnt tidligere, hovedsakelig når klinker produseres, og dermed kan en lavere andel klinker i det ferdige sementproduktet være en kilde til utslippsreduksjon. Materialet som erstatter klinker blir ofte referert til som Supplementary Cementite Materials (SCM), og krever vanligvis ikke tilsatt varme eller bearbeiding ut over sliping (Material Economics, 2019). De vanligste erstatningsmaterialene er inerte¹¹ kalksteinfyllstoffer, men også andre SCM-er som granulert masovnslagg fra jernverk (GBFS), flyveaske, naturlige pozzolaner, brent skifer og kalsinert leire er nevnt i litteraturen (Scrivener m.fl., 2018; Favier m.fl., 2018). Tilgangen på GBFS har blitt redusert siden 1980 og forventes å gå ytterligere ned. Det samme gjelder flyveaske, da det er et restprodukt fra kullkraftverk. Nye funn viser i stedet at kalsinert leire i kombinasjon med malt kalkstein har potensial til å erstatte klinker i sement slik at klinkerandelen kan reduseres til 50 prosent uten å påvirke kvaliteten på produktet. Råvaren er billig og tilgjengelig (Scrivener m.fl., 2018), men distribueres foreløpig ikke i stor skala i Europa. I følge Favier m.fl. (2018) er en av grunnene at det er vanskelig å konkurrere med GBFS og flyveaske økonomisk, noe som antakelig vil endre

¹¹ Inerte materialer reagerer ikke med sine omgivelser og forblir i sin opprinnelige tilstand når sementen stivner.

seg når tilgangen på disse reduseres ytterligere ved redusert bruk av fossile brensler i industrien. Vi vil derfor basere våre kostnadsanslag på bruk av kalsinert leire, selv om det finnes andre SCM-er som er like godt eller bedre egnet.

Siden andelen klinker i sement allerede er 75 prosent, er den ytterligere reduksjonen til 50 prosent bare en reduksjon av klinker med 33 prosent. Kostnaden ved dette er lav og kan ifølge en case-studie fra Cuba (Berrier m.fl., 2016) bety kostnadsbesparelser. Bruk av kalsinert leire krever imidlertid investeringer i en kalsineringsfabrikk. Det er vanskelig å finne gode anslag i litteraturen for dette. Hvis vi bruker investeringskostnadene for ettermonterte kalsineringsanlegg fra Berrier m. fl. (2016), og tar hensyn til de reduserte produksjonskostnadene ved det nye produktet, får vi en kostnadsøkning på omtrent 35% sammenlignet med kostnaden for OPC. Vi har imidlertid ikke tatt med investeringskostnader i presentasjonen av marginalkostnadskurver nedenfor, da vi betrakter disse som en fast kostnad. Basert på dette har vi i vår studie satt marginalkostnaden til null, men det kan være andre kostnader i verdikjeden som ikke tilfaller sementprodusentene. Vi vil drøfte dette nærmere i konklusjonsdelen.

Alternative typer sement

Hittil har vi sett på reduserte prosessutslipp ved produksjon av vanlig sement (OPC). Det er imidlertid flere forskjellige produksjonsprosesser og typer sement, men med ulike modenhetsnivåer. Noen teknologier har eksistert lenge, mens andre fremdeles er i utviklingsfasen.

Nedenfor bygger vi på Gartner og Sui (2018) som har gjort termodynamiske beregninger for å estimere utslippsreduksjonen ettersom det mangler detaljerte livssyklus analyser (LCA).

Reactive Belite-rich Portland Cement (RBPC) klinker

RBPC ligner OPC når det gjelder mineralsammensetning og er også kjent som high-belite cement (HBC). Forskjellen ligger i andelen av mineralene belite og alite i produktet. I RBPC er belite den mest vanlige mineralet (over 40 prosent) mens alite er den vanligste mineralet i OPC. RBPC er godt utviklet og har blant annet blitt brukt i byggingen av verdens største vannkraftanlegg, Three Gorges Dam i Kina. Den kan produseres i konvensjonelle sementfabrikker uten store endringer i prosessen. Med lignende råvarer og produksjonsprosesser er kostnaden lik som for OPC (Gartner og Sui, 2018), og vi har dermed satt de marginale

rensekostnadene lik null. Fra de termodynamiske beregningene er utslippsreduksjonen rundt 10 prosent.

Belite-Ye'elimite-Ferrite (BYF) klinker

BYF-klinker skiller seg hovedsakelig fra OPC når det gjelder andel råvarer som mates inn i kalkovnen. BYF krever 20-30 prosent mindre kalkstein enn OPC, noe som reduserer kalsinering og dermed prosessrelaterte utslipp. Prosessen krever også litt lavere temperaturer da det er et mindre volum kalkstein som må kalsineres. Det reduserte energibehovet og den reduserte kalsinasjonen er beregnet til å gi omtrent 28 prosent lavere utslipp, hvorav 56 prosent er prosessrelaterte og 44 prosent er brennstoffrelaterte (Gartner og Sui, 2018).

Ifølge European Cement Research Academy og Cement Sustainability Initiative (2017) vil det likevel bli økte driftskostnadene for BYF-klinker på mellom 20-39 NOK/tonn sement, noe som tilsvarer omtrent 50 NOK/tCO₂. BYF-klinker er ennå ikke godkjent under europeiske standarder og dermed ikke i kommersiell produksjon (Gartner og Sui, 2018). Selv om BYF klinker teknologi har potensial i framtiden vil den derfor ikke være aktuell for prosjekter i nærmeste framtid og er derfor ikke med i analysen.

Karbonfangst og lagring (CCS)

CCS vil redusere utslippene både fra forbrenning og fra industriprosessen. Det finnes flere mulige CCS-teknologier som alle har forskjellige fordeler og ulemper. Hvis det ikke er aktuelt å bygge en ny fabrikk eller ønskelig å endre et eksisterende anlegg, er det vanligst at karbonfangsten skjer etter forbrenningsprosessen, såkalt post-combustion (IEA, 2018), hvilket også er tilfelle for det planlagte anlegget på Norcem. For å evaluere og sammenligne kostnadene ved CCS med andre tiltak, har vi brukt teknologien spesifisert i Norcems prosjekt, der et monoetanolamin (MEA) brukes som løsningsmiddel for å absorbere karbondioksid (Norcem, 2019).

Det er publisert anslag for kostnaden i St. Meld. 33 (2019–2020), men disse tallene er på et aggregeringsnivå som gjør dem vanskelige å bruke. Vi har derfor valgt å følge en svensk studie av Norcems søsterselskap Cementa og det statlige energiselskapet Vattenfall (Cementa og Vattenfall, 2018), hvor kostnaden for en slik løsning er 890 NOK/tCO_{2e} unntatt transport og lagring. Disse kostnadstallene er ikke veldig ulike de som gjengis i Energy Transitions

Commission (2018). Energy Transitions Commission (2018) hevder også at kostnadene ved CCS i sementindustrien er høyere enn for andre industrisektorer, da avgassene har en lav konsentrasjon av CO₂. For bedriften vil kostnader til transport og lagring komme på toppen av dette, og dette tallet er derfor å betrakte som en nedre grense. Selv om kostnadsanslaget er usikkert, vil de ikke ha betydning for konklusjonene vi trekker i de neste avsnittene da kostnadene ved CCS er mye høyere enn alternativene. Teknisk sett er det mulig å oppnå rensing på opptil 90 prosent med CCS (Garðarsdóttir m. fl., 2018), og dette er lagt til grunn i figurene nedenfor, selv om anlegget i Brevik bare vil ange 50 prosent.

Det er også andre typer CCS-teknologier som kan bli relevante i framtiden, for eksempel fra LEILAC-prosjektet¹² (Hills, m. fl., 2017) og CemZero¹³ (Cementa og Vattenfall, 2018). Disse teknologiene er fremdeles i en tidlig utviklingsfase og potensialet deres vil derfor avhenge av hvordan de utvikles.

Nedenfor har vi sammenfattet marginalkostnadene for de ulike tiltakene vi har anslag for. I tabellen er kostnadene ved CCS holdt utenfor. Merk at for biobasert brennstoff har vi tatt en konservativ holdning og benyttet de høyeste anslagene. Disse er også benyttet i marginalkostnadskurvene vi tegner i neste avsnitt.

TILTAK	KOSTNAD
Energieffektivitet	0
Biobasert brennstoff	137 NOK/tCO ₂
Klinkersubstitusjon	0
RBCP klinker	0

Tabell 1: Sammendrag over kostnadene for de forskjellige tiltakene i industrien

¹²I LEILAC-prosjektet skjer oppvarmingen på en annen måte der materialet ikke utsettes for luft i samme grad, noe som fører til en ren strøm av CO₂ som kan skilles ut.

¹³CemZero er en mulighetsstudie om mulighetene for elektrifisering av oppvarmingsprosessen i sementproduksjon.

MARGINALKOSTNADSKURVER FOR UTSLIPPSREDUKSJONER I INDUSTRIEN

Nedenfor har vi satt opp mulighetene for utslippsreduksjoner i sementproduksjon som to mulige kombinasjoner av tiltak. Det første (Kombinasjon1) innebærer fortsatt produksjon av vanlig sement (OPC), mens det andre (Kombinasjon 2) innebærer at man går over til produksjon av sementtypen RBPC.

	TILTAK 1 (reduksjon i prosent)	TILTAK 2 (reduksjon i prosent)	TILTAK 3 (reduksjon i prosent)
Komb. 1 (OPC)	Energieffektivitet (2 prosent)	Klinkersubstitusjon (33 prosent)	Biobasert brennstoff (17 prosent)
Komb. 2 (RBPC)	Energieffektivitet (3 prosent)	RBPC klinker (10 prosent)	Biobasert brennstoff (21 prosent)

Tabell 2: Studerte kombinasjoner av tiltak og utslippsreduksjoner

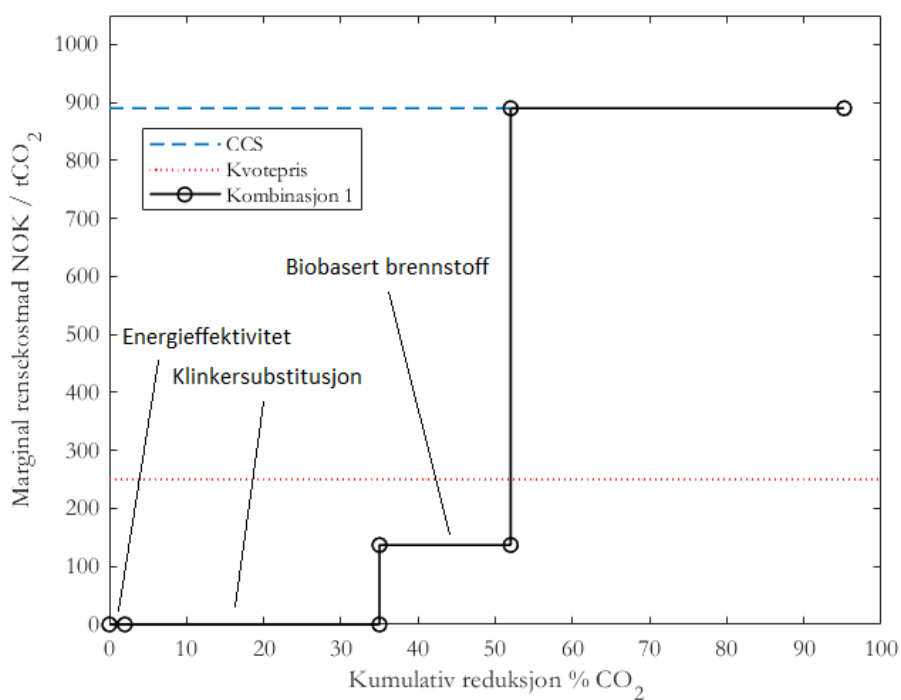
De ulike kombinasjonene har noen felles elementer som energieffektivisering og brennstoffsubstitusjon. Kombinasjonene har imidlertid ulikt potensial for hvor mye reduksjon som kan hentes ut ved energieffektivisering og brennstoffsubstitusjon siden mindre energikrevende produksjonsmetoder betyr at det er mindre å hente ut ved hjelp av effektivisering og substitusjon.¹⁴ Dette gir ulike marginale rensekostnadsfunksjoner. Ingen av disse teknologikombinasjonene er i stand til å redusere utslippene 100 prosent og er derfor avhengig av CCS om en skal realisere en visjon om nullutslipp eller CO₂-nøytalitet. Alternativt kan en kjøpe kvoter. Sementproduksjon er en del av kvotepliktig sektor i EU-ETS, noe som betyr at produsentene kan kjøpe utslippskvoter. I dag ligger prisen på disse kvotene på litt over 40 euro per tonn CO₂,¹⁵ mens vi i figurene nedenfor har lagt inn 25 Euro som har vært snittet over de par

¹⁴ For ytterligere informasjon, se avsnitt 3.2.1 i Vågerö (2020).

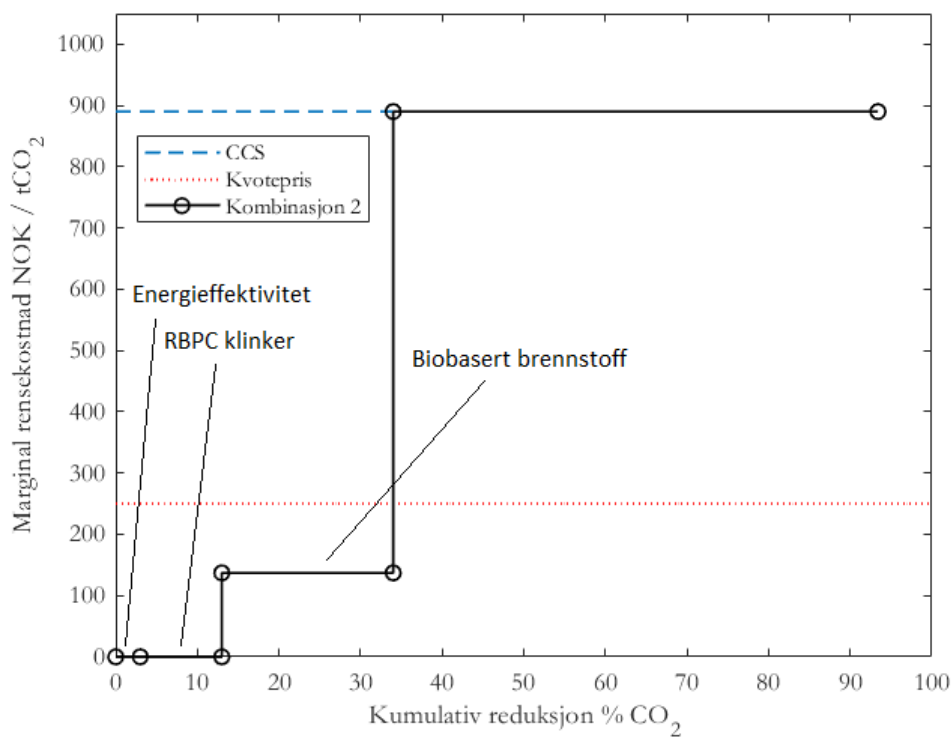
¹⁵ Se f.eks. <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/>.

siste år. I Kombinasjon 1 substitueres klinker med andre mindre energiintensive materialer. Det er den som Norcem selv har lagt til grunn i sine planer for utslippsreduksjoner. I Kombinasjon 2 erstattes standard klinker med RBPC-klinker. Kombinasjonene er til dels diskrete. Det betyr at det ikke gir mening å benytte for eksempel både OPC og RBPC klinker og samtidig foreta en reduksjon i mengden klinker per volumenhet sement. De er også skalauavhengige slik at rensekostnadene kan uttrykkes som en funksjon av prosentvis reduksjon i utslipp og ikke benevnes i enheter av reduserte CO₂-utslipp. Kombinasjonene er imidlertid ikke nødvendigvis additive. Dersom det brukes mindre klinker brukes det også mindre brennstoff og da reduseres potensialet for ytterligere reduksjon i utslipp gjennom brennstoffsubstitusjon. Kostnadskurvene blir i dette oppsettet stykkevis lineære og konvekse funksjoner av andelen utslippsreduksjon. Dette betyr at vi kan illustrere de marginale rensekostnadsfunksjonene som en trappefunksjoner. Dette er gjort i Figur 1 og 2 der de enkelte kombinasjonene er illustrert og de ulike stegene i marginalkostnadsfunksjonene er beskrevet.

Vi ser fra figurene at det er et stort potensiale for utslippsreduksjoner i sementindustrien selv uten CCS. Ved fortsatt produksjon av OPC, kan utslippene reduseres med mer enn 50% uten at det er lønnsomt å ta i bruk kvotehandling eller CCS (Figur 1). Den største årsaken til dette er klinkersubstitusjon som isolert sett kan gi reduksjoner fra produksjonen med mer enn 30%. Velger man å gå over til RBPC, er potensialet for utslippsreduksjoner noe mindre (Figur 2). Totalt sett kan man oppnå utslippsreduksjoner på ca. 35% med dette alternativet. Selv om vi finner store potensiale for utslippsreduksjoner, vil det i dag ikke være mulig å redusere utslippene til null i produksjonen av sement uten bruk av CCS.



Figur 1. Marginal rensekostnad for komb. 1, EU ETS priser og kostnad per enhet for CCS



Figur 2. Marginal rensekostnad for komb. 2, EU ETS priser og kostnad per enhet for CCS

UTSLIPPSREDUKSJONER VED REDUSERT BRUK AV SEMENT

Så langt har vi sett på utslippsreduksjoner ved produksjon av sement, men det ligger også muligheter for utslippsreduksjoner når man skal bruke sement til å lage betong, men også når det gjelder gjenbruk og endrede konstruksjoner. Vi ser først på mulighetene ved betongproduksjon.

Sementeffektivitet

Betong består, i vekt, vanligvis av mellom 7-20 prosent sement, noe som resulterer i en tetthet på ca. 300 kg/m^3 for trykkstyrker på 30-40 megapascal (MPa). Siden sement er kilden til 95 prosent av CO₂-utslippene fra betong,¹⁶ betyr dette at en redusert andel sement i betong kan redusere utslippene fra betong (Material Economics, 2019). I en ny studie viser John m.fl. (2018) at så mye som 70 prosent av sementen i betong kan erstattes med fyllmateriale (f.eks. kalkstein) uten å påvirke den mekaniske styrken. Dette ville redusere CO₂-utslippene fra 4-7 kg CO₂/m³ MPa til 2-3 kg CO₂/m³ MPa hvilket indikerer utslippsreduksjoner på 50 prosent.

Det er rimelig å tro at en delvis erstatning av sement som bindemiddel i betong med andre materiale vil redusere kostnadene ved betong. Vi har derfor anslått at det ikke er kostnader ved økt sementeffektivitet.

Enklere konstruksjoner (betongeffektivitet) og gjenbruk

Siden mindre betong betyr mindre sement og mindre utslipp, er det også potensial for å gjøre betongbruk i konstruksjoner mer effektiv og å gjenbruke materialer. Favier m. fl. (2018) mener at det brukes for mye sement som et resultat av et «better safe than sorry»-prinsipp og av praktiske årsaker. En mer optimal bruk av betong som oppfyller minimumskravene spesifisert i Eurokodene¹⁷ kan redusere bruk av sement med 20% (Shanks m.fl., 2019), noe som derfor vil være et billig tiltak. Det er også mulig å gjenbruke betong til en viss grad i nye konstruksjoner og som en kilde til kalsium i klinkerproduksjon. Mye betongavfall brukes i veikonstruksjoner og er derfor tilgjengelig i begrenset mengde, selv om det kan brukes mer effektivt i klinkerproduksjon (Favier m. fl., 2018).

¹⁶ Det resterende er antageligvis transport av sement og sand. Det framkommer ikke av Material Economics (2019).

¹⁷ Eurokodene er dimensjoneringsreglene for bærende konstruksjoner utarbeidet innenfor rammene av den europeiske standardiseringsorganisasjonen CEN.

ANDRE ETTERSPØRSELSREDUSERENDE TILTAK

Utslippene fra sementproduksjon vil også reduseres hvis etterspørselen etter sement går ned. Det er ingen grunn til å tro at aktiviteten i bygg- og anleggsbransjen blir mindre, men utslippsreduksjoner kan skje hvis sement erstattes av andre materialer, først og fremst tre, men kanskje også biosement på litt lengre sikt.

Trematerialer

I de siste årene har det skjedd store endringer i hva treverk kan brukes til i bygg og andre konstruksjoner. Høyhus hvor konstruksjonen i hovedsak er av tre, dukker opp rundt i verden, og for tiden er Mjøstårnet i Brumunddal verdens høyeste hus av tre med en høyde på 85 meter.

Skog er et naturlig karbonlager da skogen tar opp karbondioksid i så lenge den vokser, før trærne enten brenner eller råtner og avgir CO₂. Tømmer anses derfor ofte å være karbonnøytralt, selv om dette er diskutert i livssyklusstudier. Det er dermed potensial for å redusere utslipp av CO₂ ved å erstatte noe av sementen i byggebransjen med trebaserte materialer. Churkina m.fl. (2020) viser for eksempel at i et scenario der 90 prosent av alle nye middels høye bygninger på globalt nivå blir bygget med trematerialer, kan disse lagre opptil 0,68 gigatonn (Gt) karbon hvert år, noe som tilsvarer omtrent Tysklands årlige utslipp av klimagasser (Ritchie og Roser, 2017).

Klimagevinsten kan være stor i forhold til alternative byggematerialer. Saade m.fl. (2020) finner i en systematisk litteraturgjennomgang av livssyklusanalyser for bygninger, at trebaserte materialer har lavere klimapåvirkning enn betong i alle de åtte studiene som ble studert. Denne konklusjonen støttes også av fire livssyklusanalyser i Sverige og Norge (Peñaloza m.fl., 2013; Kurkinen m.fl., 2015; Skullestad m.fl., 2016; Strekerud, 2017).

Det er imidlertid vanskelig å kvantifisere og generalisere resultatene. Livssyklusanalyser gjør ulike antagelser om hvilke deler av livssyklusen som skal inkluderes og resultatene påvirkes også av bygningens miljø og beliggenhet. Både Skullestad m.fl. (2016) og Rønning og Tellnes (2018) argumenterer derfor for at man ikke skal trekke generelle konklusjoner fra slike analyser.

Videre er det sjelden verken teknisk eller økonomisk mulig å erstatte all betong med tremateriale på grunn av den lavere bæreevnen. Av den grunn er erstatningsfaktoren ifølge Brege m.fl. (2017)

50 prosent for leiligheter og 35 prosent for næringsbygg. Det finnes ingen gode studier som vi kjenner til som har sett på hvor mye kostnadene øker ved å erstatte sement med trematerialer. Det vil avhenge av hvor bygningene er plassert geografisk, designet og transportkostnader generelt. Vi har derfor ikke gjort noe forsøk på å tallfeste dette.

Biosement

Et annet materiale som kan erstatte sement i framtiden er det sementholdige materialet biosement. Biosement er et produkt som produseres av bestemte bakterier sammen med kalsium. Jordbakterier stimuleres til å koble jordpartikler og produktet fungerer som et bindemiddel sammen med sand (på samme måte som når OPC binder i betong), se Myhr m.fl. (2019). Sammenlignet med OPC har biosement fordelene av å kunne produseres i temperaturer på 20-40°C, noe som betyr at det kreves betydelig mindre energi i produksjonsprosessen.

I det norske forskningsprosjektet BioZement 2.0 er utslippene fra biosement beregnet til å være 70-83 prosent mindre enn konvensjonell betong (se Myhr m.fl., 2019), mens en internasjonal studie viste at betong produsert med biosement hadde 66 prosent lavere utslipp, se Iezzi m.fl. (2019).

Materialkostnadene for biosement forventes å være omtrent 10 prosent høyere enn for OPC (Myhr m.fl., 2019). Hvis vi tar utgangspunkt i disse økte materialkostnadene kombinert med utslippsreduksjonen på 66 prosent, kan marginalkostnaden beregnes til 679 kroner / tCO_{2e}¹⁸. Kostnadene varierer ytterligere med de forskjellige bruksområdene og hvordan sementen konverteres til betong. Vi har ikke brukt disse estimatene i den videre analysen, da biosement ikke er en moden teknologi og det er stor usikkerhet knyttet til disse kostnadsestimatene.

Mycel

Et nytt bygningsmateriale som også på sikt kanskje kan erstatte betong i noen konstruksjoner, er mycel (Jones m.fl., 2020; van der Hoeven, 2020; Rasch, 2020). Mycel er rotnettverket til sopp og forskere er allerede i gang med å se hvordan dette kan brukes som byggesteiner. Prosessen begynner med en liten stump mycel som vokser ved at den fores med biologisk avfall. I løpet av 1-3 uker har dette rotnettverket vokst seg til den ønskede størrelsen, og det blir så varmet opp ved

¹⁸ Se beregninger i tabell 2 i Vågerö (2020). Dette er betydelig høyere enn kvoteprisen på CO₂ som har ligget på mellom 25 og 40 euro per tonn.

80 °C slik at soppen dør. Deretter blir det behandlet for ikke å forvitte. En mycelblokk veier 1/50 del av en betongblokk, er veldig sterk og varmeisolerende. Fordelen med dette framfor treverk er at disse blokkene kan lages på byggeplassen, og utslippet forbundet med transport blir dermed minimalt.

Det er imidlertid noen utfordringer som gjenstår. Disse byggesteinene har f.eks. en tendens til å ta opp fuktighet og bli bløte, og det er usikkert om materialet endrer egenskap med tiden.

Dersom ingeniørene løser dette, kan mycel revolusjonere byggebransjen og kanskje gjøre sement overflødig i bygg. Hvor lang tid dette eventuelt kan ta er uvisst.

Da kostnadene ved de etterspørselsreducerende tiltakene som er diskutert i dette kapitlet er usikre samt at noen av teknologiene er umodne, har vi ikke laget marginalkostnadskurver hvor disse er tatt med. Vi kommer likevel tilbake til dem i drøftingen nedenfor.

SAMFUNNETS MARGINALKOSTNADSKURVER FOR UTSLIPPSREDUKSJONER I PRODUKSJON OG BRUK AV SEMENT I BETONGBYGG

Vi vil nå se på samfunnets marginalkostnadskurver hvor vi kombinerer tiltakene sementprodusentene kan gjøre for å redusere utslippene, og tiltakene som kan bli gjort på etterspørselssiden ved redusert bruk av sement. Som nevnt ovenfor har vi ikke tatt med trematerialer, biosement og mycel i disse beregningene.

Tabell 3 gir en oversikt over tiltakene vi bruker.

Tiltak	Kostnad
Energieffektivitet	0
Biobasert brennstoff	137 NOK/tCO ₂
Klinkersubstitusjon	0
RBCP klinker	0
Betongeffektivitet	0
Sementeffektivitet	0

Tabell 3: Sammendrag over kostnadene for de forskjellige tiltakene ved bruk av sement

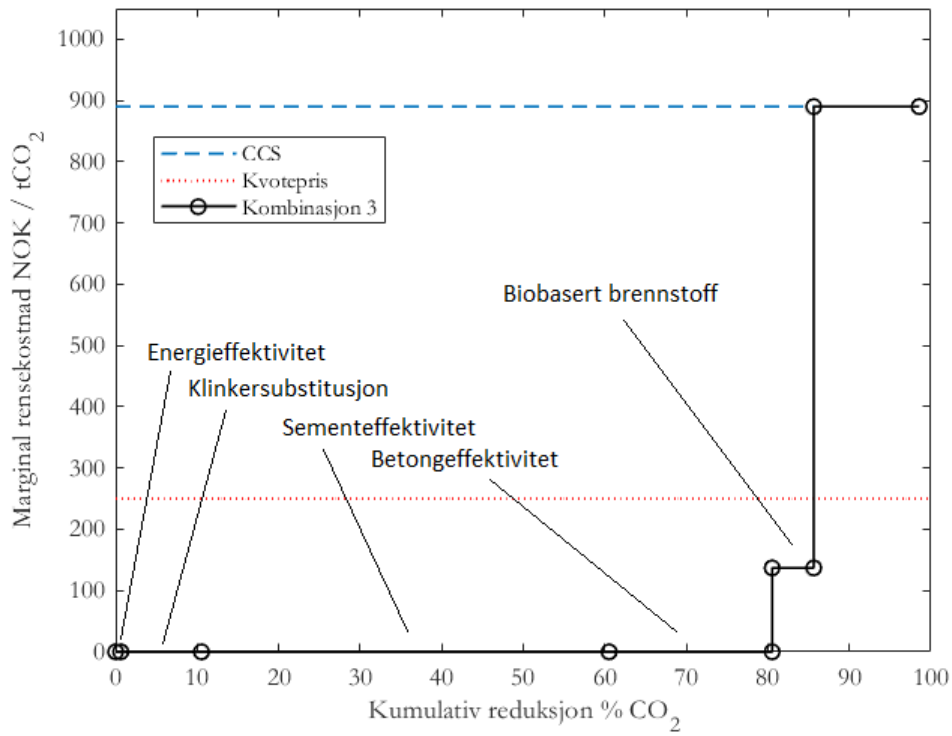
Vi har beregnet marginale rensekostnadsfunksjoner for to ulike tiltakskombinasjoner for utslippsreduksjoner i sementproduksjon og -anvendelse, se Tabell 4. Kombinasjonene er valgt slik at mest mulig utslippsreduksjon oppnås, gitt at det er teknisk mulig å kombinere tiltakene. Det er for eksempel en forutsetning for klinkersubstitusjon at man fortsatt produserer OPC, og det kan derfor ikke kombineres med RBPC-klinker.¹⁹ Kostnadene er beregnet per i dag, dvs. vi konstruerer marginalkostnadskurver for kostnadene ved utslippsreduksjoner i dag.

¹⁹ Den forskningen vi kjenner til på klinkersubstitusjon har tatt utgangspunkt i OPC. Vi har derfor antatt at man ikke kan bruke dette for RBPC. Hvis det likevel skulle vise seg å være mulig, vil potensialet for utslippsreduksjoner være enda større enn vi har antatt i denne artikkelen.

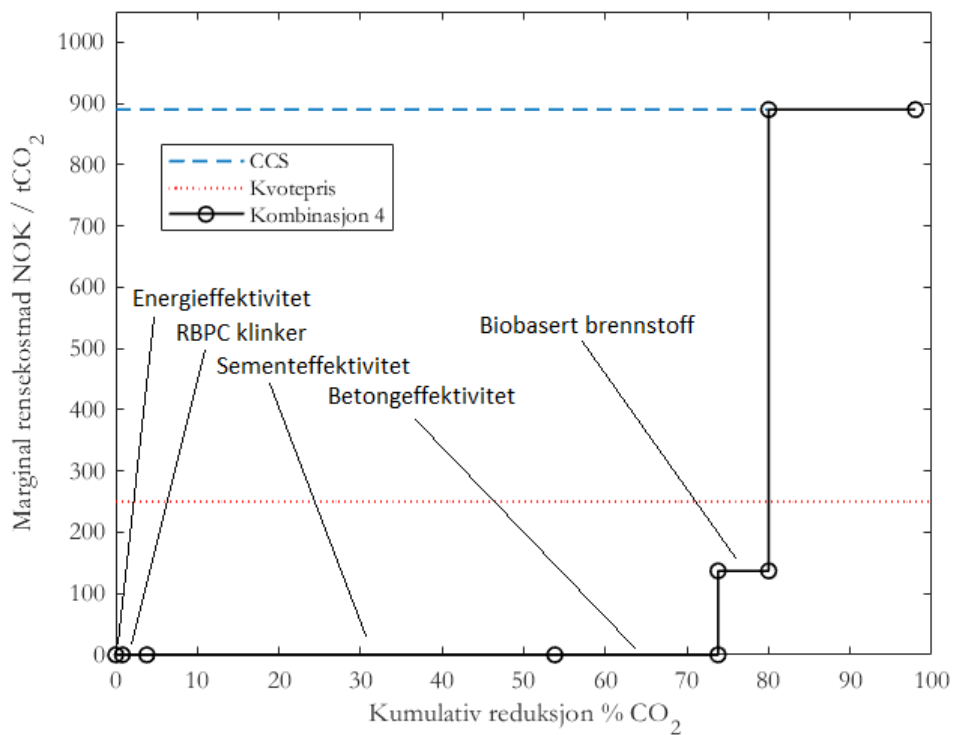
	Tiltak 1 (reduksjon i prosent)	Tiltak 2 (reduksjon i prosent)	Tiltak 3 (reduksjon i prosent)	Tiltak 4 (reduksjon i prosent)	Tiltak 5 (reduksjon i prosent)
Komb. 3	Energieffektivitet (0.63 prosent)	Klinkersubstitusjon (9.9 prosent)	Sementeffektivitet (50 prosent)	Betongeffektivitet (20 prosent)	Biobasert brennstoff (5.1 prosent)
Komb. 4	Energieffektivitet (0.81 prosent)	RBPC klinkers (3 prosent)	Sementeffektivitet (50 prosent)	Betongeffektivitet (20 prosent)	Biobasert brennstoff (6.2 prosent)

Tabell 4: Studerte kombinasjoner av tiltak og utslippsreduksjoner

De samfunnsøkonomiske marginalkostnadskurvene for Kombinasjon 3 og 4 er illustrert i Figur 3 og 4. Merk at tolkningen av x -aksen er noe forskjellig fra x -aksen i Figur 1 og 2. Der er enheten kumulativ reduksjon i CO₂-utslipp fra sementproduksjon. I Figur 3, 4 og 5 er det kumulativ reduksjon i sementrelaterte CO₂-utslipp i oppførelsen av betongkonstruksjoner relativt til CO₂-utslipp med dagens byggstandarder. Dette betyr også at Figur 1 og 2 er marginale rensekostnadskurver for sementprodusenten uten subsidier til rensing. Rensekostnadskurvene i Figur 3, 4 og 5 er *samfunnets* rensekostnadskurver siden de inkluderer både tiltak som reduserer utslipp i sementproduksjon og tiltak som inkluderer redusert bruk av ny sement i nye konstruksjoner.

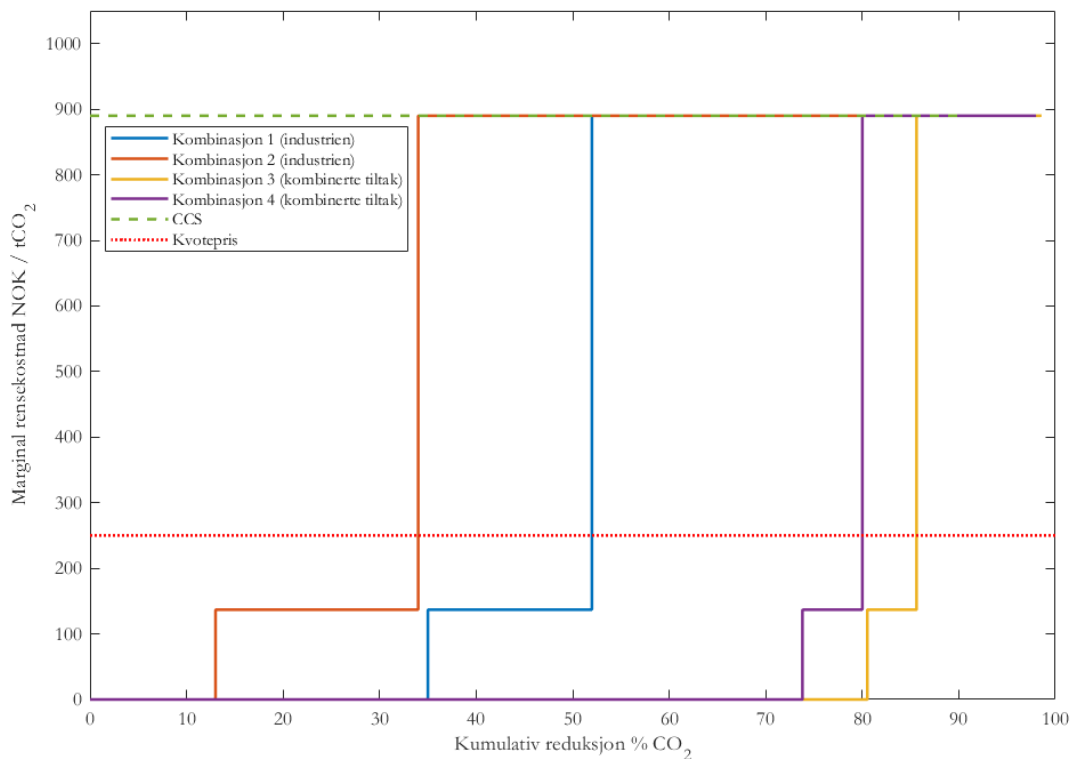


Figur 3 Marginal rensekostnad for komb. 3, EU ETS priser og kostnad per enhet for CCS.



Figur 4 Marginal rensekostnad for komb. 4, EU ETS priser og kostnad per enhet for CCS.

I Figur 5 har vi satt sammen de ulike kombinasjonene. I et kostnadsperspektiv dominerer Kombinasjon 3 de andre alternativene for all reduksjonsnivåer. Dette er ikke overraskende siden nesten alle tiltak har null marginalkostnad og Kombinasjon 4 er den kombinasjonen som gir den største reduksjonen. Men Kombinasjon 3 gir ikke nullutslipp som en mulighet. En kan da f.eks. benytte kvotekjøp. Som det framgår av Figur 5 er det muligheter for reduksjoner av utslippene fra sement på opptil 85% hvis man kombinerer tilbudsside- og etterspørselssidetiltak. Dette er mulig til en marginalkostnad som er lavere enn kvoteprisen og det er betydelig mer kostnadseffektivt enn CCS. Om CCS velges som alternativ må andre forhold en kostnader motivere dette.



Figur 5 Marginale renseskostnadskurver for alle kombinasjonene, EU ETS priser og kostnad per enhet for CCS.

DRØFTING OG KONKLUSJONER

Sement er et viktig materiale i ulike konstruksjoner som veier, broer, bygninger. Det står også for en ikke ubetydelig del av verdens CO₂ utlipp, og det er derfor nødvendig å redusere disse utslippene om vi skal nå våre langsiktige klimamål. I denne artikkelen har vi foretatt en litteraturgjennomgang for å studert hvilke muligheter det er i dag for utslippsreduksjoner i sementproduksjon, og ved å erstatte sement med andre materialer i konstruksjoner. Vi har også sett at det på lang sikt vil kunne være muligheter å erstatte sement med andre materiale som er mindre utslippsintensive.

I vår gjennomgang av litteraturen finner vi at det er en rekke muligheter for utslippsreduksjoner i sementproduksjon, hvor kostnadene for samtlige av disse tiltakene vi har studert også ligger under kvoteprisen, noe som betyr at de er lønnsomme å gjennomføre med dagens kvotemarked. Basert på våre kostnadstall vil det være teoretisk mulig å gjennomføre utslippsreduksjoner på ca. 50 prosent av utslippene i sementindustrien til en kostnad som er lavere enn kvoteprisen i EU ETS. Ut fra dagens teknologier og sementtyper, er det likevel ikke mulig å redusere de resterende 50% i sementproduksjonen uten CCS. Det finnes imidlertid andre muligheter for å få ned utslippene ved tiltak på etterspørselssiden. Tar vi med tiltak som reduserer bruken av sement i nye betongkonstruksjoner, kan utslippsreduksjonen per enhet betong i disse potensielt reduseres med over 80 prosent.

Skal vi nå klimamålene må utslippsrestriksjonene øke på sikt, noe som kan føre til at kvoteprisene vil stige. Vi vet i dag ikke om de alternative sementtypene som er nevnt i vår gjennomgang fullt og helt kan erstatte OPC, eller om de bare vil være supplement til OPC. For eksempel hevder Norcem at RBPC er lite velegnet for slanke konstruksjoner i vårt kalde klima, og biosement og mycel er fortsatt på forsøksstadiet. Potensialene vil være avhengig av teknologiske fremskritt, og prismekanismen kan være avgjørende for å gi de rette insentivene for å oppnå dette.

Mulighetene for utslippsreduksjoner vil variere mellom ulike land og lokasjoner (Energy Transitions Commission, 2018). Studien vår tar utgangspunkt forskningslitteratur og andre rapporter, som ikke nødvendigvis gjenspeiler mulighetene for Norcem, men de gir likevel en

indikasjon på potensielt store utslippsreduksjoner i sektoren. I vår gjennomgang forutsettes det også at mange av tiltakene kan gjennomføres uten ekstra kostnader. Det kan imidlertid være en del beskrankninger som gjør at de billige utslippsreduksjonsalternativene ikke nødvendigvis er aktuelle. Klinkersubstitusjon er et eksempel på dette. En substitusjon av klinker med kalsinert leire på opp mot 50 prosent går imot standarder for sement, da største tillate innblanding er 35 prosent i henhold til dagens sementstandard. Det kan også være tvil om konklusjonene i Scrivener m.fl. (2018) og John m.fl. (2018) om at substitusjon av klinker ikke vil ha en negativ innvirkning på bestandighetsegenskaper. Ifølge Norcem vil f.eks. bruk av kalsinert leire som erstatningsmateriale for klinker gi økt vannbehov i betong, noe som gjør at aktuelt innblandingsnivå av kalsinert leire i praksis blir vesentlig lavere, sannsynligvis rundt 20 prosent.²⁰ Et annet poeng er at kostnadene som oppgis i litteraturen ikke nødvendigvis tar hensyn til de omstillingene som må gjøres i industrien, som opplæring, endrede rutiner og organisering, opparbeiding av nye logistikksystemer og investeringer.²¹ I tillegg vil etterspørselsreducerende tiltak kreve videreutdanning av arkitekter, ingeniører, entreprenører og andre brukere av sement. Kostnadene kan derfor være høyere enn det som er oppgitt.

Kan det være grunner til ikke å iverksette dyre tiltak? Hvis etterspørselen etter sement er veldig elastisk, kan en prisøkning føre til et stort fall i etterspørselen. I en rapport har Norcem sett på hvordan en økning i produksjonskostnadene vil påvirke prisene på ulike prosjekter, se Norcem (2019), s. 26. Det er lagt til grunn at CCS gjennomføres og at det øker produksjonskostnadene med 100 prosent. Studien finner at for boligbygg og kommersielle bygg vil kostnadene da kun øke med 1-2 prosent, mens det antas at kommersielle utbyggere er mer priselastiske enn boligeiere. Disse tallene stemmer også overens med de som oppgis i Rootzén og Johnsson (2017). For infrastrukturprosjekter vil prisøkningen være 4-8 prosent, mens det for sementprodukter vil bli en prisøkning på opptil 25 prosent. Da 80 prosent av sement internasjonalt brukes til bygninger og infrastruktur, se innledningen over, er det dermed rimelig å tro at sementetterspørselen ikke er veldig priselastisk. Tiltak som reduserer utslippene fra

²⁰ Forfatterne av artiklene vi referer til mener imidlertid at det går an å kompensere for det økte vannbehovet gjennom en mer komplisert prosess.

²¹ Klinkersubstitusjon ved hjelp av kalsinert leire krever for eksempel at det bygges en kalsineringsfabrikk som omtalt ovenfor, og at det bygges opp logistikksystemer. I tillegg er risikoen ved å satse på dette stor bl.a. på grunn av manglende standardisering og etterspørsel. Det finnes imidlertid alternative materialer til kalsinert leire som har vesentlig lavere kostnader, se omtalen ovenfor.

sementproduksjon vil derfor i liten grad redusere etterspørselen etter sement. Slike tiltak kan likevel føre til at bedriftene som iverksetter dem kan få reduserte markedsandeler på grunn av større konkurranse, selv om vekt og verdi av sement ikke gjør den så attraktiv som en internasjonal handelsvare (Energy Transitions Commission, 2018).

Det kan være politiske grunner til å velge CCS framfor f.eks. kjøp av utslippskvoter. Norge har hatt som uttalt målsetting å foreta store deler av utslippsreduksjonene hjemme i stedet for å benytte seg av kvotekjøp.²² I tillegg kan investeringer i CCS være lønnsomt på sikt på grunn av læringseffektene som ble nevnt i innledningen. Flere internasjonale studier peker på at CCS er nødvendig for å nå de langsiktige klimamålene til en lavest mulig kostnad. I sin forrige hovedrapport konkluderte IPCC (2014) med at hvis man ønsker å stabilisere CO₂ i atmosfæren på 450 ppm. innen 2100, noe som tilsvarer togradersmålet, vil kostnadene, i gjennomsnitt basert på de modellene som er brukt, stige med 138 prosent uten CCS. Med optimal bruk av virkemidler nasjonalt og internasjonalt, kan CCS bli samfunnsøkonomiske lønnsomme investeringer, se f.eks. Golombek m. fl. (2019, 2021). Selv om ikke hele gevinsten av å være tidlig ute med CCS investeringer i sementindustrien tilfaller Norge, kan regjeringen ønske å bidra til at de internasjonale gevinstene realiseres. Etableringen av Northern Lights vil også være viktig for å til et karbondeponi som kan lagre CO₂ fra et stort antall industribedrifter rundt Nordsjøen, og det kan derfor være med på å sette fart i CCS-satsingen i Europa. Et relevant spørsmål er likevel om det var riktig å satse på CCS i sementindustrien nå. Burde man ventet for å se om flere av de andre tiltakene ville gitt resultater, eller burde man foretatt reguleringer både på tilbuds- og etterspørselssiden slik at det ville være lettere å få gjennomført andre tiltak? Etter vår oppfatning har det vært lite debatt om alternative tiltak i sementindustrien og ved bruk av sement. Det vil ikke være mulig å nå nullutslipp fra produksjonen av OPC uten bruk av CCS, men det finnes gode muligheter for utslippsreduksjoner på etterspørselssiden, og det kan komme alternativer til OPC som også gir lavere utslipp. Disse alternativene vil antagelig bli flere og billigere etterhvert. Sammenligner vi med utslippsmulighetene for det andre prosjektet som Stortingsmelding 33 (2019–2020) fokuserer på, men som ikke ble gitt full finansiell støtte, nemlig avfallsforbrenning på Klemetsrud, er mulighetene for utslippsreduksjoner antagelig

²² Et eksempel er klimaforliket i 2008 som la til grunn at 2/3 av utslippsreduksjonene fram mot 2020 skulle tas hjemme.

vesentlig mindre i det siste. Redusert avfallsmengde vil innebære mer gjenbruk, mer resirkulering og en redusert søppelmengde gjennom f.eks. redusert bruk av emballasje eller lavere konsum, noe som kan være krevende å få til.

Som vår artikkel viser, er det uansett flere muligheter for å redusere utslippene ved produksjon av sement. Da det planlagte CCS-anlegget ved sementfabrikken til Norcem i Brevik bare vil redusere utslippene fra fabrikken med ca. 50 prosent, vil de alternative mulighetene for utslippsreduksjoner ha betydning som supplement til CCS. Norcem har også som strategi å bli CO₂-nøytale innen 2030, og planlegger å ta i bruk flere av alternativene som er studert i denne artikkelen som klinkersubstitusjon og økt bruk av biobrensler, i kombinasjon med CCS.

REFERANSER

- Andrew, R. M. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1675–1710.
- Atkins og Oslo Economics (2016). Kvalitetssikring (KS1) av KVU om demonstrasjon av fullskala fangst, transport og lagring av CO₂. Rapportnummer D014a.
- Berriel, S. m. fl. (2016). Assessing the environmental and economic potential of limestone calcined clay cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 124, 361-369.
- Bjerge, L. M., og P. Brevik (2014). CO₂ capture in the cement industry, Norcem CO₂ capture project (Norway). *Energy Procedia*, 63, 6455-6463.
- Bjørnstad, S. (2014). Hvorfor var romersk sement så bra?. *forskning.no*.
- Brage, S., T. Nord og L. Stehn (2017). Industrielt byggende i trä - nuläge och prognos mot 2025, Forskningsrapport LIU–IEI–RR–17/00263–SE, Lindköpings Universitet.
- Cembureau (2018). Where is cement used?, Cembureau – The European Cement Association.
- Cementa og Vattenfall (2018). CemZero - A feasibility study evaluating ways to reach sustainable cement production via the use of electricity. Rapport.
- Churkina, G., m. fl. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3: 269-276.
- Ellis, L. m. fl. (2019). Toward electrochemical synthesis of cement – an electrolyzerbased process for decarbonating caco₃ while producing useful gasstreams. Proceedings of the National Academy of Sciences, Sep 2019.
- Energy Transitions Commission (2018). Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century. Report, November.
- European Cement Research Academy og Cement Sustainability Initiative, Ed. (2017). Development of state of the art techniques in cement manufacturing: Trying to look ahead, CSI/ECRA-Technology Papers 2017. Duesseldorf, Geneva.
- Favier, A. m. fl. (2018). A sustainable future for the European cement and concrete industry - technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050, Report, ETHZürich.
- Friedlingstein, P. m. fl. (2019). Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, 11:1783-1838.
- Gardarsdóttir, S. O. m. fl. (2018). Investment costs and CO₂ reduction potential of carbon capture from industrial plants – A Swedish case study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 76, 111-124.
- Gartner, E., og T. Sui, T. (2018): Alternative cement klinkers. *Cement and Concrete Research*, 114, 27-39.
- Golombek, R., M. Greaker og S. Kverndokk (2019). Hva er framtiden for CCS?, *Samfunnsøkonomen*, 5: 54-65.

- Golombek, R. m. fl. (2021). Transition to Carbon Capture and Storage Technologies, CESifo WP no.9047.
- Gyu, S. C. m. fl. (2017). Sustainable biocement production via microbially induced calcium carbonate precipitation: Use of limestone and acetic acid derived from pyrolysis of lignocellulosic biomass. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 5 (6), 5183-5190.
- Hessen, D. O. (2020): *Verden på vippepunktet – Hvor ille kan det bli?*, Res Publica.
- Hills, T. P. M fl. (2017). LEILAC: Low cost CO₂ capture for the cement and lime industries, *Energy Procedia*, 114, 6166-6170.
- IEA (2018). Cost of CO₂ capture in the industrial sector: Cement and iron and steel industries, IEAGHG Technical Review 2018 TR-03, IEA Greenhouse Gas R&D Programme.
- IEA (2020). Tracking Clean Energy Progress - Assessing critical energy technologies for global clean energy transitions, Cement, Tracking report, juni, IEA.
- Iezzi, B. m. fl. (2019). Growing bricks: Assessing biocement for lower embodied carbon structures. *Procedia CIRP*, 80, 470-475.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press: Cambridge, UK og New York, NY, USA.
- John, V. m. fl. (2018). Fillers in cementitious materials - experience, recent advances and future potential. *Cement and Concrete Research*, 114, 65-78.
- Jones, M., m. fl. (2020): Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review, *Materials & Design*, 187.
- Kurkinen, E. L. m. fl. (2015). Energi och klimateffektiva byggsystem - Miljövärdering av olika stomalternativ. SP Rapport 2015:70, SP – Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Lee, C., H. Lee og O. Kim (2018). Biocement fabrication and design application for a sustainable urban area. *Sustainability*, 10
- Material Economics (2019). Industrial transformation 2050 - pathways to net-zero emissions from EU heavy industry. Report.
- McKinsey & Company (2013). Pathways to a low-carbon economy - version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve. Report, september.
- McKinsey & Company. (2018). Decarbonization of industrial sectors: the next frontier, article, June.
- Multiconsult (2019). Karbonfangstanlegg Norcem Brevik, Konsekvensutredning. 130435-PLAN-RAP-02.
- Myhr, A. m. fl. (2019). Towards a low CO₂ emission building material employing bacterial metabolism (2/2): Prospects for global warming potential reduction in the concrete industry. *Plos One*, 14 (4).

- Norcem (2019). Norwegian CCS Demonstration Project, Norcem FEED, Redacted version of FEED Study (DG3) Report.
- Norcem. (2020a). Materialregnskap og utslipp, Norcem Brevik.
- Norcem. (2020b). Materialregnskap og utslipp, Norcem Kjøpsvik.
- Peñaloza, D., J. Norén og P. Eriksson (2013). Life Cycle Assessments of Different Building Systems: The Wälludden Case Study. SP Report 2013:07, SP – Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Rahman, A. m. fl. (2013). Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plantperformance: An overview. *Procedia Engineering*, 56, 393-400.
- Rasch, E. (2020). Framtidens hus er levende, *Illustrert Vitenskap*, 14/2020 s.18-25.
- Ritchie, H., og Roser, M. (2017). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions, article, Our World in Data.
- Rootzén, J., og F. Johnsson (2017). Managing the costs of CO₂ abatement in the cement industry. *Clim. Policy*, 17, 781–800.
- Rønning, A., og L. Tellnes (2018). Blir det bedre bygg ved bruk av LCA? gjennomgang av noen utvalgte lca-studier. Rapport: OR.42.18 Østfoldforskning.
- Saade, M., G. Guest og B. Amor (2020). Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence? *Building and Environment*, 167.
- Schneider, M. (2019). The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>.
- Scrivener, K., V. John, V. og E. Gartner (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26.
- Shanks, W. m. fl. (2019). How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 441-454.
- Skullestad, J., R. Bohne og J. Lohne (2016). High-rise timber buildings as a climate change mitigation measure – a comparative LCA of structural system alternatives. *Energy Procedia*, 96, 112-123.
- SSB (2019). 08801: Utenrikshandel med varer, etter varenummer (HS) og land 1988 – 2019, ssb.no.
- St. Meld. 33 (2019–2020). Langskip – fangst og lagring av CO₂, Tiltråding frå Olje- og energidepartementet 21. september 2020, godkjent i statsråd same dagen.
- Strekerud, I. M. (2017). Forskjeller i miljøpåvirkninger gjennom livsløpet til Ullerud Helsebygg som følge av valg mellom bærende konstruksjon i massivtre eller stål og betong, Masteroppgave 2017 30 stp, Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA), NMBU.
- UNFCCC (2020). Reporting requirements, United Nations Climate Change.

van der Hoeven, D. (2020). Mycelium as a construction material, *Bio Based Press*, 7. april.

Vågerö, O. (2020). Alternatives to CCS in the Norwegian cement industry, Working Paper 1/2020, PLATON Plattform for offentlig og nasjonalt tilgjengelig kunnskap om klimapolitikk.