



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

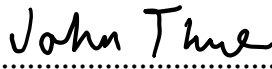
BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:
Byggingeniør, konstruksjonsteknikk

Vårsemesteret, 2022

Åpen

Forfatter: John Thue


.....
(signatur forfatter)

Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså

Veileder(e): Kjell Tore Fosså

Tittel på bacheloroppgaven: Miljøvennlig betong

Engelsk tittel: Environmental concrete

Studiepoeng: 20

Emneord: Miljøvennlig betong

Sidetall: 35

+ vedlegg/annet: 8

Stavanger, 15.05.2022
dato/år

Forord

Jeg valgte denne oppgaven fordi jeg mener betong er et materiale for fremtiden og er et materiale som kommer til å påvirke hverdagen min i stor grad i arbeidslivet. Jeg synes også det er viktig og interessant å finne ut hvordan man i byggebransjen kan gjøre miljøvennlige tiltak. Betongmaterialet er jo sett på av mange som en miljøversting med sitt høye utslipp, så det er givende å få bli med å dokumentere hvorfor dette materialet skal forbli ett av de fremste materialene i bransjen.

Denne bacheloroppgaven er ett teoretisk litteraturstudium, hvor jeg samler sammen forskninger og saker som understøtter svaret mitt på den aktuelle problemstillingen.

Oppgaven har lært meg mye nytt om denne aktuelle problemstillingen og danner en grunnstein på hvordan jeg tenker om betongmaterialet i fremtiden.

Jeg vil gjerne takke fagansvarlig og veileder Kjell Tore Fosså for tilrettelegging og veiledning. Så vil jeg også takke Saferock og Ida Marie Gabrielsen for intervju.

Sammendrag

Oppgaven min i miljøvennlig betong handler om å finne ut hvordan man kan redusere CO₂-utslippet i betong så lavt som mulig, uten at det kommer betydelige kostnadskonsekvenser for en eventuell entreprenør. Hensikten med denne oppgaven er å gi innblikk i hvilke måter betongmaterialet påvirker miljøet og den globale oppvarmingen, og deretter finne metoder for å redusere denne påvirkningen og dermed kunne fortsette å bruke betong i byggebransjen.

Oppgaven min er delt inn i to deler, den første er en teoridel hvor jeg samler informasjon gjennom forskning og dokumentasjoner på hva årsaken er til betongens miljøpåvirkning, deretter finner jeg alternativer som kan løse dette problemet. Deretter samler jeg resultatene, og implementerer de inn i del to som er en case, der jeg skal finne ut hvordan jeg kan redusere CO₂-utslippet i ett bygningsprosjekt av ett kjøpesenter i Stavanger.

Metoden jeg har brukt for å finne ut hvordan jeg kan redusere CO₂-utslippet i betong mest mulig er, først å finne ut hva den største årsaken er til utslippet. Her fant jeg ut at gjennom kalsinering og sintring av kalkstein er det sementen som står for 90 prosent av CO₂-utslippet i betongen. Deretter fant jeg mer miljøvennlige sementalternativer i Schwenks lavvarmesement og Rocksafes geopolymere. Disse samlet jeg inn utslippsdata i fra deres EPD (Environmental Product Declaration) og intervjuer, og sammenlignet hvilke sementtype som var det beste alternativet i forhold til CO₂-utslipp, styrke og kost. Jeg har også sett på andre løsninger for å redusere utslippet, som for eksempel transport og karbonatisering (CO₂absorbering i betong).

Resultatet av denne datainnsamlingen førte til at jeg landet på Saferocks geopolymere som det beste alternativet med sitt utslippstall på 190 kg CO₂ pr 1000 kg sement mot lavvarmesementens tall på 257 og den mest vanlige portlandsementens tall på 775. I forhold til styrke kunne sementalternativene stille like sterkt som konkurrenten og hadde også noen ekstra egenskaper. I forhold til kost var geopolymere konkurransedyktig på pris, mens lavvarmebetong var litt dyrere. Deretter fant jeg ut i casen at kjøpesenter jeg har regnet ut betongmasse fra trenger 863 274 kg sement og gir et utslippstall på 158 410 kg CO₂ for geopolymeren og 669 037 kg CO₂ for portlandsementen.

Konklusjonen er at man kan risikere å bytte ut den konvensjonelle sementtypen med mer miljøvennlige alternativer, uten betraktelige kostnads- og styrkekonsekvenser. I tillegg er det også viktig å se på andre alternativer til CO₂-reduksjon som transport, karbonatisering og betongmasseeffektivisering.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning.....	5
1.1 Problemstilling.....	5
2. Teori.....	6
2.1 Generelt om betong.....	6
2.2 Betong og CO2.....	7
2.3 Sement.....	8
2.4 Hvilke prosesser slipper ut mest CO2?.....	8
2.4.1 Kalsinering.....	8
2.4.2 Transport.....	9
2.5 Hvor kan man gjøre betydelige endringer?.....	10
2.6 Styrke.....	10
2.7 Kost.....	13
2.8 Miljøvennlige sementalternativer.....	14
2.9 Lavvarmebetong.....	14
2.9.1 Generelt om materialet.....	14
2.9.2 Miljøregnskap.....	15
2.9.3 Styrke.....	19
2.9.4 Kost.....	19
2.10 Geopolymer.....	20
2.10.1 Generelt om materialet.....	20
2.10.2 Miljøregnskap.....	21
2.10.3 Styrke og kost.....	22
2.11 Sammenligning.....	23
3 Kjøpesenter i Stavanger.....	26
3.1 Beregning av betongvolum.....	27
3.1.1 Hulldekke.....	27
3.1.2 Søyler og bærebjelker.....	28
3.1.3 Bankett og dekke.....	29
3.1.4 Yttervegger.....	29
3.1.5 Totalt.....	29
3.2 CO2-utslipp.....	29
3.3 Styrke og kost.....	31
4 Konklusjon.....	32
5 Referanseliste.....	34
6 Vedlegg.....	36

6.1 Schwenk lavvarmesement datablad	36
6.2 Norsk betongforening rapport Nr 6. Betong og miljø	37

1. Innledning

Jeg har valgt å skrive om miljøvennlig betong fordi jeg mener betong er et materiale for fremtiden. Det er også interessant å lese om problemer nåtidens betong skaper i forhold til global oppvarming og alternativer som kan løse dette. Forskning viser at betong står for ca 5 prosent av verdens totale CO₂-utslipp, dette skyldes sementen som står for 90 prosent av utslippet, fordi det benyttes oppvarming av kalkstein for å lage betong. Nyere forskning viser at man kan finne alternativer som slipper ut opptil 80 prosent mindre CO₂ uten betraktelige kostnadskonsekvenser. Dette ønsker jeg å studere dypere å få et større innblikk i hva dette medbringer.

Oppgaven forholder seg til forskning og miljøutslippsdata fra EPD og andre dokumentasjoner, og forsøker å finne nye og bedre løsninger basert på nyere forskning. Formålet med oppgaven er å både bidra til ett mer bærekraftig samfunn med miljøvennlige løsninger, og å fremme betongens kvaliteter og miljøvennlig potensiale.

Oppgaven er avgrenset til studie av vanlig portlandsement og to miljøvennlige alternativer i form av lavvarmesement og geopolymere. Jeg tar også for meg alternative løsninger for å redusere CO₂-utslippet som transport, karbonatisering og betongmasseeffektivisering.

Innholdet i oppgaven er delt inn i en litteraturstudiedel hvor jeg beskriver generelt om vanlig portlandbetong og hva den består av. Videre forteller jeg om CO₂-utslipp i forhold til betong, og om sementtypene som kan gi løsning på miljøproblemet og sammenligner de i forhold til CO₂-utslipp, styrke og kost. Deretter kommer det en del som handler om en case der jeg skal bygge et kjøpesenter i Stavanger og legge med et miljøregnskap i forhold til CO₂-utslipp på vanlig portlandbetong sammenlignet med det beste betongalternativet som funnet tidligere i oppgaven.

1.1 Problemstilling

Hvordan redusere CO₂-utslipp i betong så lavt som mulig?

2. Teori

2.1 Generelt om betong

De fleste er kjent med betongmaterialet, og ser at det blir brukt i flere av de store konstruksjonene rundt oss. Som for eksempel; broer, industribygninger, tunneler, leilighetskomplekser, oljeplattformer og til mindre konstruksjoner som eneboliger. Men hva inneholder betongen og hvor mye er det egentlig brukt i denne bransjen?

«Betong er et byggemateriale som lages ved å blande sement og vann med tilslag av sand og steinmaterialer. Ved at sementen reagerer kjemisk med vannet, stivner massen etter hvert og kan oppnå betydelig styrke.» (Thue, 2019). Denne prosedyren gjør at betong kan støpes i forskjellige former og blir dermed veldig anvendelig og et av de viktigste byggematerialene vi har. «Betong er verdens vanligste byggemateriale. Den viktigste ingrediensen er sement, og verdens totale sementproduksjon var i 2016 ca 4,2 milliarder tonn.» (Norcem, Hentet 14.02.2022). Dette er et ufattelig omfattende tall og når man vet hvor utslagsgivende materialet er i forhold til co2-utslipp, gir dette en god pekepinn på at dette er et område med stort forbedringspotensial.

2.2 Betong og CO2

Som nevnt tidligere er betong verdens vanligste byggemateriale. Mange forbinder også betong med et materiale som er blant de tyngste utslippsområdene når det gjelder karbondioksid (CO₂). Om dette er fordi betongen er veldig miljøskadelig eller om det rett og slett er fordi betong er det mest brukte materialet i bransjen er ikke lett å si. Det eneste som er sikkert er at endringer som minimerer utslippet vil gi betydelige positive konsekvenser globalt. I følge TU bygg sine nettsider står betongen for «cirka fem prosent av verdens totale CO₂-utslipp.» (Solberg, 2016). Dette er ett meget høyt tall og kan endres betraktelig om man retter fokus på å minimere utslipp i både planlegging av prosjekteringen og valg av materiale.

Betong forbindes med mye utslipp av CO₂, men det mange ikke vet er at materialet også absorberer store mengder CO₂. Dette blir gjort på følgende vis: «Når sement blandes med vann og herder blir portlanditt (Ca(OH)₂) dannet. Denne kjemiske forbindelsen reagerer med CO₂ i luft og karbonatiserer seg tilbake til kalkstein (CaCO₃), som er materialet som kalsineres for å lage sement.» (Norsk betongforening, 2016).

«Noen anslag sier at så mye som 80 prosent av CO₂-en som ble sluppet ut fra selve kalsineringsprosessen under produksjonen av sementen blir tatt opp igjen i et livsløpsperspektiv, andre mener det ikke er mer enn 60 prosent.» (Seehusen, 2013). Dette er tall som viser at betong ikke er så miljøskadelig som det utgir seg for, om du tenker i ett langt tidsperspektiv. «Betong i en bygning vil bruke 50-60 år på å suge til seg 30 prosent av den CO₂ som ble brukt i produksjonen.» (Valide, Hentet 2022). Om man kan finne måter å redusere CO₂-utslippet til betong på, vil prosentene av mengde CO₂ absorbert bli desto større og tilsynelatende nærme seg 100 prosent. På denne måten kan betongmaterialet bli et av klareste valgene innen byggematerialer på grunn av sin effektivitet og miljøvennlige egenskaper.

2.3 Sement

Når man snakker om CO₂-utslipp fra betong er det utelukkende sementen som bidrar til den største delen av utslippet, og derfor er det akkurat sementen man ønsker å forbedre eller bytte ut med bedre alternativer. Jeg vil av den grunn spesifisere hvilke deler av prosessen av sementproduksjonen som bidrar til mest utslipp. Først vil jeg gjøre rede for hvordan sement blir fremstilt. «Portlandsement lages ved at kalk-, silisiumdioksid-, aluminiumoksid- og jernoksidholdige råmaterialer (det vil si kalkstein eller mergel med tilsetning av andre materialer som leire, leirskifer, sandstein, feltspat, kvarts og lignende) fin-pulveriseres og blandes omhyggelig, brennes til begynnende smelting (sintring, 1400-1500 grader celsius) i roterende ovner, og males til et fint pulver i kule- eller rørmøller under tilsetning av om lag 3 – 5 prosent gips og eventuelt mindre mengder jernsulfat og hydraulisk aktivt materiale, for eksempel flyveaske.» (Årtun, Nesse, & Eide, 2021). Disse kule- eller rørmølleren som dannet gjennom sintring blir kalt for sementklinker.

2.4 Hvilke prosesser slipper ut mest CO₂?

«Det er to kilder til det høye CO₂-utslippet fra produksjonen av sement. Den ene er mengden energi som kreves til å oppnå tilstrekkelig høy temperatur. Den andre, og største kilden er at kalksteinen avgir mye CO₂ i kalsineringsprosessen.» (Seehusen, 2013).

2.4.1 Kalsinering

Vi har lært at sementen er den delen av betong som slipper ut mest CO₂, og i selve sementen er det altså kalsinering-prosessen som står for den største delen av utslippet.

«Kalsineringsutslippet utgjør ca 70 prosent av det samlede CO₂-utslippet fra sementproduksjonen. De øvrige 30% kommer fra selve prosessen ved å produsere sementen.» (Spenncon, Hentet 2022). Kalsinering må ikke forveksles med den tidligere beskrevet prosessen sintring. «Nøkkelforskjellen mellom kalsinering og sintring er at kalsinering er oppvarming av metallmalm for å fjerne urenheter, mens sintring er oppvarming av metallmalm for å sveise sammen små partikler av et metall.» (Strephonsays, Hentet 2022). Det disse to prosessene har til felles er at det slippes ut mye CO₂ fra både den enorme energien som kreves for å skape varmen som trengs, og utslippet fra kalksteinmaterialet.

«Dette medvirker til at sementen står for over 90 prosent av det samlede utslipp fra en ferdig produsert betong.» (Spenncon, Hentet 2022).



Figur 1 (Spenncon, Hentet 2022)

2.4.2 Transport

En annen prosess som har en betydelig mengde CO₂-utslipp er transport. Ved både henting av sement og levering slippes det ut store mengder med CO₂. Det er veldig mye sement som skal fraktes i løp av et byggeprosjekt, og tyngden av sementen gjør at det kreves enda mer drivstoff for å transportere det. Derfor er også transport en post hvor man kan kutte ned på utslippet, ved å eksempelvis velge en mer lokal betongprodusent.

«40 prosent av klimagassutslippene ved leveranse av betong stammer fra transporten, mens hele 60 prosent kommer på selve byggeplassen. Tromling av sementen står for 20 prosent og de resterende 40 prosentene kommer fra pumpingen av betongen på byggeplassen.» (Norbetong, Hentet 2022). Dette vil si at med en mer lokal betongprodusent kan man senke CO₂-utslippet for 40% av transportdelen.

I følge Unicon har de lansert betongbiler som går på biodrivstoff og batteridrevet trommel. «Ved at bilen benytter biodrivstoff, kan en betongbil i snitt spare inntil 90% av CO₂-utslippet sammenlignet med en diesebil. Og ved å kjøre trommelen på batteri, sparer man 30% av drivstofforbruket på betongbilene.» (Unicon, Hentet 2022).

2.5 Hvor kan man gjøre betydelige endringer?

Etter å ha funnet prosessen som har størst omfang i CO₂-utslipp (altså produksjon av sement), kan man se hvor og hva slags metoder som kan brukes for å på enklest/minst kostbart vis å redusere CO₂-utslippet. Man vil også gjøre endringer på andre poster som bidrar til betydelige utslippstall, som for eksempel transport, men siden sement er den delen av betongproduksjonen man har mest å hente fra, vil jeg spesifisere meg inn på andre mer miljøvennlige sementtyper som kan være et bedre alternativ enn vanlig portlandsement. Her ønsker jeg å kikke grundigere inn på forslag som lavvarme betong fra Schwenk. Geopolymer fra Saferock er også ett lovende alternativ.

For å kunne komme fram til en konklusjon om hvilken materialtype som er det beste i forhold til miljøvennlighet, må jeg sammenligne de forskjellige sementtypene i ulike faktorer som er viktige for at produktet kan tas i bruk. Faktorene det er snakk om er styrke; de må kunne stille samme konkurransedyktige styrke og holdbarhet som sin konkurrent for å kunne bli brukt på samme type områder og prosjekter. En annen faktor som er veldig viktig er kostbarhet; Ingen entreprenører er interesserte i å investere i ett materiale som har stor verditap i forhold til det nåværende. Den siste faktoren er hvor miljøvennlig produktet er i forhold til det nåværende; dette blir målt i CO₂-utslipp.

2.6 Styrke

En av egenskapene til betongmaterialet er at det er ett veldig robust og sterkt materiale med god holdbarhet, faktisk kanskje det beste alternativet når det gjelder styrke til en konkurransedyktig pris. For at de nye typene sement skal kunne bli tatt i bruk er det viktig at de kan, etter å ha bli blandet sammen til betong, oppfølge de samme styrkekravene som den opprinnelige betongen. Jeg vil nå se på hvordan styrken til betongen måles og hvilken styrke jeg vil ta i utgangspunkt i denne oppgaven.

Ofte har du kanskje sett at det for eksempel står B 35 på pakker som inneholder ublandet betong. Denne nummereringen forteller noe om trykkfastheten. «Kvaliteten for herdet betong angis med dens trykkfasthet i N/mm^2 (newton per kvadratmillimeter) ved en alder av syv og/eller 28 døgn etter støpe-prosessen. B 35 er for eksempel kravet til vanlige, armerte husbyggingskonstruksjoner og sier at betongen skal tåle en trykk-last på $35 N/mm^2$. De enkleste aktuelle kvalitetene er gradert i en skala som går fra B 15 til B 65 med sprang på $10 N/mm^2$. For spesielle konstruksjoner kan høyere trykkfasthet være aktuelt (høyfast betong).» (Thue, 2019). For å sjekke og kontrollere trykkfasthet brukes det en metode der man støper en 10 000 kvadratmillimeter stor terning og ser hvor høyt trykk den tåler før den knuser.

En annen faktor som er viktig og ta med i beregningen er varmegjennomgangskoeffisienten, også kalt U-verdi (tidligere kalt k-verdi). «Varmegjennomgangskoeffisient er en størrelse vi bruker for å karakterisere varmeisolasjonsevnen til bygningsdeler.

Varmegjennomgangskoeffisienten er definert som den varmestrømtettheten som passerer gjennom et plan. Varmestrømtetthet måles i watt per kvadratmeter (W/m^2).

Temperaturforskjellen oppgis i kelvin (K). Varmegjennomgangskoeffisienten angis derfor med dimensjon $W/(m^2K)$.» (Thue, Store norske leksikon, 2022). $W/(m^2K)$ kan også erstattes med bokstaven U for U-verdi.

Det er ikke bare trykkfastheten og U-verdien som må tilfredsstillende Portlandbetongens styrkeegenskaper, «det må også tas hensyn til andre egenskaper hos betongen, som for eksempel vanntetthet, frostbestandighet og slitestyrke, men stort sett vil disse egenskapene følge trykkfastheten.» (Thue, 2019). Bestandighetsklassen er en systematisk rangering som forteller deg noe om hva slags utvendige faktorer som betongen har beskyttende egenskaper mot.

Under viser en tabell som er hentet fra betongsentrum og som viser hvilke typer eksponeringer betongen kan bli utsatt for og navnet på de ulike type klassene.

EKSPONERINGSKLASSER	
XO	Ingen risiko for korrosjon eller angrep
XC1-4	Korrosjon framkalt av karbonatisering
XD1-3	Korrosjon framkalt av klorider som ikke stammer fra sjøvann
XS1-3	Korrosjon framkalt av klorider fra sjøvann
XF1-4	Fryse-/tineangrep
XA1-4	Kjemisk angrep
XSA	Særlig aggressivt miljø

Figur 2 «Tabellen viser aktuelle eksponeringsklasser i NS-EN 206 (2014)» (Betongsentrum, Hentet 2022).

Under viser en tabell oversikten over navn på ulike bestandighetsklasser fra M90 til MF40^{3,4}, og hvilke eksponeringsklasser disse tilfredsstillter.

EKSPONERINGSKLASSE	BESTANDIGHETSKLASSE					
	M90	M60	M45	MF45 ³⁾	M40 ⁴⁾	MF40 ^{3,4)}
X0	X	X	X	X	X	X
XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		X	X	X	X	X
XA1, XA2 ¹⁾ , XA4 ²⁾ , XD1, XS1			X	X	X	X
XF2, XF3, XF4				X		X
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3 ¹⁾					X	X

Figur 3 «Tabellen viser aktuelle bestandighetsklasser i NS-EN 206 (2014)» (Betongsentrum, Hentet 2022)

Det er for det meste bare trykkfastheten og bestandighetsklassen jeg skal ta utgangspunkt i når jeg sammenligner disse forskjellige materialtypene. Den trykkfastheten som må oppfølges i oppgaven min er B 30 (30 N/mm² på en 10 000 mm² betongterning) og bestandighetsklassen er M 60, som vil si ifølge eksponering- og bestandighetstabellene skal den tilfredsstillte eksponeringsklassene: «Ingen risiko for korrosjon eller angrep», «Korrosjon framkalt av karbonatisering» og til en viss grad «Fryse-/tineangrep».

2.7 Kost

En siste faktor som alt, til syvende og sist står og faller på når man skal velge materialtype er kostbarheten. Om det viser seg at den nye miljøvennlige sementtypen reduserer verdiskapningen i forhold til den opprinnelige typen, er ikke dette interessant for bedriften. Om man vil skape en miljøvennlig løsning må man alltid sørge for at dette kommer med en konkurransedyktig pris.

Alternativt om man ikke klarer å produsere ett produkt som er like rimelig som det opprinnelige, kan det hjelpe med støtte fra staten som premie for å velge det miljøvennlige alternativet. I følge Innovasjon Norge finnes det en ordning som gir støtte for «Investeringer som går lenger i retning av miljøbeskyttelse enn lovpålagte miljøkrav i EU (selv om norske miljøkrav skulle være strengere) eller for å øke beskyttelsesnivået i mangel av EU-standarder.» (Innovasjon Norge, 2021). Dette er en statlig støtte som kan bli innfridd om disse kravene oppfølges: «De miljøbeskyttelsesrelaterte kostnadene der disse klart kan identifiseres som en separat del av de samlede investeringskostnadene. I andre tilfeller må det foretas en beregning av merkostnadene sammenlignet med en tilsvarende mindre miljøvennlig investering som realistisk sett ville blitt gjennomført uten støtten.» (Innovasjon Norge, 2021).

Dermed er det essensielt at man regner ut hvor mye kostnader som medfører den nye miljøvennlige løsningen, for eksempel geopolymere og sammenligner det med hvor mye mindre det hadde kostet med bruk av portlandsement. Støtteintensiteten hadde blitt innenfor følgende regelverk: «Maksimal støttesats er 40 % av støtteberettigede kostnader. Støttesatsen kan forhøyes med 10 % for mellomstore bedrifter og 20 % for små (SMB-bonus). I tillegg kan støttesatsen forhøyes med 5 % innenfor det distriktpolitiske virkeområdet (regional bonus). Det vil si at om en mellomstor bedrift får både SMB – og regional bonus, kan man maks få dekket 65 % av de ytterlige kostnadene det miljøvennlige produktet ville medføre.

2.8 Miljøvennlige sementalternativer

Vi har tidligere funnet ut at sement er den delen av betongen som bidrar til mest CO₂-utslipp. Derfor skal jeg nå ta for meg to miljøvennlige sementalternativer. Disse alternativene jeg skal sammenligne er i kronologisk rekkefølge; lavvarme-betong og geopolymere. Her skal jeg finne ut hvilket alternativ som er det beste i forhold til faktorene CO₂-utslipp, styrke og kost. Deretter vil jeg bruke det beste alternativet og sammenligne med portlandsement i casen.

2.9 Lavvarmebetong

2.9.1 Generelt om materialet

Som vi har funnet ut er sement den minst miljøvennlige delen av betong, og i sementen er det sementklinkerene som står for det meste av utslippet. Derfor vil vi forsøke et produkt som heter lavvarmebetong. I lavvarmebetongen byttes sementklinker ut med slagg og vil dermed produsere mindre CO₂-utslipp. «Slagg og flyveaske er avfallsprodukter fra henholdsvis råjernproduksjon og kullkraftverk. Slagg blandes med tradisjonell Portlandsement og normale slaggmengder er alt i fra 30 til 75 prosent av totalt bindemiddel.» (Statens vegvesen, 2015). At de er avfallsprodukter gjør både at produksjonen blir billigere grunnet gjenvinning og at det er en miljøvennlig løsning.

Lavvarmebetong er først og fremst produsert for å forhindre følgende problemer: «

- Bestandighetsproblemer pga. forsinket ettringitdannelse
- Fastholdningsriss
- Overflatekrakelering

Dette skjer av følgende grunn; når sement og vann reagerer utvikles hydrasjonsvarme. Dette er positivt ved støpning av slanke konstruksjoner, fordi denne varmen bidrar til en moderat temperaturøkning i betongkonstruksjonen, og dermed en raskere fasthetsutvikling. I store og massive konstruksjoner derimot kan imidlertid varmeutviklingen bli så stor at temperaturen i konstruksjonen blir meget høy.» (Norcem, Hentet 2022). Dette er grunnen til at problemene over forårsakes og er grunnen til at lavvarmebetong er ett godt alternativ i store konstruksjoner.

2.9.2 Miljøregnskap

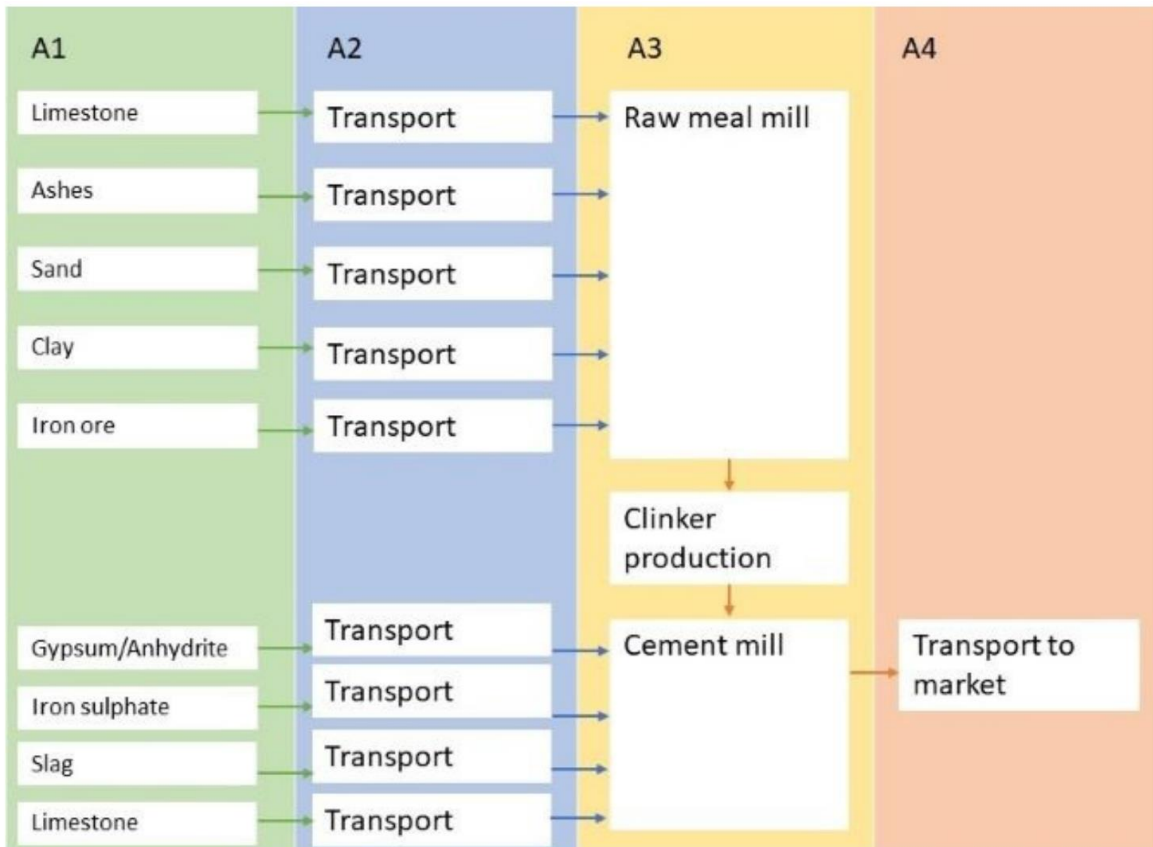
Her vil jeg vise hvor mye CO₂-utslipp det er i materialet ved hjelp av en EPD. En EPD er «en miljødeklarasjon som er et kortfattet dokument som oppsummerer miljøprofilen til en komponent, et ferdig produkt eller en tjeneste på en standardisert og objektiv måte.

Forkortelsen EPD brukes i norsk og internasjonal sammenheng og står for Environmental Product Declaration.» (EPD-Norge, hentet 2022). Disse tallene vil jeg dermed sammenligne med standard Portlandsement og utslippstallene til de andre materialalternativene.

Material	%
Aggregate	3,62
SCM	64,09
Additives	1,81
Binder	2,67
Raw materials, Mineral	27,81

Figur 4 (Schwenk, 2020)

Her er en tabell som viser i prosentandel hva lavvarmesementen som er deklartert består av. Den største delen som heter SCM og utgjør 64 prosent av blandingen. SCM står for supplementære sementmaterialer og er sammensatt av en blanding mellom flyveaske, slagg og silikastøv.



Figur 5 (Schwenk, 2020)

Utslippene til materialet er fordelt inn i systemgrenser fra A1 til A4, på figur 5 viser et flytskjema hvilke elementer av prosessen som er innenfor de forskjellige kategoriene. Her ser man da at i A1 har man deklartert utslippene til alle råmaterialene og transporten av disse i A2. Produksjonen av sementen har sine utslippstall i A3 og transporten av sementen til byggeplass viser tallene sine i felt A4.

Schwenk sin lavvarmesement er produsert i Bernburg i Tyskland og transporten i felt A4 er da beregnet for transport fra Bernburg til Oslo. Denne transporten er da beregnet fra 50 prosent båt og 50% jernbanetransport. Tilleggsberegninger er følgende: «For transport til Randaberg blir det 2,8 kg CO₂ pr tonn ekstra. Etne 4,9 kg og Bergen 5,5 kg CO₂ ekstra.» (Schwenk, 2020).

Råmaterialer	Transport	Tilvirkning	Transport
A1	A2	A3	A4
X	X	X	X

Miljøpåvirkning (Environmental impact)

Parameter	Unit	A1	A2	A3	A4
GWP	kg CO ₂ -eq	1,29E+00	7,92E+00	2,14E+02	3,06E+01

Figur 6 (Schwenk, 2020)

Dette utdraget viser materialets GWP som står for Global Warming Potential og som viser hvor mange kg CO₂ de forskjellige kategoriene slipper ut pr 1000 kg sement. Da ser vi at det er tilvirkningen (214 kg CO₂-utslipp pr 1000 kg sement) og transporten (30,6 kg CO₂-utslipp pr 1000 kg sement) som slipper ut mest. Vi ser da at selve materialet og produksjonsprosessen uten transport har ett utslippstall på 215,29 kg. Om man da skal ha et prosjekt i Stavanger må man inkludere transport og addere tilleggsfaktoren på 2,8 kg, da får man totalt 256,61 kg CO₂-utslipp.

For å sette tallene litt i perspektiv, legger jeg med utslippstallene til vanlig basis Portlandsement.

Product stage		
Raw materials	Transport	Manufacturing
A1	A2	A3
X	X	X

Environmental impact					
Parameter	Unit	A1	A2	A3	A1- A3
GWP	kg CO ₂ -eqv	7.54E+01	1.31E+01	6.56E+02	7.45E+02

Figur 7 (Aalborg Portland AS, 2017)

I denne deklarasjonen inkluderes kun produksjonstrinnet og derfor blir transport til markedet utelatt, men om man ser på utslippstallene på selve materialet og produksjonsprosessen får man ett sammenlagt utslipp på 731 kg CO₂ pr 1000 kg sement. Sammenlignet med lavvarmesementens utslippstall på 215,29 kg er dette en økning på 239,5%. Dette skyldes hovedsakelig sintringsprosessen som er en del av kategori A3 som har et utslippstall på 656 kg CO₂ pr 1000 kg sement mot lavvarmesementens utslippstall på 214 kg CO₂ pr 1000 kg sement. Man kan også se at selve råmaterialene har et betydelig høyere utslippstall hos Portlandsementen kontra lavvarmesementen. Portlandsementen har et råmaterialutslipp på 75,4 kg CO₂ pr 1000 kg sement, mens lavvarmebetongen som inneholder for det meste flyveaske og slagge har et råmaterialutslippstall på bare 1,29 kg CO₂ pr 1000 kg sement. Dette skyldes den høye andelen av kalk som Portlandsementen inneholder.

Materials	kg	%
Chalk	997	78
Fly ash	142	11
Sand	52	4
Gypsum	47	4
Other primary materials	32	3
Other secondary materials	<1	<1

Om man skal beregne CO₂-utslipp på ett prosjekt i Stavanger må man addere noen transportfaktorer. I Aalborg Portlandsementens EPD er ikke denne delen deklarerert, men for å sammenligne setter jeg bare samme transportutslipp som lavvarmebetongen minus 10 prosent siden veien er kortere fra Aalborg enn Bernburg. Da ender Portlandsementen opp med ett totalt utslipp på $745 + (30,6 \cdot 0,9) + 2,8 = 775$ kg CO₂ pr 1000 kg sement. Mot lavvarmesementens total på 257 kg CO₂ pr 1000 kg sement.

2.9.3 Styrke

En annen grunn til å bruke lavvarmebetong er at det er det kan bidra til å oppnå riss-frie anleggskonstruksjoner.

I denne oppgaven ønsker jeg å sammenligne sementtyper som kan stå for trykkfasthet B 30 og bestandighetsklasse M 60, lavvarmesementen til Schwenk utfyller altså disse kravene, men har også tilleggstyrker i materialet som for eksempel: «Tilsetning av flyveaske og slagg gir en tettere betong som beskytter bedre mot armeringskorrosjon.» (Statens vegvesen, 2015). Som nevnt ovenfor beskytter det også mot fastholdningsriss, overflatekrakelering og bestandighetsproblemer pga. forsinket ettringsittdannelse.

2.9.4 Kost

For å kunne forklare hvor store kostnadsforskjeller det er i lavvarmebetong/lavkarbonbetong må man se nærmere på lavkarbonklassene. Klassene er inndelt i A og B der klasse A er den strengeste klassen og klasse B kan oppnås med relativt mindre endringer i resept. I følge betongsentrum vil lavkarbonklasse A bli oppfulgt om en betongblanding som skal følge fasthetsklasse B 30 og bestandighetsklasse M 60 reduserer utslippet sitt til 200 kg CO₂ pr 1000 kg sement, mens lavkarbonklasse B bare trenger å redusere til 240 kg. (Betongsentrum, Hentet 2022). Dette oppnås ved å blande inn større mengder slagg eller flyveaske.

« For lavkarbonklasse B vil pristillegget normalt være på mellom 10,- og 15,- kr pr kubikk eks. MVA.

For lavkarbonklasse A vil pristillegget normalt være på mellom 70,- og 80,- kr pr kubikk eks. MVA. » (Betongsentrum, Hentet 2022).

Disse pristilleggene blir regelmessig utlignet av miljøgevinster som belønner CO₂-utslippsreduisering på store prosjekter som tidligere beskrevet.

2.10 Geopolymer

2.10.1 Generelt om materialet

«Geopolymerbetong er enkelt forklart betong basert på en sement hvor bindemiddelet aktiveres ved tilførsel av alkalier, mens den sementen som i dag er basis for nesten all betong, Portlandsement, blir aktivert av vann. Grunnen til at geopolymerbetonger regnes som grønnere enn vanlig betong er fordi det er lavere utslipp av CO₂ i produksjonsprosessen.» (Betongfokus, 2019). Mens Portlandsementen er lagt av kalkstein som bidrar til mye CO₂-utslipp, så «baserer geopolymer seg på mindre prosesserte mineraler med aluminiumsilikater. Aktuelle råstoffer her kan være flyveaske, slagg eller også leire.» (Betongfokus, 2019).

Noe av det som var snakk om i 2019 var at noen av råmaterialene var begrensede ressurser. «Flyveaske, som er den mest brukte geopolymeren hentes nå fra kullfyrte kraftverk, og slike kraftverk blir det færre av i fremtiden.» (Betongfokus, 2019). De skriver også at det ikke er umulig at industrien i fremtiden kan benytte naturlige askekilder som vulkansk aske. «Slagg er et restprodukt fra stålfremstilling, og er følgelig også en begrenset ressurs.» (Betongfokus, 2019). Det er uansett en målsetting å bruke mest mulig tilgjengelig slagg i betong, ettersom det både reduserer avfallsmengden i stålindustrien, og reduserer CO₂-utslipp i betong. Ettersom flyveaske og slagg er begrensede ressurser «kan leire derfor bli den ressursen som i fremtiden vil bidra til et lavere karbonavtrykk til sement. Selv om ikke all leire har de mineralene som er nødvendig, er det en ressurs der er stor tilgang på. For å bli reaktiv slik at den får sementerende egenskaper må leira også varmebehandles, men med ca 40-50 % av utslippet til Portlandklinkeren.» (Betongfokus, 2019).

Geopolymerbetongen jeg skal konsentrere meg om er Saferock sin. Saferock har som mål å nå ett netto-nullutslipp av karbon innen 2025. (Saferock, Hentet 2022). Faktoren som bidrar til størst utslipp i betong er forbrenningen. «Med Saferocks geopolymer er det ingen forbrenning. Det brukes oppmalt stein fra gruveindustrien. Dette er i dag et avfallsprodukt fra industrien som skaper problemer ved utslipp i fjord eller som landdeponi. Den oppmalte steinen blandes med en miljøvennlig aktivator som gjør at blandingen herder akkurat som vanlig betong. På denne måten kan vi redusere CO₂-utslippene med ca 70 prosent.» (Valide, Hentet 2022).

Geopolymer har ennå ikke blitt tatt i bruk i noen prosjekter frem til nå. Under søkingen på relevant data for Saferock sitt materiale, kom jeg også i kontakt med en av de ansatte i Saferock: Ida Marie Gabrielsen, som er geologforsker. På et spørsmål om hvor langt dette produktet har kommet i prosessen med å bli tatt i bruk, og hvordan dette produktet gradvis skal ta større del i produksjonen, fikk jeg følgende svar: «Når det gjelder prosessen for bruk av vår betong fikk vi akkurat godkjenning og støtte fra ENOVA for å bygge vår pilotfabrikk. Her vil det bli oppskalering av vår geopolymersement fra labskala til pilotskala. Vi vil i første omgang ha fokus på bruk av vår betong i pilotprosjekter for å vise at det fungerer. Planen videre etter pilotfasen vil være storskala anlegg.» (Gabrielsen, 2022).

2.10.2 Miljøregnskap

Når det gjelder CO₂-utslippet til Saferocks geopolymer fikk jeg av Gabrielsen ett estimat på «70 – 80 prosent reduksjon fra bransjestandard, B35» (Gabrielsen, 2022). Et estimat som er ferskere enn de 70 prosentene som ble antatt i et tidligere intervju med Valide. Ut i fra denne informasjonen vil jeg anta en 75 prosent reduksjon i CO₂-utslipp fra B 30 Portlandbetong for å sammenligne.

Metoden jeg da vil bruke er å beregne kun utslipp på råmaterialer og tilvirkning for å se hvilke materiale som er mest miljøvennlig isolert sett. Deretter legger jeg til transportutslipp etterpå når jeg skal velge et alternativ til casen.

Vi tar da det sammenlagte CO₂-utslippet til råmateriale- og tilvirkningskategorien til portlandsement på 731 kg CO₂ pr 1000 kg sement, og da vi reduserer det med 75 prosent får man ett utslippstall på 182,75 kg pr 1000 kg sement. Foreløpig er det ikke lagt ut noen EPD om geopolymere, men om man antar det samme råmaterial-transportutslippet som i lavvarmebetong får man ett tillegg på 1,31 kg. Siden materialet utvinnes i Norge vil jeg estimere transportutslipp til markedet på 2 til 10 kg CO₂, alt i fra hvor i landet det utvinnes, og jeg vil bruke tallet 6 kg CO₂ pr 1000 kg sement til å sammenligne. Dette er hypotetiske tall som er langt mindre betydelige enn de aktuelle utslippstallene på råvare og produksjon. Totalt ser man da at Saferocks geopolymere vil få ett totalutslipp i Stavanger på 190 kg CO₂ pr 1000 kg sement.

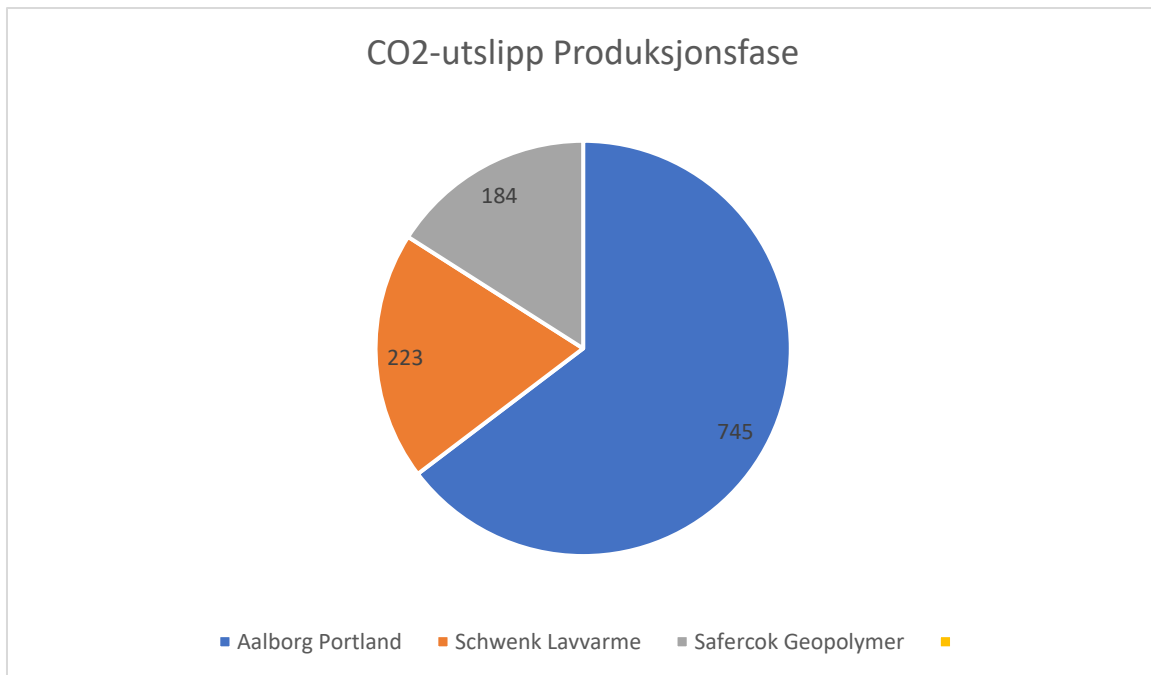
2.10.3 Styrke og kost

Det ligger begrenset info ute på nett når det gjelder faktorene styrke og kost, men etter intervju med Gabrielsen fikk jeg vite at «styrkemessig sikter vi etter å tilfredsstillere B 35 trykkfasthetskrav. Prismessig ønsker vi å være konkurransedyktige mot tradisjonell betong.» (Gabrielsen, 2022). Dette vil si at betongen deres også tilfredsstiller kravet i casen min om B 30 trykkfasthet og M 60 i bestandighetsklasse. Om betongen er prismessig konkurransedyktig med tradisjonell Portlandsement vil det enten bety at det koster omtrent like mye å produsere materialet, eller at bedriften får tilstrekkelig med midler igjen på miljøgevinst for prosjektene.

2.11 Sammenligning

Som vi har funnet ut tidligere er det sementen som står for mesteparten av CO₂-utslippet. Derfor har vi nå sammenlignet to nye miljøvennlige sementtyper med den tradisjonelle Portlandsementen. Vi har sammenlignet dem i tre ulike faktorer, CO₂-utslipp, styrke og kost. Når man ser på faktorene styrke og kost så er det minimale forskjeller. Man kan for eksempel se at lavvarmebetongen har ett par egenskaper som skiller seg ut i forhold til for eksempel fastholdingsriss når det gjelder store konstruksjoner. Dette trekker opp på styrkefaktoren, men så kan man også se at lavvarmebetongen er en smule dyrere enn geopolymer og Portlandbetongen. Alt i alt vil jeg si at styrke og kostfaktorene utligner hverandre, men at man kan finne anledninger hvor lavvarmebetong kan være ett godt alternativ ved store konstruksjoner.

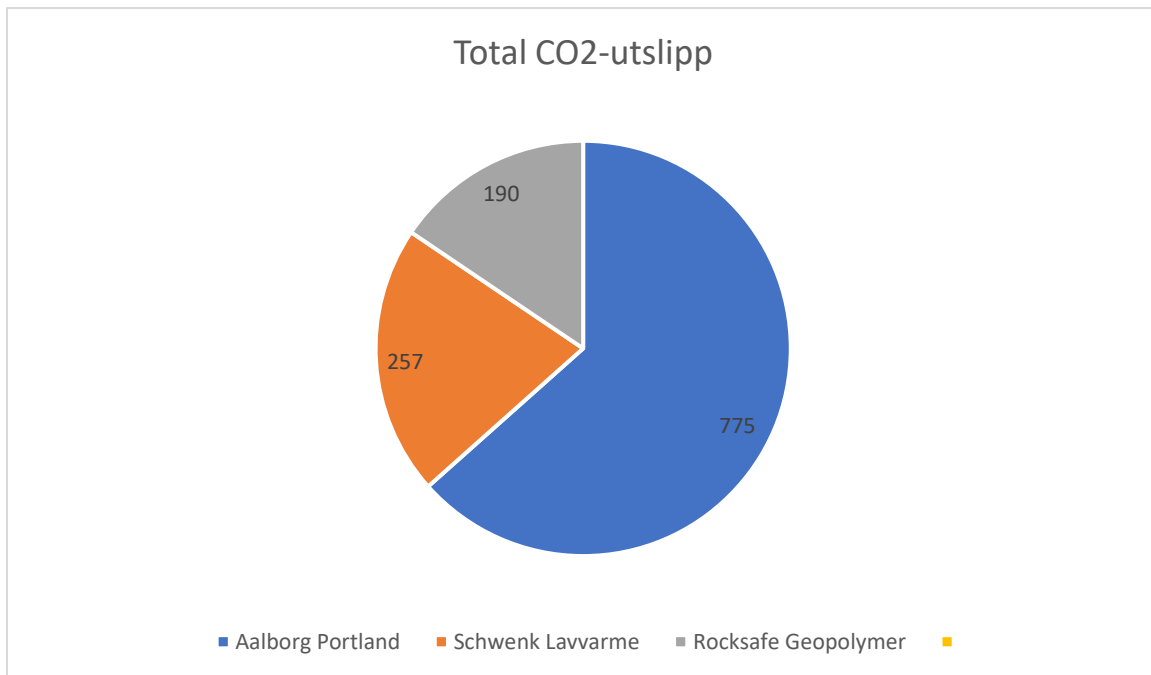
Siden styrke og kost utligner hverandre, blir det å velge materialtype ut fra den viktigste faktoren, nemlig CO₂-utslipp. Vi har gjennom EPD-analyser og intervju funnet ut hvor mye CO₂-utslipp hvert av materialene gir. Her er en oversikt over hvor mye utslipp hvert av materialene gir i produksjonsfasen.



Tallene som er oppgitt i diagrammet er i enhet antall kg CO2 (-utslipp) pr 1000 kg sement.

Her illustreres det forskjellene på CO2-utslippet til de forskjellige sementtypene. Man kan se at forskjellene er betraktelig store. I produksjonsfasen er Rocksafes geopolymer den mest miljøvennlige sementtypen med 184 kg CO2-utslipp pr 1000 kg sement. Dette betyr at om man skal bygge en ny sementprodusent vil det være lurt å velge geopolymer om det er god tilgang på de nødvendige råvarene.

Jeg vil også legge med et diagram inkludert transport til markedet slik at jeg får en oversikt på hvilken sementtype jeg bør velge i casen min.



Tallene som er oppgitt i diagrammet er i enhet antall kg CO2 (-utslipp) pr 1000 kg sement.

Her illustreres det forskjellene på det totale CO2-utslippet (inkludert transport) til de forskjellige sementtypene. Man ser at også her viser det at Rocksafes geopolymer er den mest miljøvennlige varianten med tanke på CO2-utslipp, med sine 190 kg CO2 pr 1000 kg sement. Derfor vil jeg beslutte basert på CO2-utslipp, styrke og kost at Rocksafes geopolymer er det beste alternativet og er derfor denne sementtypen jeg vil ta utgangspunkt i når jeg skal løse casen.

3 Kjøpesenter i Stavanger

Ett kjøpesenter skal bygges midt i Stavanger. Kjøpesenteret skal bygges i betong og prosjektet skal ha et så lavt CO₂-utslipp som mulig. Kjøpesenteret skal bygges på ett plan og både dekke, vegg og tak skal bestå av betong. Det skal brukes en fasthetsklasse på B 30 i vegger og tak samt bestandighetsklasse M 60, mens på gulv er fasthetsklasse B 20 tilstrekkelig.

Brukstiden på byggverket regnes å være 25 år.

Konstruksjonen jeg ønsker å bygge skal være på 140 m * 45 m som blir 6300 kvadratmeter. Jeg ønsker å bruke hulldekker i taket for å både kostnadseffektivisere byggverket, men også å minske CO₂-utslippet parallelt med betongmassen. Jeg har valgt å bruke hulldekker med tykkelse 265 for å kunne motstå den eventuelle snølasten på taket som i Stavanger ligger på 1,5 kN pr kvadratmeter. Grunnen til jeg har valgt 140 * 45 m på kjøpesenteret er fordi jeg tenker å bruke hulldekkemoduler på 15 m * 7 m, slik at det går opp med 60 stk av en slik type modul.

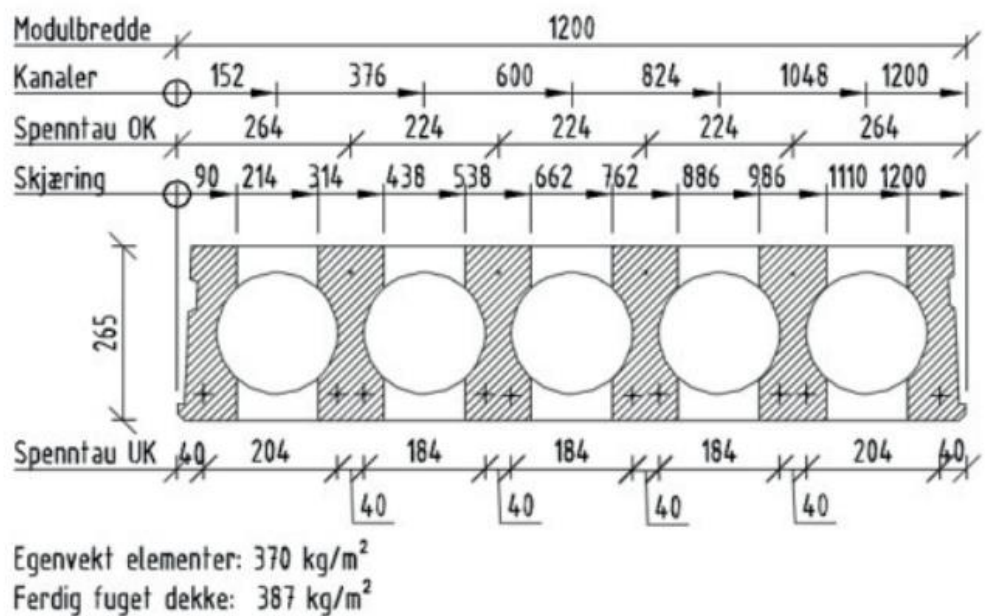
3.1 Beregning av betongvolum

Ved beregning av betongvolum antar vi en rimelig mengde armeringsstål.

3.1.1 Hulldekke

Som sagt skal jeg ha 60 stk av hulldekkemoduler på 15 m * 7 m, dette blir da kjøpesenterets areal på 6300 kvadratmeter. Jeg bruker hulldekkevolum lignende Dekkesystemer AS, som ser slik ut:

HD265

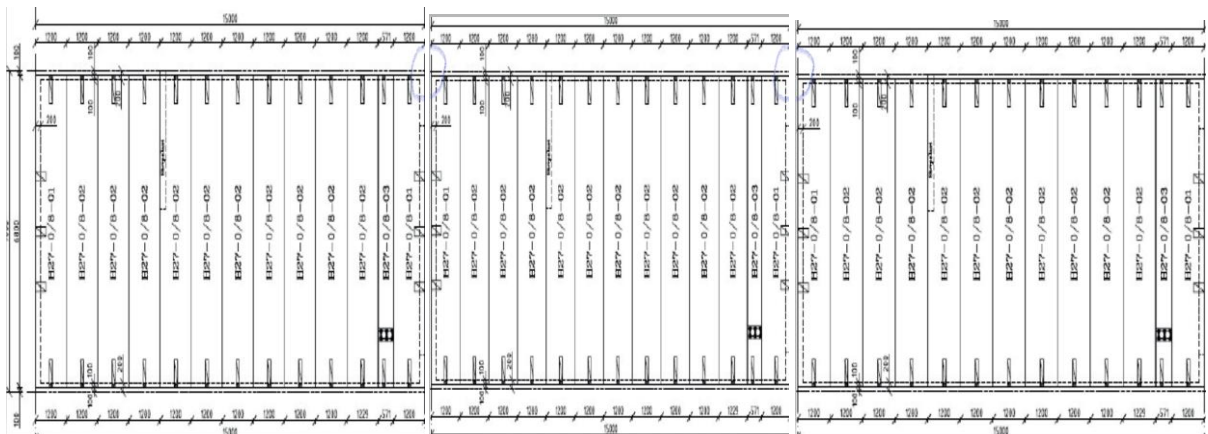


Figur 8 (Dekkesystemer, Hentet 2022)

Dette gir en betongvekt på tak på 6300 kvadratmeter * 370 kg pr kvadratmeter egenvekt element = 2 321 000 kg betong.

Hadde jeg ikke gått for hulldekke hadde betongen hatt et volum på 0,265 m * 140 m * 45 m = 1669,5 kubikkmeter, og en vekt på 1669,5 kubikkmeter * 2400 kg pr kubikkmeter = 4 006 800 kg, altså en økning på 73 prosent i vekt i forhold til hulldekket.

3.1.2 Søyler og bærebjelker



Figur 9 (Dekkesystemer, Hentet 2022)

For å holde oppe hulldekkene så trenger de kun støttepunkt i sin lengste retning altså ett 15 m langt spenn. Dette betyr at man får 3 moduler i kjøpesenterets bredde hvorav to rekker med søyler i midten. Siden vi trenger 20 rekker med hulldekkemoduler i kjøpesenterets lengde (7 m * 20) trenger vi da 19 søyler i lengden * 2 = 38 søyler. Jeg velger å gå for runde søyler siden det er mer estetisk fint på et kjøpesenter. Diameter på søylene er 0,5 m, som vil si at grunnflate er $\pi * 0,25 \text{ m} * 0,25 \text{ m} = 0,19635$ kvadratmeter. Vekten som ligger på søylen er $\frac{1}{4}$ av 4 hulldekkemoduler, altså det samme som vekten av en hel modul som blir; egenvekt 387 kg pr kubikkmeter ($387 * 0,265 \text{ m} * 15 \text{ m} * 7 \text{ m}$) = 10786 kg + snølast på 153 kg pr kvadratmeter (16060 kg) = 26846 kg på hver søyle.

Over hver søyle trenger vi bærebjelke i betong for å stabilisere kortsiden på hulldekkemodulene, denne bærebjelken er på 0,3 * 0,6. Det vil si vi får et bærebjelkevolum på $0,3 \text{ m} * 0,6 \text{ m} * 140 \text{ m} * 2 = 50,4$ kubikkmeter. Innvendig takhøyde er satt til å vær 3 m. Det vil si vi får søyler på 2,4 m, dermed ett søylevolum på $2,4 \text{ m} * 0,19635$ kvadratmeter = 0,47124 kubikkmeter. Totalt for 38 søyler får vi da 17,91 kubikkmeter.

3.1.3 Bankett og dekke

På banketten (grunnmuren) bruker jeg en dimensjon på 0,8 m * 0,4 m. Dette er for å understøtte veggene og fordele lasten ut i gulvet. Løpemetre på banketten blir 45 m + 140 m + 45 m + 140 m = 370 m. Det vil si at vi trenger 370 m * 0,8 m * 0,4 m = 118,4 kubikkmeter betong på selve banketten.

På grunnen beregner jeg utenom isolasjon og annet grunnarbeid 0,15 m tjukk betongdekke. Det vil si vi får 0,15 m * 45 m * 140 m = 945 kubikkmeter betong. Dette er grovt beregnet uten å beregne ekstra betongmasse for såle under ringmur og søylepunkter., så vi kan runde det opp til 1000 kubikkmeter.

3.1.4 Yttervegger

Ytterveggene beregner jeg uten utsparinger for innganger og eventuelle vinduer. Veggene får da en tykkelse på 300 mm. Da blir regnestykket 0,3 m * 2,2 m * 370 (løpemetre) = 244,2 kubikkmeter betong på ytterveggene.

3.1.5 Totalt

Totalt sett med hulldekke, bærebjelker, søyler, bankett, grunndekke og yttervegger vil det kreve et betongvolum på 244,2 + 1000 + 118,4 + 17,9 + 50,4 = 1430,9 kubikkmeter. Dette gir da en betongmasse på 1430,9 * 2400 kg pr kubikkmeter = 3 434 160 kg betong. Legger vi dette sammen med hulldekkevekten på 2 321 000 kg, vil vi da ende opp med en total betongmasse på 5 755 160 kg.

3.2 CO2-utslipp

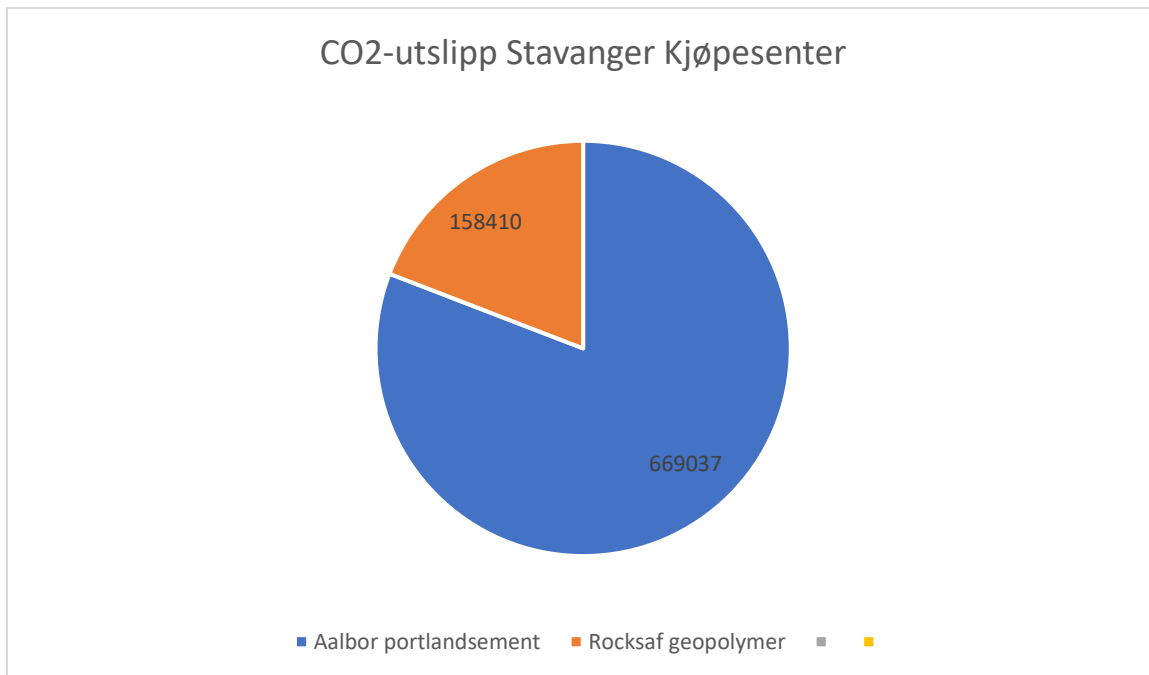
Det er en betydelig mengde med CO2 som blir sluppet ut i dette prosjekt hvor det er 5 755 160 kg betong. Jeg har gjennom dette prosjekt funnet ut hvordan man kan redusere utslippet mest mulig uten store kostnadskonsekvenser. Den største påvirkningen jeg har gjort er å bytte ut sementtype fra Aalborgs portlandsement til Rocksafes geopolymere. Dette gjør at jeg har redusert utslippet fra 775 kg pr 1000 kg sement til 190 kg pr 1000 kg sement, men jeg kan redusere det enda mer.

Jeg har beregnet for Rocksafes geopolimer et transportutslipp på 7,31 kg CO₂ pr 1000 kg sement, og antagelig er det også lavere enn det siden materialet er veldig lokalt. Tidligere har jeg funnet ut at om man kjører betongbilene på biodrivstoff kan man i snitt spare 90 prosent av transportens CO₂-utslipp, dette gjør at transportutslippet reduseres fra 7,31 kg til 0,731 kg pr 1000 kg sement. Biodrivstoff er ett begrenset materiale og man kan alternativt kjøre trommelen på betongbilen på batteri, dette gjør at CO₂-utslippet reduseres med 30 prosent.

CO₂-absorbering blir også en viktig del i fremtiden. For å kunne redusere CO₂-utslippet nærmere ett nullutslipp må man kunne dokumentere hvor mye CO₂ betongen tar opp igjen, for å igjen bruke denne dokumentasjonen til en miljødokumentasjon for prosjektet.

Luftfuktighet er også en viktig faktor, det har blitt funnet ut at for å ta opp mest mulig CO₂ må det være «en relativ fuktighet på 50 – 60 prosent regnes for det optimale» (Seehusen, 2013). Jeg har fortsatt ikke noen konkrete tall å vise til i forhold til casen når det gjelder CO₂-opptak.

Tatt alle muligheter for å redusere CO₂-utslippet i betraktning kan jeg endelig finne ut hvor mye CO₂-utslipp det faktisk er i dette prosjektet. Jeg har kommet fram til en så mye som mulig redusert utslippsfaktor på 183,5 kg CO₂ pr 1000 kg sement. Siden vekten jeg har funnet på betongmassen inkluderer vann og tilslag, må jeg multiplisere den med prosentandelen sement. I en trykkfasthetsklasse B 30 og bestandighetsklasse M 60 ligger sementandelen i betongblandingen på ca 15 prosent, vekten på den totale betongmassen var 5 755 160 kg. Det vil si at vi får en sementvekt på $5\,755\,160\text{ kg} * 0,15 = 863\,274\text{ kg}$. Da må vi først dividere sementvekten på 1000, som blir 863,274 kg. Så multipliserer vi med utslippsfaktoren for Rocksafes geopolimer som er på 183,5. Dette gir ett CO₂ utslipp på 158 410 kg. Hadde man brukt Aalborgs portlandsement som har en utslippsfaktor på 775 kg Co₂ pr 1000 kg sement, ville man endt opp med 669 037 kg CO₂-utslipp.



Enhet: antall kg CO2-utslipp

3.3 Styrke og kost

Når det gjelder styrken til betongen er det fasthetsklasse B 30 som er kravet til vegger, søyler og tak, og B 20 for gulv, samt bestandighetsklasse M 60 som sørger for at betongen skal oppfølge de gitte bestandighetskravene: «Ingen risiko for korrosjon eller angrep», «Korrosjon framkalt av karbonatisering» og til en viss grad «Fryse-/tineangrep». Disse kravene er oppfylgt og tatt med i beregningen når det gjelder dimensjonering av de ulike bygningsdelene. Når det gjelder valg av sementtype i forhold til styrkedelen er dette en materialtype som er passende for et prosjekt som ikke er ekstremt krevende med tanke på at kjøpesenteret bare er på ett plan. Skulle man ha prosjektert ett mer krevende og større byggverk ville kanskje lavvarmebetong blitt et solid alternativ med tanke på for eksempel de rissfrie egenskapene den innehar.

I forhold til kost vil jeg si at målsetningen om å redusere CO2-utslippet mest mulig uten betydelige kostnadskonsekvenser er oppnådd. Vi har valgt et produkt som vil tilby en konkurransedyktig pris, som videre bidrar til at det ikke blir et tapsprosjekt. Det er også verdt å nevne at Rocksafes geopolymere er en sementtype som er anskaffet lokalt og dermed gir mindre kostnader. I tillegg, om det skulle være noen ekstrakostnader i forhold til valg av en mer miljøvennlig materialtype, så vil en miljøgevinst på opptil 65 prosent (avhengig av

dokumentasjon og godkjenninger) komme til gode på den delen av prisen som overstiger det konvensjonelle alternativet.

4 Konklusjon

I dagens samfunn er det stort fokus på global oppvarming og utslipp av CO₂. Man blir påminnet og anbefalt til å velge de riktige alternativene når det gjelder framkomstmidler og industrielle verktøy. Regjeringen prøver stadig og finne måter å kutte ned på utslippet uten at det får for store konsekvenser for produksjon, tjenester og økonomi. Man kan ofte finne miljøgevinster i mange forskjellige typer scenarier i hverdagen, det kan være alt i fra parkeringsfordeler til elbilbrukere, til BREEAM-sertifisering i store byggkonstruksjoner. I betongindustrien finnes det som sagt også miljøgevinster for å redusere CO₂-utslipp, og det er mange forskere som lever av å finne bedre og mer miljøvennlige alternativer i betongen. Industrien har kommet en lang vei og man kan allerede se at konvensjonelle alternativer gradvis vil bli erstattet av nye miljøvennlige alternativer.

Hvordan kan man redusere CO₂-utslippet i betong så lavt som mulig?

Gjennom denne bacheloren har jeg lært om mange metoder for å redusere CO₂-utslippet i betong. Jeg har også funnet ut at utskifting av sementtype er mer aktuelt enn det jeg først trodde. For er det noe man må gjøre for å redusere CO₂-utslippet betraktelig, så er det nettopp utskifting av sementtype. Dette er den viktigste faktoren, fordi sementen står for 90 prosent av det totale CO₂-utslippet når det gjelder bygging av en betongkonstruksjon. Her har jeg lært at sementtyper som ikke inneholder kalkstein og ikke må gjennom en produksjonsprosess som kalles sintring (smelting i ovn på opp til 1500 grader) er de mest miljøvennlige typene. Denne produksjonsmetoden er per dags dato den vanligste og er og bør være på vei ut for å ha en bærekraftig produksjonsprosess innen betongfaget.

Jeg har også lært at selv om andre metoder enn sementutbytting, som reduserer miljøutslippet ikke har like stor påvirkning, er fremdeles viktig å tenke miljøvennlig der man kan. Og ofte har det ikke store kostnadskonsekvenser, som for eksempel endring av transport, fra dieseldrevne betongbiler til biogass- eller batteridrevne. Man kan også spare miljø mye for CO2-utslipp ved å velge de mest sparsomme løsningene når det gjelder betongmasse, som for eksempel kan du nesten halvere betongmassen i betongdekke ved å bruke hulldekke istedenfor tett betongdekke, derav halvere CO2-utslippet på den opprinnelig tenkte betongmassen. Betongen har også en absorberende effekt, som gjennom studier absorberer fra 60 – 70 prosent av utsluppen CO2 gjennom sin levetid. Dette må studeres mer på for å kunne dokumenteres inn i miljødokumentasjonen til de fremtidige prosjektene, slik at folk endrer sitt syn og sine fordommer mot betong.

Jeg vil derfor konkludere med at man kan med ytterligere metoder redusere CO2-utslippet i betongen, og dette uten betydelige styrke eller kostnadskonsekvenser.

5 Referanseliste

Betongfokus. (2019, Mars 27). *Betongfokus*. Hentet fra Geopolymerbetong:
<https://www.betongfokus.no/2019/03/27/geopolymerbetong/>

Betongsentrum. (Hentet 2022). *Betongsentrum*. Hentet fra Valg av riktig betongkvalitet:
<https://www.betongsentrum.no/valg-av-riktig-betongkvalitet/>

Betongsentrum. (Hentet 2022). *Betongsentrum*. Hentet fra Lavkarbonbetong:
<https://www.betongsentrum.no/lavkarbonbetong/?msclkid=a6ede885d12611ecbe871fbf25302e34>

Dekkesystemer. (Hentet 2022). *Dekkesystemer*. Hentet fra Hulldekke: <https://dekkesystemer.no/wp-content/uploads/hulldekke-brosjyre-dekkesystemer-as-nettversjon2.pdf>

EPD-Norge. (hentet 2022). *EPD-Norge*. Hentet fra hva er en epd: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/>

Gabrielsen, I. M. (2022, Mars 31). Saferock. (J. Thue, Intervjuer)

Innovasjon Norge. (2021, Desember 14). *Innovasjon Norge*. Hentet fra Statsstøtteregelvekret:
<https://www.innovasjonnorge.no/no/tjenester/finansiering2/statsstotteregelvekret/stotte-til-investeringer-i-tiltak-for-miljobeskyttelse-utover-eu-standarder-eller-okt-miljo-beskyttelsesniva-dersom-det-ikke-finnes-eu-standarder-gber-art.-36/>

Norbetong. (Hentet 2022). *Norbetong*. Hentet fra Trommel-transport:
https://www.norbetong.no/no/TrommEL_Transport

Norcem. (Hentet 14.02.2022). *Norcem*. Hentet fra Sementproduksjon og CO2:
<https://www.norcem.no/no/sementproduksjon-co2>

Norcem. (Hentet 2022). *Norcem*. Hentet fra Lavvarmebetong med Norcem-sement:
<https://www.norcem.no/no/lavvarmebetong>

Norsk betongforening. (2016). *Norsk betongforening*. Hentet fra Visste du dette om betong og miljø?:
<https://betong.net/wp-content/uploads/17966-Visste-du-dette-om-betong-og-milj%C3%B8-WEB.pdf>

Saferock. (Hentet 2022). *Saferock*. Hentet fra What we do: <https://www.saferock.no/#what-we-do>

- Schwenk. (2020, Mai 19). *EPD-Norge*. Hentet fra Schwenk lavvarmesement: https://www.epd-norge.no/getfile.php/1313490-1589962884/EPDer/Byggevarer/Sement/NEPD-2209-995_SCHWENK-Lavvarmesement--Cem-III-B--42-5-L-LH-SR--na-.pdf
- Seehusen, J. (2013, Mars 31). *Tu bygg*. Hentet fra Betong og co2: <https://www.tu.no/artikler/betong-spiser-co2/234261>
- Solberg, M. G. (2016, Mai 31). *TU*. Hentet fra Betongproduksjon: <https://www.tu.no/artikler/betong-star-for-5-prosent-av-verdens-co2-utslipp-slik-skal-forskerne-lage-en-sterkere-og-renere-variant/347625>
- Spenncon. (Hentet 2022). *Spenncon*. Hentet fra Betong og miljø: <https://spenncon.no/spenncon/om-spenncon/enok-losninger/betong-og-miljo/>
- Statens vegvesen. (2015, Mars 12). *Byggeindustrien*. Hentet fra Flyveaske skal gjøre bruene mer solide: <https://www.bygg.no/flyveaske-skal-gjore-bruene-mer-solide/1229661/>
- Strephonsays. (Hentet 2022). *Strephonsays*. Hentet fra <https://no.strephonsays.com/calciation-and-sintering-2836#:~:text=De%20n%C3%B8kkelforskjell%20mellom%20kalsinering%20og%20sintring%20er%20det,Kalsinering%20og%20sintring%20er%20to%20forskjellige%20pyrometallurgiske%20oprosesser.>
- Thue, J. V. (2019, Juni 16). *Store norske leksikon*. Hentet fra Betong: <https://snl.no/betong>
- Thue, J. V. (2022, Februar 3). *Store norske leksikon*. Hentet fra varmegjennomgangskoeffisient: <https://snl.no/varmegjennomgangskoeffisient>
- Unicon. (Hentet 2022). *Unicon*. Hentet fra Miljøvennlig transport: <https://www.unicon.no/produkter-tjenester/transport-og-pumping/miljovennlig-transport/>
- Valide. (Hentet 2022). *Valide*. Hentet fra Portfolio Saferock: <https://valide.no/portfolio/saferock>
- Aalborg Portland AS. (2017, Oktober 06). *EPD-Norge*. Hentet fra Aalborg Portland cement: https://www.epd-norge.no/getfile.php/138070-1507458232/EPDer/Byggevarer/Sement/NEPD-1419-466_Aalborg-Portland-BASIS---cement.pdf
- Årtun, T., Nesse, N., & Eide, I. B. (2021, Desember 14). *Store norske leksikon*. Hentet fra Sement: <https://snl.no/sement>

6 Vedlegg

6.1 Schwenk lavvarmesement datablad



Teknisk datablad

Lavvarmesement

CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na)

Rüdersdorf

Sammensetning:	Slaggsement
Bruk:	Til bruk i betongproduksjon. Elementindustri, ferdigbetong og injeksjon.
Egenskaper:	Lav varme- og herdeutvikling. Lavt CO ₂ avtrykk.

Tilfredsstill kravene ihht. EN 197-1: CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na)
Produktet er sertifisert (CE-merket) ihht. EN 197-1 av VDZ, Tyskland

Typiske data:

Fysiske data

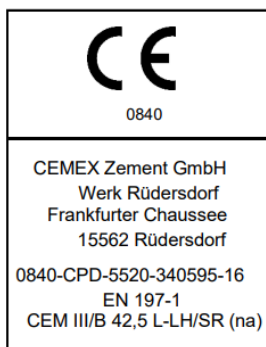
Finhhet(blaine)	4700 cm ² /g
Densitet	2,98 g/cm ³
Bulkdensitet	1,1g/cm ³
Andel slagg	Ca 70%
Bindetid	230 min
Ekspansjon	0,3 mm

Trykkfasthet

2d	28 MPa
7d	36 MPa
28d	58 MPa
56d	64 MPa

Kjemiske data

		vekt %
Kalk	(CaO)	49
Silisium	(SiO ₂)	31
Aluminium	(Al ₂ O ₃)	8,3
Magnesium	(MgO)	6,1
Sulfat	(SO ₃)	2,1
Jern	(Fe ₂ O ₃)	1,6
Kalium	(K ₂ O)	0,6
Natrium	(Na ₂ O)	0,3
Alkali ekv.	(Na ₂ Oekv)	0,79
(C ₃ A)		5,3
Glødetap	(L.O.I)	0,7
Uløselig rest	(i.r)	0,2
Vannløslig klorid	(Cl)	0,05
Vannløslig krom	Cr ^(VI)	< 2 mg/kg



Teknisk spørsmål:

Lars Busterud, tel 908 90 668

- E-Mail lars.busterud@schwenk.no

Versjon August 2019

SCHWENK Norge AS
Grønland 70A, 3045 Drammen
Telefon: +47 31 02 10 11
E-Mail: info@schwenk.no · www.schwenk.no

Informasjonen i denne publikasjonen er basert på gjeldende kunnskap og erfaring. De gir en referanseverdi for grunnleggende egnethet og må matches av tester og forsøk av prosessoren til den spesifikke applikasjonen. For dette må de tilsvarende gyldige lover, standarder og retningslinjer samt de generelt anerkjente reglene for byggtknikk overholdes. Ved publisering av dette tekniske databladet mister tidligere tekniske datablad deres gyldighet. Endringer i rammeproduktet og applikasjonsteknikkutviklingen er reservert. Våre salgs- og leveringsbetingelser i gjeldende versjon gjelder for alle forretningsforbindelser.

God arkitektur varer lenge

Varig og robust betong har stor betydning for god ressursbruk og bevaring av samfunnsinteresser.

Jan Eldegard Hjelle
Daglig leder i FABEKO

«Snart elsker alle betong» skrev byforsker og førsteamanuensis Erling Dokk Holm ved Høyskolen Kristiania i et innlegg i Dagens Næringsliv. Betong i kulturdebatten er aktuelt som aldri før med en langvarig diskusjon rundt den eventuelle rivningen av bygg i Regjeringskvartalet. Vi har betongkulturskatter som Ekebergrestauranten, gjenåpnet i 2005, og kraftstasjonen i Suldal med sin karakteristiske UFO-form som er bygget om til hotell. I Norges nye verdensarvområde mellom Notodden og Rjukan ligger nærmere 100 betongbygg som er vernet. Bygges det riktig vil man ha konstruksjoner med lang levetid og unngå kostbare og miljøbelastende vedlikeholdsarbeider.

Produksjon av betong krever energi og medfører utslipp av CO₂. Med riktig prosjektering og design vil kvalitetstilpassing av byggverk kunne redusere de totale miljøbelastningene, også med tanke på endret bruk i fremtiden. Betong har gode forutsetninger for holde både styrke og utseende over tid og kan motstå de fleste langtidsbelastninger på en god måte. Valg av bestandige materialer gir store gevinster i vedlikeholdsbudsjettet, som igjen vil redusere byggets totale utslipp, ressurs- og energibruk. Smartere design og prosjektering utnytter materialene mer effektivt og fører til redusert materialforbruk og dermed bedre miljøprofil for de ferdige byggen og anleggskonstruksjonene.

Vi ser imidlertid en farlig forenkling i samfunnets syn på hva som er bærekraftig utvikling. Bærekraft knyttes ofte ensidig mot miljø, og miljøforhold knyttes enda oftere kun til klimagassutslipp fra råmaterialer. Enkelte står faktisk fram og prediker denne suboptimalisering, og dette er farlig for samfunnsutviklingen og en avsporing av arbeidet for miljøvennlig bygging, som jo alle forventer også skal være bærekraftig.

Når det gjelder kommunale bygg kan det som er kalt kortsiktighetens tyranni gjøre at beregninger av kostnader for framtidig vedlikeholdsbehov nærmest neglisjeres som følge av de diskonteringsreglene som benyttes. Svært mange kommunale bygg ikke har verdi i balansen til norske kommuner. De skrives av når de er ferdigstil. I private bygg (blant annet boligene våre) ligger



Hotell 33 i Oslo.

Foto: Ole H. Krokstrand/Byggutengrenser

verdien inne og byggene må vedlikeholdes jevnt for at de eventuelt skal kunne selges senere uten at vi må ta tap. Dersom en ikke regner med denne lønnsomheten med vedlikehold, vil det for mange kommuner lønne seg at byggene forfaller, rives og bygges nye igjen. Da flyttes kostnadene fra drift over til investeringer/bevilgninger. En slik kortsiktighet kan man frykte fører til at samfunnet bygger framtidige vedlikeholdsbomber.

Det som kjennetegner mange av innspillene i media, er at noen materialer framheves som å være mye bedre enn andre med hensyn til bærekraft og miljø. Når vi ser resultatene fra sammenlignende undersøkelser, finner vi imidlertid at det ikke er mulig å trekke slike konklusjoner. Det er måten produktet (som ikke er det samme som materialer) benyttes på som avgjør, ikke produktene alene. Og organisk er ikke det samme som miljøvennlig. Det er et selvsagt ansvar for alle aktørene i byggebransjen å planlegge for langsiktighet og bærekraft. Dette innebærer arkitektur og byggeteknikk som ivaretar både miljøforhold og lønnsomhet i byggets levetid. Valg av varige og robuste betongløsninger har stor betydning for god ressursbruk og bevaring av samfunnsinteresser.

Ifølge en rapport fra Prognosesenteret i 2016 må norske kommuner øke kostnader til vedlikehold fra dagens 2,1 milliarder kroner per år til 5,4 milliarder kroner per år i 2030 for å ta igjen etterslepet i vedlikehold. Dette vil skje i en situasjon der mange andre kommunale oppgaver står i kø og vil slåss om midler. Byggen planlegges for 25-50 års levetid mens mange i dag



Utdrag fra rapport fra Prognosesenteret for Byggutengrenser 2016.

er 80 år og eldre. Det er lettere å utsette vedlikehold av en skole enn ikke å ha plass til de elevene som står ved døren og venter. Denne rapporten er tilgjengelig på www.byggutengrenser.no

En fasade i betong kan stå i 100 år med lave eller ingen vedlikeholdskostnader dersom den er prosjektert korrekt.

Med et stadig tøffere klima blir robusthet mot nedbør, vind og andre belastninger enda viktigere. Bygg av betong råtner ikke og står mot både naturens krefter og andre ekstreme belastninger. I storm og uvær er faktisk byggenes vekt og stabilitet viktig. I år 2100 vil de fleste bygg vi oppfører i dag være i bruk, og 2,1 millioner av disse norske byggene vil ha høy råterisiko. Dette må tas hensyn til i prosjekteringen av nye bygg og ved ombygging. En lang rekke svært gamle norske betongbygg dokumenterer levetidsegenskapene til de mineraliske byggematerialene.

En stor del av den varige norske

nasjonalformuen er bygget med betong. Noen eksempler er vegger, tunneler og broer, energiforsyning, avløpsystemer, olje- og gassproduksjon, bygg for helsevesenet, offentlig forvaltning og forsvar samt leiligheter. Listen er lang, og det er ikke tilfeldig!



Stabekk stasjon.

Foto: Jan Eldegard Hjelle



Nye sementtyper og ny produksjonsteknologi skaper framtidens betong

Norsk Betongforenings Miljøkomité er i ferd med å presentere en artikkelserie i Byggeindustrien for å spre kunnskap rundt temaet betong og miljø. Her kommer forfatterne nærmere inn på nye sementtyper.

Petter Thyholdt, Knut O. Kjellsen og Liv-Margrethe H. Bjerge
Norcem AS (FoU),
HeidelbergCement Norge

Dagens betonger lages med langt lavere karbonavtrykk enn tidligere, ikke minst takket være nye sementtyper og ny produksjonsteknologi. I de kommende årene vil nye typer råmaterialer, bruk av klimanøytrale energikilder, nye sementtyper og karbonfangst bidra til en ytterligere fornyelse av materialet betong. Karbonnøytrale betongprodukter er målet for videre utvikling. Vi vil i denne artikkelen gå gjennom hvordan norsk sementindustri arbeider for å redusere CO₂ utslipp og miljøbelastningen fra sementproduksjon.

Framstilling av Portland sement

Sement består i enkelhet av malt

Portland klinker og gips. Kalkstein, som er det viktigste råmaterialet ved produksjon av Portland klinker inneholder ca. 40 % CO₂ i fast form. Under produksjon av Portland klinker, spaltes CO₂ fra kalksteinen i en prosess der kalkstein kalsineres og slippes ut i atmosfæren. Kalsinering og klinkerdannelse krever mye energi. Denne energien fås fra forbrenning av brennstoffer. Denne forbrenningen er den andre kilden til CO₂ utslipp ved klinker produksjon. Sementindustrien har siden 1980 tallet redusert sine spesifikke CO₂ utslipp (dvs. kg CO₂/tonn sement) vesentlig.

Erstatning av Portland klinker med substitutt materialer

Sementindustrien er blitt flinke til å erstatte deler av Portland klinker med andre materialer som har lignende kjemisk/mineralsk sammensetning. Dette er gjerne restmaterialer fra annen industri.

Siden de er restmaterialer er det ikke knyttet CO₂ utslipp til disse materialene. Iht. internasjonale Standarder allokeres CO₂ utslipp til hovedproduktet i en produksjonsprosess, og ikke til restmaterialet. At disse restmaterialer nå erstatter en andel sementklinker fører følgelig til at CO₂ utslippet pr. tonn sement reduseres. Dette er en svært fornuftig bruk av disse restmaterialene da de ofte gir sementen forbedrede tekniske egenskaper, og alternativet i mange tilfeller ville være å deponere disse restmaterialene.

På verdensbasis er flygeaske (fra forbrenning av kull i varmekraftverk), slagg (fra stålindustri) og kalkstein de vanligste materialene som erstatter Portland klinker. Norcem bruker i dag flygeaske og kalkstein som substituttmaterialer i sine sementprodukter. For eksempel, er substituttgraden 22% i vårt hovedprodukt (Norcem Standard FA sement). For

Standard FA innebærer denne bruken av substituttmaterialer en reduksjon i CO₂ utslipp på omkring 20% pr. tonn produsert sement, i forhold til om sementen ikke hadde inneholdt substituttmaterialer.

Bruk av alternativt brennstoff

Allerede på slutten av 80-tallet startet Norcem med bruk av alternative brenslers som erstatning for kull. Fabrikken i Brevik har nå erstattet 70% av kullet med avfallsbaserte brenslers, og denne andelen vil fortsette å øke i årene fremover. Dette er en vinn-vinn situasjon; avfall som ellers gjerne ville være et problem for samfunnet å bli kvitt, brukes som brennstoff i sementproduksjon og vi reduserer bruken av kull. En del av det alternative brennstoffet er såkalt CO₂ nøytralt (biomasse), dvs. at det iht. regelverket ikke er knyttet CO₂ utslipp til forbrenning av disse

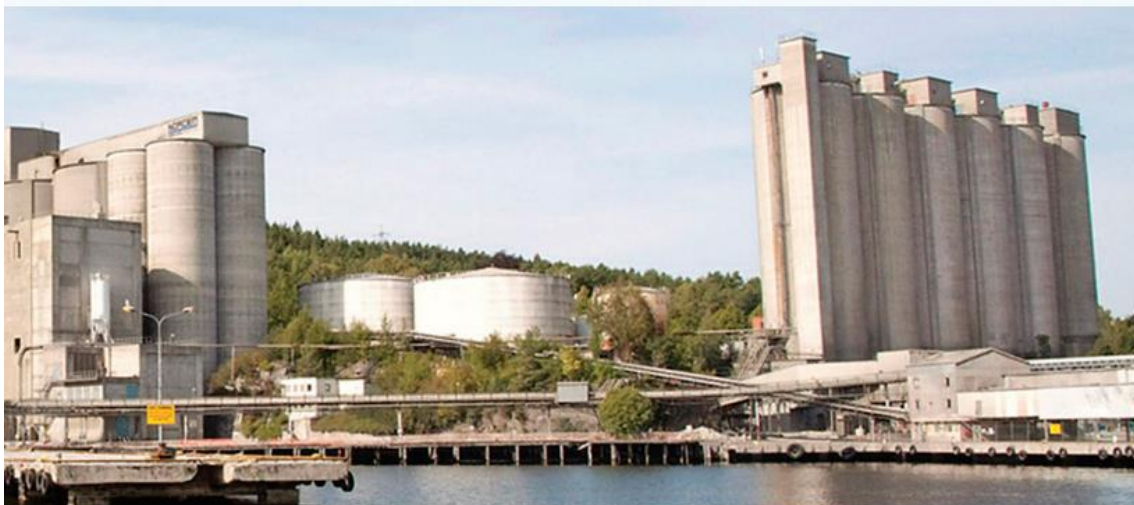


Foto: Norcem AS

brennstoffene. Dette er for eksempel trevirke, flis og papir. Bruk av CO₂ nøytralt brennstoff har ført til at CO₂ utslippet pr. tonn Portland klinker er redusert betydelig. Figur 1 viser hvordan andelen kull av den totale brennstoffmengden er gått ned de siste tiårene. Omkring 30% av det alternative brennstoffet er i dag biomasse ved sementfabrikken i Brevik.

Betydelige kutt i svovel- og nitrogenutslipp

Et hovedfokus for sementindustrien, nå og fremover, er å redusere miljøutslippene. I tillegg til å redusere CO₂ er det stort fokus på å redusere NO_x og SO₂ utslipp. Som tiltak for å redusere disse miljøutslippene har Norcem Brevik installert både NO_x- og SO₂ renseanlegg de siste årene. Som følge av dette er utslippene av NO_x og SO₂ redusert med bortimot 70 %.

Nye klinkertyper

Et annet fokusområde for å være

i stand til å redusere CO₂ utslippene er utvikling av nye alternative bindemidler og teknologier som fungerer uten konvensjonell Portland klinker. Et alternativ som HeidelbergCement har jobbet med i noen år er BCT klinker (BCT - Belite Calciumsulfoaluminate Ternesite). Denne klinker typen produseres med samme teknologi og produksjonsutstyr som Portland klinker, men med en annen råmaterialtilsetning.

Dersom denne klinkeren kommer i produksjon vil man kunne redusere CO₂ utslipp med ca. 30% pr tonn klinker. Dette p.g.a. lavere kalksteinsmengde samt at brennstoff mengden i ovnen kan reduseres med 10% p.g.a. lavere ovnstemperatur. Strømforsøk ved nedmaling av klinker i sementmøllene reduseres med ca. 15% p.g.a. en mer lettmalt klinker. Det er kjørt fullskalaforøk i flere fabrikker HeidelbergCement som ser lovende ut, så arbeidet med å utvikle dette videre fortsetter.



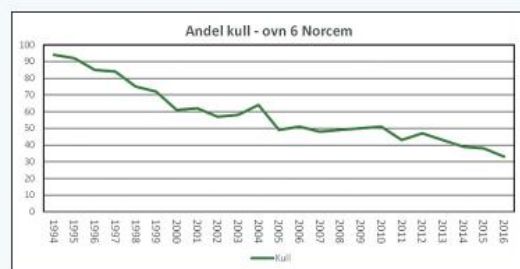
Foto: Norcem AS

CO₂-fangst

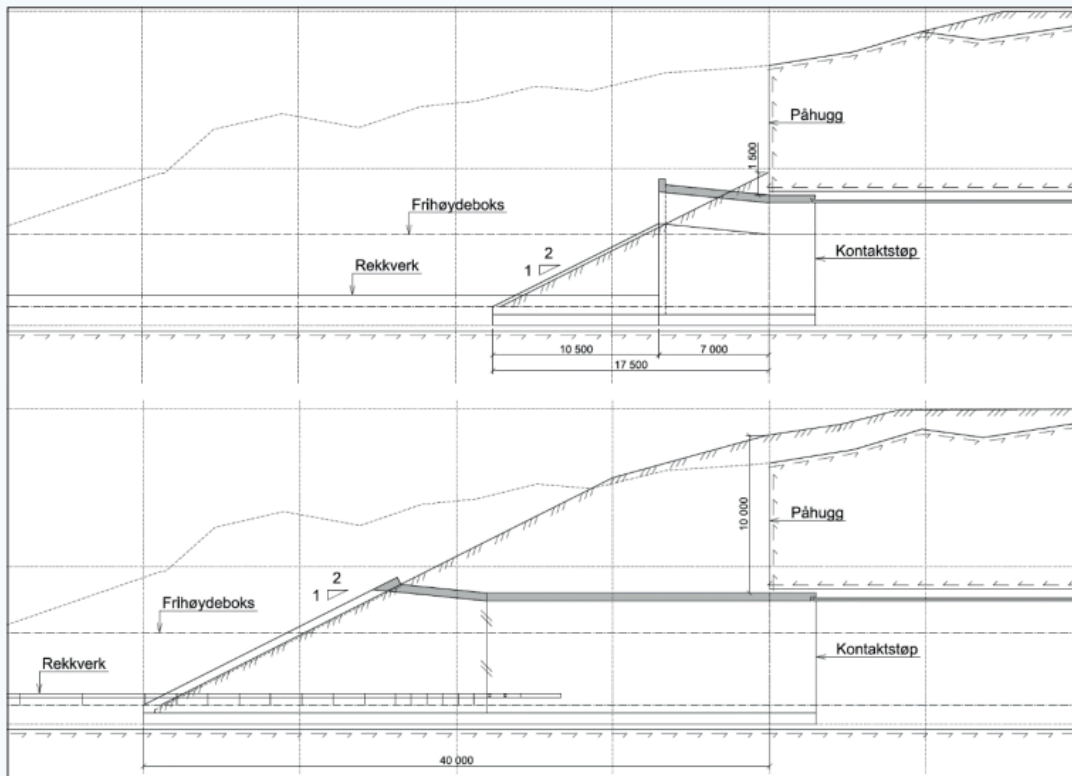
Norcem og HeidelbergCement Nord Europa har en visjon om at betongprodukter i 2030 skal være CO₂ nøytrale over sin levetid. Karbonfangst fra klinkerovnen ved fabrikken i Brevik er avgjørende for å nå denne visjonen. Norcem har tatt ansvar og vist lederskap for å utrede mulighetene for karbonfangst i Norge og i sementindustrien. I 2013 fikk Norcem støtte fra Gassnova til å etablere et testanlegg for CO₂ fangst. I årene frem til 2017 er fire ulike teknologier fra flere leverandører testet ut under reelle prosessforhold. Testingen er avsluttet og har gitt oss nyttig kunnskap om mulighetene for å redusere CO₂ utslippene fra sementindustrien. Basert på erfaringene fra testperioden er aminteknologien til Aker Solution vurdert som mest moden og klar for fullskala demonstrasjon i Brevik.

Våren 2017 ble Norcem tildelt ytterligere støtte fra Gassnova til

videre konseptstudie av karbonfangstanlegg i Brevik og arbeidet ble avsluttet høsten 2017. P.g.a. nedskjæringer i statsbudsjettet for 2018 til ytterligere studier av fullskala anlegg for CO₂ fangst, er videre arbeid med karbonfangstanlegget ved Norcems sementfabrikk i Brevik lagt på is. Fullskala karbonfangst krever svært omfattende investeringer og er ny og risikofyllt teknologi, slik at myndighetene må hjelpe til. Satsing på fullskala karbonfangst og lagring i Norge skal behandles i Stortinget i løpet av våren og det er forventet et vedtak i forbindelse med revidert statsbudsjett i juni. Norcem håper på positivt vedtak og at det bevilges ytterligere offentlige midler til videreføring av arbeidet med fullskala karbonfangstanlegg ved fabrikken i Brevik. En fullskala realisering på Norcem vil være et viktig bidrag for Norge i å oppfylle sine utslippsforpliktelser.



Figur 1: Andelen kull brukt i klinkerovnen ved Norcems fabrikk i Brevik.



Lengdesnitt kort og lang tunnelportal.

Å bruke materialer smartere gir lavere klimagassutslipp

Om målene i Nasjonal transportplan NTP skal oppfylles, vil de store anleggsprosjektene som f.eks Intercityutbyggingen til BaneNOR og vegprosjekter som Fergefri E39 til Statens vegvesen øke nasjonens totale årlige klimagassutslipp vesentlig.

**Ketil Søyland,
Daniela Bosnjak,
Christer Wolden og
Christopher Garman**
- alle Norconsult

Disse prosjektene vil påvirke Norges mulighet til å klare en klimagassreduksjon på 40% innen 2030. Statens vegvesen angir utslipp på ca 35 tonn CO₂ pr mill kroner investert. Målene i NTP er minst 1000 mrd kr og disse vil

gi et klimagassutslipp på 35 mill tonn CO₂. Fordeles dette ut over NTP-perioden på 10 år, tilsvarer det en økning av Norges årlige utslipp på 10%.

Norconsult ser at utslipp i byggefasen normalt utgjør mer enn 80% av prosjektets samlede utslipp i prosjektets levetid. Det betyr at de valg som gjøres av planleggere i dag har direkte betydning på om nasjonale mål fremover oppnås. I denne artikkelen vil vi diskutere hvordan vi rådgivere kan bidra

til å redusere klimagassutslipp og et mer bærekraftig samfunn.

Fokusert innsats i prosjekteringsfasen

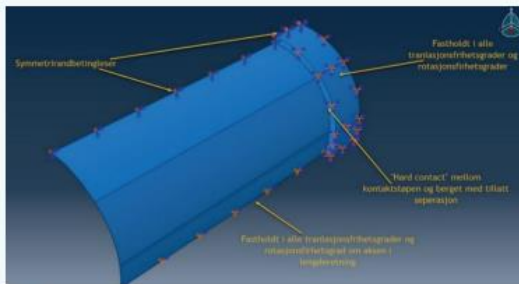
Smarte og bærekraftige løsninger kommer ikke av seg selv. Krav i norske standarder, håndbøker og andre byggherrekraav begrenser kreativiteten i å finne nye og mer innovative løsninger.

Mange i privat sektor har vært flinke til å sette seg en målsetting når det gjelder utvikling av mer

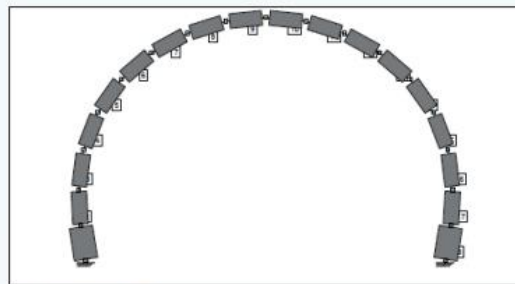
bærekraftige bygg. Innenfor anleggssektoren har utviklingen kommet kortere. Prosjektene har høyt fokus på krav til ytre miljø, forurensete masser osv., men lite fokus på reduksjon av klimagassutslipp. Vi erfarer at best effekt i oppnås om man får på plass en god målsetting for prosjektet allerede når konseptvalg foretas.

Fokus på å redusere mengder

For å redusere klimagassutslipp, er det like viktig eller viktigere å re-



3D beregningsmodell



2D beregningsmodell

dusere mengder som å fokusere på utslippsfaktoren for materialer.

Dette kan eksemplifiseres med en kort tunnelportal som får mye synlig fjellskjæring sammenlignet med en lengre portal med en mer naturlig terengtilpasning. Det kan være mange meninger om hva som er arkitektonisk riktig, men om målet er å redusere klimagassutslippet, kan en kort portal være fordelaktig. I figurene over vises en tunnelportal der klimagassutslippet, ved å velge den korte portalen, er redusert med over 70%. Kostnadene ble redusert tilsvarende. Om løsningen ikke er så banebrytende i seg selv, illustrerer det godt effekten ved å vurdere og velge løsning også ut fra et klimagassperspektiv.

Vi har også sett at konstruksjoner i anleggssektoren ofte har et stort potensial for optimalisering, da de av forskjellige grunner som tid, prosjekteringskostnad, kunnskap blir overdimensjonert. Selvfølgelig skal det prosjekteres og bygges robuste konstruksjoner, som tåler krav til levetid og sikkerhet gitt i norske standarder. Optimalisering av en konstruksjon kan innebære forenklinger og andre besparelser som man kan identifisere ved bruk av mer avanserte beregningsverktøy og grundig vurderte konstruksjonsløsninger og prinsipper.

I Norconsult har vi gjort en regneøvelse der vi har beregnet den lange portalen i figuren med et 2D-ramme verktøy (G-Prog) og et Finite element program (Abacus). Beregningene viser at ved bruk av en mer nøyaktig beregningsmodell, modellering av geometri og laster osv., kan vi redusere armeringsmengden med 33%. Dette er en vesentlig reduksjon og vil totalt sett spare prosjektet for kroner, tid og ikke minst klimagassutslipp.

Optimalisering av konstruksjonsløsninger, beregningsmodeller og beregningsverktøy

Prosjekteringen skal alltid tilstrebe å optimalisere konstruksjonene for å oppnå lavest mulig pris.

Likevel er det ofte slik at konstruksjonene ikke er så optimalisert som de kunne blitt. Ofte blir det satt av for kort tid til prosjektering fordi det er stort konkurransepress på antall prosjekterings timer. Andre ganger skal prosjektene gjennomføres med korte frister, f.eks. ved totalentrepriser. Det er også veldig vanlig å generalisere for å unngå variasjoner i geometri/armeringsføring eller konstruksjonstype som kan bidra til å forenkle og forkorte byggetid. Noen ganger er det prosjekterende eller byggherres ønske om en robust konstruksjon som er styrende, der robusthet kan forekles med overdimensjonert konstruksjon.

Man skal heller ikke undervurdere effekten av uklart og upresist regelverk som resulterer i mange konservative antagelser i prosjekteringen. Jordtrykk på nedgravde konstruksjoner er et typisk eksempel på dette. Generalisert regelverk kan medføre unødvendige fravikssøknader, som igjen kan medføre at et prosjekt ikke alltid velger optimal løsning, fordi man ikke bruker muligheten til å søke fravik.

Det er potensiale for optimalisering av alle typer konstruksjoner. Samtidig er det noen konstruksjonstyper som peker seg ut. Størst potensiale har konstruksjoner som det bygges mest av, som støtter, kulverter, portaler og korte bruer i betong. Når det gjelder de større bruene som hengebruer, skråstagsbruer, fritt-frembyggsbruer, osv, vil disse normalt være optimalisert på grunn av utfordringer til spennvidder, kostnad for fundamentering og annet.

Denne optimaliseringen utføres ikke i like stor grad for små og mellomstore betongkonstruksjoner. Der har andre funksjoner og formingsmessige ønsker ofte prioritet.

Hovedandelen av bruer som bygges er små og mellomstore konstruksjoner. Derfor vil optimalisering av disse konstruksjonene totalt sett kunne gi stor gevinst i form av reduserte klimagassutslipp.

Det bør stilles strengere krav til prosjekterende om å optimalisere

konstruksjoner, samtidig som de selv velger metode og verktøy. Det som kan være aktuelt å bruke er:

- 3D FEM-modellering med nøyaktig modellering av geometri og randbetingelser
- Ikke-lineære analyser eller dimensjonering med ikke-lineær betongmodell
- Samvirkeanalyser av nedgravde konstruksjoner,
- Bruk av lavere sikkerhetsfaktorer kombinert med strengere kontroll ved utførelse

Gode ideer er viktige

Det å være kreativ og gjennomføre kreative prosesser for å finne de gode ideene er viktig for å få til betydelige reduksjoner av et prosjekts klimagassutslipp. Det kan være en utfordring at man lett å forelese seg i enkelte ideer, uten at de er begrunnet skikkelig i forhold til hvilken klimagassreduksjon ideene kan gi. Det er derfor viktig at mulige løsningsforslag evalueres på en analytisk måte med sammenlignbare kriterier som utslippsfaktorer for de forskjellige materialene som inngår i et produkt. Et godt klimagassbudsjett, der materialer dokumenteres med Miljøvaredeklarasjoner (EDP), er nøkkelen til å kunne ta gode valg som bidrar til å oppfylle prosjektets målsetting. Og vi unngår beslutninger tatt basert på magefølelse.

Summen av små og store tiltak utgjør forskjellen

Det har vært mye fokus på lavkarbonbetong og resirkulert armering i anleggsbransjen. De fleste byggherrene er godt gang med å implementere løsninger som sikrer reduserte utslipp ved hjelp av disse to materialtypene. Men, lavkarbonbetong og resirkulert armering vil alene ikke gi tilstrekkelig og nødvendig effekt. Skal samfunnets målsetting om reduserte klimagassutslipp nås, må flere og andre tiltak på plass. Noen eksempler som bidrar og monner er optimaliserte tverrsnitt, spennindeling, smartere fundamenteringsløsninger, varierende tverrsnitt, sparebør eller andre tiltak som sparer betongmengder, bruk av bedre

beregningsverktøy. Ingen av tiltakene alene vil løse samfunnets mål. Det er summen av bidrag fra både store og små tiltak som vil gi oss de reduksjonene samfunnet trenger.

Sette klimakrav i kontrakt

Hvilken kontrakttype man etablerer, vil være førende for hvordan tiltak kan implementeres i prosjektene. Norconsult erfarer at det er viktig å ikke prøve å være alt for smart i hvordan kontraktene skrives, men heller involvere alle parter i å bli enige om felles mål som gir alle parter god kost-nytte effekt.

Veien videre

Skal vi i Norge klare å nå målene om reduserte klimagassutslipp, må vi tilbake til å spare på materialer. Bransjen må utfordres til å optimalisere konstruksjoner av alle typer. Betongkonstruksjoner er i en særklasse, fordi det er store klimagassutslipp knyttet til disse.

Vi må bruke mer tid og kompetanse i tidlig fase av prosjektene og ta inn klimagassutslipp som et tydelig kriterie i valg av konstruksjonsløsninger. Vi må bruke vår kompetanse og beregningsverktøy til å optimalisere løsningene bedre, da reduserer vi materialbruk, klimagassutslipp og kostnader i byggefasen.

Til slutt, byggherrene må sette ambisiøse og tydelige mål for klimagassreduksjoner. Dette motiverer og stimulerer alle parter i prosjektene til nytenking og løsninger som sammen bidrar til at vi når Norges klimamål og et mer bærekraftig samfunn.

- Byggherren må sette målene og stille kravene, og de må bidra til at det blir mulig for de andre aktørene å forbedre bransjen, prosjektene og løsningene i disse.
- Leverandører må optimalisere produksjonen
- Arkitekter, rådgivere og prosjekterende må optimalisere konstruksjonene ytterligere
- Entreprenøren må bygge og drive grønnere



Fig. 1. I påkjøringsrampen til E6 fra Taraldrud kontrollstasjon syd for Oslo har Statens vegvesen benyttet bl.a. knust betong i forsterkningslaget.
Foto. Christian J. Engelsen, SINTEF Byggeforsk

Betong og miljø - karbonatisering

Betong er som kjent det mest benyttede byggematerialet i verden og tilgangen på betong er viktig for utviklingen av infrastrukturen i et hvert samfunn. Klimafotavtrykket til betong er imidlertid høyt på grunn av tilvirkning av råmaterialene. I løpet av primærbruksfasen bindes likevel karbondioksid fra luften tilbake til betongen gjennom aldringsprosessen karbonatisering. Denne artikkelen viser hvorfor dette skjer og hvordan dette kan utnyttes.

Seniorforsker Christian J. Engelsen, Ph.D.
SINTEF Byggeforsk

Hvorfor forbindes betong med høyt klimagassutslipp?

Betong består hovedsakelig av sand, stein, vann og sement. En kubikkmeter betong inneholder vanligvis 250-400 kg sement, som binder materialet sammen og gjør at betongen oppnår fasthet. Sementen fremstilles ved å brenne en blanding bestående av hovedsakelig kalkstein (vesentlig CaCO_3) sammen med andre råmaterialer som kvarts, leire, skifer, o.l. Blandingen knuses og varmes opp i store, roterende ovner til en materialtemperatur på rundt 1450 °C. Her starter en kjemisk prosess som kalles kalsinering, hvor karbondioksid (CO_2) drives bort fra kalksteinen slik at reaktivt kalsiumoksid (CaO) dannes. Prosessen kan enkelt beskrives slik:

$\text{CaCO}_3 + \text{varme} \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Med råmaterialene som benyttes i dagens sementproduksjon, er det derfor nødvendig å drive CO_2 bort fra kalksteinen for at betongen skal stivne og oppnå ønsket fasthet. Kalsineringen bidrar derfor til et vesentlig klimagassutslipp. Totalutslippet fra verdens sementproduksjon utgjør angivelig rundt 4-6 prosent av alle menneskeskapt utslipp av CO_2 .

Karbonatisering og opptak av CO_2 fra luften
Når betongen kommer i kontakt med luft starter en aldringsprosess som kalles karbonatisering. Under denne prosessen løser CO_2 fra luften seg med porevannet i betongen. Karbonatet som dannes fra karbonsyren ($\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$) reagerer med oppløst kalsium (Ca^{2+}), slik at CaCO_3 felles ut i poresystemet. Reaksjonen kan beskrives slik:

$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Karbonatiseringsprosessen binder derfor CO_2 fra luften kjemisk ved at stabilt CaCO_3 dannes, noe som medfører at pH i porevannet

synker til under 10. Prosessen er den motsatte av kalsinering. For armert betong er det ikke ønskelig at karbonatiseringen skal utvikle seg innover til stålet, fordi den reduserte pH-verdien bryter ned de beskyttende passiveringssjiktene av forskjellige jernoksider. Dette øker risikoen for armeringskorrosjon. For uarmert betong eller knust betong vil naturligvis armeringskorrosjon ikke finne sted.

Karbonatiseringsdybden fastslår man vanligvis ved å dusje en væskeløsning med en pH-indikator på en frisk bruddflate av betongen, for eksempel et meislet eller boret hull. For knust betong kan en metode være å måle pH verdien i vannet som har vært i kontakt med betongen. Dette er påvist i feltforsøk ved Taraldrud kontrollstasjon der knust betong ble benyttet i forsterkningslaget, se fig 1. En synkende pH-verdi ble målt som samsvarte med karbonatisering av den knuste betongen, se fig. 2. Karbonatiserings-hastigheten var også høyere for knust betong som ikke var tildekket med asfalt.

Hvor mye CO₂ kan bindes til betong

Flere forhold innvirker på hvilken mengde CO₂ betongen binder fra luften og hvor raskt dette skjer. De viktigste er betongkvalitet, sementmengde, type bruk og stedspecifikke forhold. Sistnevnte inkluderer hvorvidt betongen er eksponert mot regn, innendørs eller utendørs, neddykket i vann eller tildekket. Type bruk kan grovt inndeles i hel betong (primærbruksfasen) og nedknust betong (gjenbruksfasen). En norsk undersøkelse har vist at 94 kg CO₂ blir gjennomsnittlig bundet per tonn sement benyttet i fabrikkbetong, betongelementer og betongvarer i Norge (Engelsen og Justnes, 2014). Dette tilsvarer mer enn 13% av det totale produksjonsutslippet til sement på omtrent 700 kg CO₂ per tonn sement. For en betong med en sementmengde på 320 kg/m³, tilsvarer karbonatiseringen omtrent 30 kg bundet CO₂ per m³ betong. Undersøkelsen har benyttet en primærbruksfase på 100 år og har tatt hensyn til forholdene som innvirker på karbonatiseringshastigheten.

Resultatene over viser at betongen har potensiale til å binde mer CO₂, siden mye av betongen ikke blir karbonatisert gjennom hele tykkelsen i løpet av primærbruksfasen. Beregninger viser at bindingspotensiale ligger fra 250-330 kg CO₂ per tonn sement (CEM I, CEM II/A-V og CEM



Fig. 3. Støttemur bygget med knust betong i (Newport, Isle of Wight, England) Foto: Jan Eldegard Hjelte, FABEKO

II/B-S) som tilsvarer 80-100 kg per m³ betong med samme sementmengde som nevnt ovenfor. Det er viktig å understreke at dette ikke er den teoretiske bindingskapasiteten som er høyere. Det er for eksempel antatt at maksimalt 50 % av all CaO i kalsiumsilikathydrat (C-S-H) danner CaCO₃ ved karbonatisering.

Utnyttelse av CO₂-bindingspotensialet

At CaO danner stabilt CaCO₃ i kontakt med luft og vann med svakt basisk pH, er et termodynamisk faktum som bør utnyttes bedre. For armert betong spesifiseres betongen slik at karbonatiseringen tar lang tid og ikke når inn til armeringsstålet i primærbruksfasen. I gjenbruksfasen er økt utnyttelse av CO₂-bindingspotensialet mulig fordi betongens overflate økes ved nedknusing og eventuell armering fjernes (SINTEF Byggeforsk, 2015). Flere eksisterende bruksområder i ubunden bruk er gunstige slik som for eksempel forskjellige typer støttemurer, se fig. 3. Fremtidens bruk av knust betong bør utvikles og tilrettelegges slik at hele potensialet utnyttes.

Dette inkluderer også bruk av knust betong i ny betong (bunden bruk) som da øker CO₂-bindingspotensialet for betong i primær-

bruksfasen ved at tilslaget også kan karbonatisere. Knust betong kan også brukes som råmateriale i sementklinkerproduksjon, hvor kalsiumforbindelsene fra den hydratiserte og delvis karbonatiserte sementpastaen ikke vil bidra til økt netto kalsineringsutslipp av CO₂. I begge tilfeller vil betongen holdes inne i materialkretsløpet og bidra til en sirkulær økonomi.

Referanser

Engelsen, C.J. og Justnes H., CO₂-binding by concrete - Summary of the state of the art and an assessment of the total binding of CO₂ by carbonation in

the Norwegian concrete stock. SINTEF rapport SBF2014A0019 (2014) 61s.

Engelsen, C.J., Wibetoe, G., van der Sloot, H.A., Lund, W., Petkovic, G., Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. Science of The Total Environment 427-428 (2012) 86-97.

SINTEF Byggeforsk, Resirkulert tilslag av tegl og betong, Byggeforskeren byggedetaljer - mars 2015, anvisning 572.111.

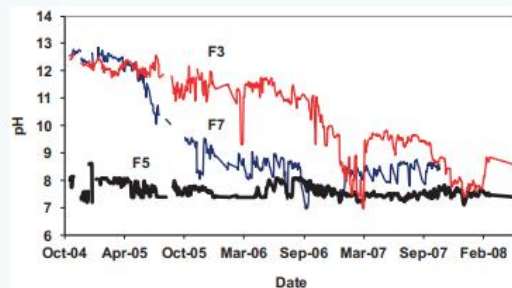


Fig. 2. Karbonatisering av betong. pH målt i avrenning fra resirkulert tilslag fra knust betong (F3) og naturlig tilslag (F5) benyttet i forsterkningslaget på Taraldrud kontrollstasjon. F7 er ikke tildekket med asfalt og karbonatiserer raskere (Engelsen et al., 2012).

