



Universitetet
i Stavanger

TONE HAUG
VEILEDER: KJELL TORE FOSSÅ

Komparativ analyse av miljø- påvirkning og mekaniske egenskaper til miljøbetong

Bacheloroppgave 2024

Byggingeniør med studieretning konstruksjonsteknikk

Institutt for maskin, bygg og materialteknologi

Det teknisk-naturvitenskapelige fakultet





DET TEKNISK – NATURVITENSKAPEIGE FAKULTET

BACHELOROPPGAVE

Studieprogram/ spesialisering: Konstruksjonsteknikk	Vårsemester, 2024
Forfatter: Tone Haug	
Veileder: Kjell Tore Fosså	
Tittel på bacheloroppgave: Komparativ analyse av miljøpåvirkning og mekaniske egenskaper til miljøbetong	
Studiepoeng: 20	
Emne: BYGKBAC-1 23H	Sider: 57 + vedlegg: 16 Stavanger, 15.05.2024

Forord

Denne bacheloroppgaven, skrevet våren 2024, markerer avslutningen på min bachelorgrad i konstruksjonsteknikk ved Institutt for maskin, bygg og materialteknologi ved Universitetet i Stavanger.

Jeg ønsker å takke min veileder, Kjell Tore Fosså, for god faglig veiledning gjennom prosjektperioden. Jeg vil og rette en takk til Stig Erlend Reinseth og Ibrahim Akin, for godt samarbeid på laben.

Dette prosjektet har som mål å utforske og sammenligne miljøpåvirkningen og de mekaniske egenskapene til tradisjonell betong og nye miljøvennlige betongblandinger, med håp om å bidra til mer bærekraftige byggemetoder i fremtiden.

Arbeidet med oppgaven har gitt meg mye verdifull kunnskap og praktisk erfaring, noe jeg er svært takknemlig for, og som jeg vil ta med meg videre.

Sammendrag

Bruken av miljøvennlige betongblandinger i bygg- og anleggsbransjen er et aktuelt tema på grunn av sektorens betydelige miljøpåvirkning. Ved å gjennomføre praktiske tester og anvende beregningsmodellen Environmental Product Declaration (EPD), sammenligner denne oppgaven CO₂-utslipp og mekanisk egenskaper mellom tradisjonell betong (referansebetongen Anlegg FA) og to miljøbetonger (Schwenk og VPI50). Den tradisjonelle betongen som brukes som referanse i denne oppgaven, er Heidelberg Materials Anleggssement FA. Den første miljøbetongen består av en blanding av 50% Schwenk Miljøsement og 50% Schwenk Lavvarmesement. Den andre miljøbetongen, kalt VPI50, er en ny type sement som ennå ikke er tilgjengelig på markedet. VPI50 består av 50% klinker og 50% naturlig pozzolan fra Island.

Resultatene viser at Schwenk-betongen oppnår mer enn en 50 % reduksjon i CO₂-utslipp og en 9 % økning i trykkfasthet sammenlignet med Anlegg FA-betongen, samt oppfyller kravet til fasthetsklasse B55 etter 56 dagers herding. Selv om spaltetrekkfastheten var noe lavere enn forventet, lå den fortsatt innenfor akseptable grenser.

Casestudien av et fiktivt parkeringshus i Stavanger illustrerer at bruk av Schwenk-betong kan redusere det totale klimagassutslippet med 51 %, og dermed demonstrere hvordan bærekraftige materialvalg i byggeprosjekter kan bidra til å redusere byggebransjens miljøfotavtrykk. Oppgaven viser også potensialet for ytterligere miljøgevinster gjennom bruk av naturlig vulkansk pozzolan som erstatning for flygeaske, samt karbonfangst og lagring (CCS) og karbonatiseringsprosesser.

Opgaven konkluderer med at miljøvennlige betongblandinger kan møte både miljømessige og tekniske krav i byggeprosjekter. Implementeringen av disse materialene kan føre til betydelige reduksjoner i klimagassutslipp uten å kompromittere strukturell integritet.

Abstract

The use of environmentally friendly concrete mixtures in the construction industry is a pressing issue due to the sector's significant environmental impact. This thesis conducts practical tests and employs the Environmental Product Declaration (EPD) model to compare CO₂ emissions and mechanical properties between traditional concrete (reference concrete Anlegg FA) and two green concretes (Schwenk and VPI50). The traditional concrete used as a reference in this thesis is Heidelberg Materials Anleggssement FA. The first green concrete consists of a blend of 50% Schwenk Miljøsement and 50% Schwenk Lavvarmesement. The second green concrete, called VPI50, is a new type of cement not yet available on the market, composed of 50% clinker and 50% natural pozzolan from Iceland.

The results show that Schwenk concrete achieves more than a 50% reduction in CO₂ emissions and a 9% increase in compressive strength compared to Anlegg FA concrete, meeting the strength class B55 requirement after 56 days of curing. Although the tensile splitting strength was slightly lower than expected, it remained within acceptable limits.

A case study of a hypothetical parking garage in Stavanger illustrates that using Schwenk concrete can reduce overall greenhouse gas emissions by 51%, demonstrating how sustainable material choices in construction projects can help reduce the industry's environmental footprint. The thesis also highlights the potential for further environmental benefits using natural volcanic pozzolan as a substitute for fly ash, as well as carbon capture and storage (CCS) and carbonation processes.

The thesis concludes that environmentally friendly concrete mixtures can meet both environmental and technical requirements in construction projects. Implementing these materials can lead to significant reductions in greenhouse gas emissions without compromising structural integrity.

Innhold

FORORD	III
SAMMENDRAG	IV
ABSTRACT	V
TABELL – LISTE	VIII
FIGURER	IX
DIAGRAM	IX
1. INNLEDNING	1
2. LITTERATUR	2
2.1. MILJØ – BEREGNINGSMODELLER	2
2.1.1. EPD – Environmental product declaration	3
2.1.1.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:.....	3
2.1.2. LCA – Life cycle assessment	3
2.1.2.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:.....	4
2.1.3. LCI – Life cycle inventory (a part of LCA).....	4
2.1.3.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:.....	4
2.1.4. LCIA – Life cycle impact assessment (basert på LCI).....	4
2.1.4.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:.....	5
2.1.5. EIA-LCA model – quantify the economic impact	5
2.1.6. BREEAM-NOR - Building Establishment Environmental Assessment Methodology for Norway	6
2.1.6.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:.....	6
2.1.7. Sammenligning beregningsmodeller	7
2.2. BETONG OG MILJØ	8
2.2.1. Bindemiddel.....	8
2.2.1.1. Sement.....	8
2.2.1.2. Tilsetningsmaterialer	9
2.2.1.2.1. Islandsk pozzolan.....	9
2.2.1.2.2. Superplastiserende.....	9
2.2.1.2.3. POSS – Polyhedriske Oligomere Silsesquioxaner.....	10
2.2.2. Karbonfangst.....	10
2.2.3. Standardens krav.....	11
2.2.4. Materialeegenskaper.....	11
2.2.4.1. Mekaniske egenskaper.....	11
2.2.4.1.1. Trykkfasthet	11
2.2.4.1.2. Strekkfasthet.....	12
2.2.4.2. Eksponering.....	12
2.2.4.3. Bestandighet.....	13
2.2.4.3.1. Karbonatisering.....	14

2.3.	NOU – OMSTILLING TIL LAVUTSLIPP	14
2.3.1.	<i>Tiltak ihht. utredningen</i>	15
3.	METODE	16
3.1.	MIKSEPROSESS OG UTSTØPING AV STYKKER	16
3.2.	METODER FOR Å BEREGNE FASTHET OG BESTANDIGHET:	17
3.2.1.	<i>Trykkfasthet</i>	17
3.2.2.	<i>E – modul</i>	18
3.2.3.	<i>Spaltestrekkfasthet</i>	18
4.	PRØVEPROGRAM/OPPGAVE	20
4.1.	OPPGAVE.....	20
4.2.	BETONGBLANDINGENE	20
4.2.1.	<i>Anlegg FA</i>	21
4.2.2.	<i>Schwenk</i>	21
4.2.3.	<i>VPI50</i>	21
4.3.	PRØVEPROGRAM	22
4.4.	LAB.....	23
4.5.	BESKRIVELSE AV PRØVING OG PRØVINGSMETODER:.....	23
4.5.1.	<i>Synktest</i>	24
4.5.2.	<i>Luftinnholdstest</i>	24
4.5.3.	<i>Kompresjonstest (terning)</i>	25
4.5.4.	<i>E-modul (sylinder)</i>	25
4.5.5.	<i>Spaltestrekk (sylinder)</i>	26
5.	RESULTAT	27
5.1.	RESULTAT, FERSK BETONG	27
5.1.1.	<i>Synktest</i>	27
5.1.2.	<i>Lufttest</i>	28
5.2.	RESULTAT, HERDET BETONG.....	28
5.2.1.	<i>Trykkfasthet</i>	28
5.2.2.	<i>E-modul</i>	30
5.2.3.	<i>Spaltestrekk</i>	30
5.2.3.1.	Avvik på 56-dagers test	31
5.3.	RESULTATER, POSS	31
5.4.	SAMMENLIGNING AV RESULTATER FRA HERDET BETONG MED STANDARD	32
5.5.	POTENSIELLE BEGRENSNINGER	33
6.	CASE	34
6.1.	TRANSPORT.....	36

6.1.1.	<i>Transport betong</i>	36
6.1.2.	<i>Transport armering</i>	36
6.2.	ARMERING	36
6.2.1.	<i>Armeringsnett</i>	36
6.2.2.	<i>Armering kamstål</i>	37
6.3.	OPPSUMMERING – UTSLIPP SOM ER UAVHENGIG AV BETONGTYPE	37
6.4.	BETONG	38
6.4.1.	<i>Anlegg FA</i>	38
6.4.2.	<i>Schwenk</i>	38
6.5.	OPPSUMMERING CASE	39
7.	DISKUSJON	40
8.	KONKLUSJON	43
9.	REFERANSER	45
10.	VEDLEGG:	49
A.	BETONGPROPORSJONERING	49
A1.	<i>Betongproporsjonering Anlegg FA</i>	49
A2.	<i>Betongproporsjonering Schwenk</i>	52
A3.	<i>Betongproporsjonering VPI50</i>	55
B.	HERDET RESULTATER	58
B1.	<i>Kompresjonstest 7 dager</i>	58
B2.	<i>Kompresjonstest 28 dager</i>	59
B3.	<i>Kompresjonstest 56 dager</i>	61
B4.	<i>E – modul</i>	63
B5.	<i>Spaltestrekk</i>	64

Tabell – liste

Tabell 1	Sammenligning av beregningsmodeller	7
Tabell 2	Fasthetsklasser [19]	12
Tabell 3	Eksponeringsklasser [19]	13
Tabell 4	Bestandighetsklasser [19]	13
Tabell 5	Forskjeller mellom de ulike betongblandinger	22
Tabell 6	Prøvetabell	22
Tabell 7	Resultater synktest	27
Tabell 8	Resultater lufttest	28
Tabell 9	Resultater kompresjonstest	28

Tabell 10 Resultater e-modul	30
Tabell 11 Resultater spaltestrekk.....	30
Tabell 12, resultater POSS.....	31
Tabell 13 Livssyklus for en bygning definert i NS-EN 15978:2011 [36]	35

Figurer

Figur 1 Måling av diameter til synk	24
Figur 2 Terning - prøvestykket gjennomgår kompresjostest.....	25
Figur 3 Sylinder – prøvestykket gjennomgår test av E-modul.....	25
Figur 4 Resultat som viser innside av prøvestykket etter spaltestrekkfasthet-test.....	26
Figur 5 Resultat etter spaltestrekkfasthet-test i maskin.....	26

Diagram

Diagram 1 Resultater kompresjonstest.....	29
---	----

1. Innledning

Byggebransjen er en av de største bidragsyterne til globale CO₂-utslipp, og står for omtrent 14% av de totale utslippene i Norge [1]. Med økende miljøbevissthet og strengere reguleringer, er det et presserende behov for å utvikle og implementere miljøvennlige løsninger. Denne oppgaven undersøker bruken av miljøvennlige betongblandinger som et middel til å redusere sektorens miljøpåvirkning, samtidig som de tekniske kravene opprettholdes.

Kapittel 1 introduserer oppgaven og gir en kort oversikt over oppgavens innhold. Kapittel 2 gjennomgår relevant litteratur og beregningsmodeller for miljøvurdering, inkludert Environmental Product Declaration (EPD, miljødeklarasjon), Life Cycle Assessment (LCA, livsløpsanalyse), Life Cycle Inventory (LCI), Life Cycle Impact Assessment (LCIA), og Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology for Norway (BREEAM-NOR, et norsk tilpasset miljøsertifiseringssystem for bygninger), samt diskuterer miljøpåvirkning knyttet til betong og aktuelle miljøtiltak. Kapittel 3 beskriver metodene brukt i oppgaven, inkludert mikseprosessen, utstøping av prøver, og testmetoder for å måle trykkfasthet, elastisitet og spaltestrekfasthet. I kapittel 4 presenteres prøveprogrammet, med detaljer om de ulike betongblandingene og hvordan testene ble gjennomført i laboratoriet.

De tre betongblandingene brukt i denne oppgaven er som følger:

- **Den tradisjonelle betongen:** Heidelberg Materials Anleggsement FA, omtalt som Anlegg FA i denne oppgaven.
- **Den første miljøbetongen:** Består av en blanding av 50% Schwenk Miljøsement og 50% Schwenk Lavvarmesement, omtalt som Schwenk i denne oppgaven.
- **Den andre miljøbetongen:** Kalt VPI50, er en ny type sement som ennå ikke er tilgjengelig på markedet. VPI50 består av 50% klinker og 50% naturlig pozzolan fra Island, omtalt som VPI50 i denne oppgaven.

Kapittel 5 inneholder resultatene fra testene, både for fersk og herdet betong, og sammenligner disse med gjeldende standarder. Kapittel 6 er en casestudie som anvender EPD-modellen for å beregne utslippene ved bygging av et parkeringshus, og illustrerer potensialet for reduksjon i klimagassutslipp ved bruk av miljøvennlig betong. Videre diskuterer kapittel 7 funnene fra casestudien og vurderer scenarioer for hvordan bruk av miljøbetong kan bidra til en positiv miljøpåvirkning. Til slutt konkluderer kapittel 8 med at miljøvennlige betongblandinger kan møte både miljømessige og tekniske krav i byggeprosjekter og gir anbefalinger for videre forskning og anvendelse.

2. Litteratur

2.1. MILJØ – BEREGNINGSMODELLER

Å integrere bærekraft og miljøhensyn blir stadig viktigere i samfunnet og næringslivet. Bygg- og anleggsbransjen står overfor utfordringer med høye utslipp av miljøskadelige stoffer, inkludert gasser, avfall og forurensning i vann. En effektiv måte for å redusere utslipp involverer bruk av beregningsmodeller som effektivt evaluerer miljøpåvirkningen gjennom hele livssyklusen til produkter og prosesser.

Disse modellene tillater analyse og vurdering av ressursbruk og utslipp, og tilbyr en metode for objektiv og kvantitativ sammenligning av ulike alternativer, noe som gjør det enklere for bedrifter å ta informerte og bærekraftige valg.

Modellene identifiserer områder og produkter med betydelig miljøpåvirkning, og fungerer som et verktøy for forbedring ved å veilede utviklingen av mer ressurseffektive og miljøvennlige produkter og prosesser. Dermed spiller de en avgjørende rolle i overgangen til et mer bærekraftig og ressurseffektivt samfunn.

EPD gir kvantifisert informasjon om miljøpåvirkningen til et produkt gjennom dets hele livssyklus. LCA tilbyr en omfattende vurdering av miljøpåvirkningen av både produkter og tjenester, og BREEAM-NOR evaluerer miljøprestasjonen til bygninger og infrastrukturprosjekter. Samlet bidrar disse modellene til et robust rammeverk for å vurdere og forbedre miljøprestasjonen av produkter og tjenester, og de spiller en essensiell rolle i å fremme bærekraftig utvikling og økt miljøbevissthet.

2.1.1. EPD – Environmental product declaration

En EPD er et dokument som er verifisert av en tredjepart og registrert. Det gir kvantifisert informasjon om miljøpåvirkningen til et produkt gjennom hele dets livssyklus. [2]. Det blir brukt til blant annet byggematerialer, møbler eller kjemikaler for å kunne fortelle om ressursbruk, utslipp og andre miljøaspekter knyttet til produktet [3].

EPD-er er derfor spesielt nyttige for å sammenligne miljøprestasjonen og påvirkningen til ulike produkter innenfor samme kategori, for eksempel forskjellige typer betong.

Det er utviklet et sett med produktkategoriregler (PCR), der det finnes ulike PCR-er for ulike produktgrupper. Eksempler på relevante PCR-er er NPCR 018 for natural stone, products, aggregates and fillers og NPCR 020 for concrete and concrete elements [4]. Basert på internasjonale standarder, er det PCR-ene som definerer kravene til en EPD [5]

2.1.1.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:

- EPD gir kvantifisert informasjon om miljøpåvirkningen til et produkt gjennom hele dets livssyklus.
- Spesielt nyttig for sammenligning av miljøprestasjon mellom produkter i samme kategori.
- Tar ikke hensyn til økonomiske eller sosiale aspekter.

2.1.2. LCA – Life cycle assessment

En LCA er en systematisk kartlegging og vurdering av miljø- og ressurspåvirkning til et produkt gjennom hele dets livssyklus. Dette inkluderer råvareutvinning, produksjon, transport, bruksfase og avfallshåndtering eller gjenbruk.

Det gjøres ved å gjennomgå fire ulike faser. Første fase er kartlegging, der utslippene beregnes. Andre fase er klassifisering, der utslippene kategoriseres før det går videre til neste fase; karakterisering. Her beregnes miljøpåvirkningen før det går over til fjerde og siste fase som er forbedring der analyser av hvordan produktet kan forbedres gjennomgås. [6]

En LCA kan brukes underveis i et prosjekt for å finne miljøvennlige løsninger, eller ved ferdigstilling for å dokumentere eventuelle miljøbesparelser da den gir en helhetlig forståelse av miljøpåvirkningen til et produkt.

LCA-en er en bred prosess som inkluderer LCI (se neste avsnitt). I motsetning til LCI-en, tar LCA ikke bare hensyn til inn- og utganger, men vurderer og tolker også de miljømessige konsekvensene av disse dataene.

2.1.2.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:

- LCA er svært detaljert og gir en omfattende vurdering av miljøpåvirkningen fra råmaterialeutvinning til deponering.
- Inkluderer fire hovedfaser: kartlegging, klassifisering, karakterisering og forbedring.
- Tidkrevende og ressurskrevende.

2.1.3. LCI – Life cycle inventory (a part of LCA)

LCI er delen innenfor LCA som består av innsamling av data. Det innebærer å samle inn og kvantifisere alle innganger som er assosiert med produksjonen og bruk av et produkt eller en tjeneste. Inngangene omhandler ressurser og miljøpåvirkninger som for eksempel energi, vann og miljøressurser. Utganger er utslipp i luft, vann og jord, eksempelvis jordforurensing, avfall og forurensing i vann og luft. Fokuset er å identifisere og kvantifisere de ressursene som brukes, og utslippene som genereres i løpet av produktets livssyklus [7].

2.1.3.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:

- LCI er en del av LCA som fokuserer på innsamling og kvantifisering av innganger og utganger i produksjonen.
- Det gir grunnleggende data for LCA og LCIA.
- Viktig for å identifisere ressursbruk og utslipp, men tolker ikke de miljømessige konsekvensene av disse dataene.

2.1.4. LCIA – Life cycle impact assessment (basert på LCI)

LCIA går et skritt videre enn LCI og evaluerer de samlede miljøvirkningene av innganger og utganger identifisert i LCI. LCIA omfatter kvantifisering, karakterisering, normalisering og vektsetting av de ulike miljøpåvirkningene [8]. Dette gir en helhetlig forståelse av de mulige konsekvensene for mennesker, miljø og ressurser.

Kvantifisering: Dette trinnet innebærer å konvertere de innsamlede dataene fra LCI til enheter som gir mening for de ulike miljøpåvirkningene. For eksempel kan utslipp av klimagasser måles i CO₂-ekvivalenter.

Karakterisering: Her blir de kvantifiserte dataene omgjort til potensielle miljøeffekter, som blant annet klimaendringer, forsurening og eutrofiering. Dette trinnet gir en forståelse av hvilke miljøproblemer som er mest relevante.

Normalisering: Normalisering sammenligner de kvantifiserte miljøeffektene med en referanse, slik at man kan se hvordan de står i forhold til gjennomsnittlig globale påvirkninger.

Vektsetting: Dette trinnet gir vektorer til de ulike miljøeffektene basert på deres alvorlighetsgrad eller betydning for mennesker og miljø.

2.1.4.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:

- LCIA evaluerer de miljømessige konsekvensene av data samlet inn i LCI.
- Inkluderer kvantifisering, karakterisering, normalisering og vektsetting av miljøpåvirkninger.
- Gir en helhetlig forståelse av de potensielle konsekvensene for mennesker, miljø og ressurser.

2.1.5. EIA-LCA model – quantify the economic impact

EIA-LCA-modellen er en integrert tilnærming som kombinerer EIA (Environmental Impact Assessment) og LCA (Life Cycle Assessment). Resultatet er en vurdering av et gitt prosjekt, produkt eller tjeneste sin miljøpåvirkning og økonomiske konsekvenser [9]. Ved kombinasjonen av disse to tilnærmingene får man en mer omfattende forståelse av både miljømessige og økonomiske aspekter, hvordan disse påvirker hverandre, og dermed god informasjon for beslutningstaking og planlegging [10].

2.1.6. BREEAM-NOR - Building Establishment Environmental Assessment Methodology for Norway

BREEAM-NOR er den norske varianten av BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) som gjennom et poengsystem vurderer bygningers og større utviklingsprosjekters bærekraft som til slutt kan bli sertifisert med en BREEAM karakter som viser hvor godt den presterer i forhold til miljøstandarder. BREEAM-NOR er tilpasset norske forhold, lover og forskrifter, og tar hensyn til lokale klimatiske forhold, byggetradisjoner og miljøutfordringer. Den vurderer ulike aspekter av en bygningens miljøpåvirkning, inkludert energiforbruk, materialbruk, vannforbruk, avfallshåndtering, transport, økologi, forurensning og styringsprosesser [11].

2.1.6.1. Oppsummerende nøkkelpunkter:

- BREEAM-NOR er en norsk tilpasning av BREEAM som vurderer bygningers miljøprestasjon.
- Tilpasset norske forhold og inkluderer aspekter som energiforbruk, materialbruk, vannforbruk, avfallshåndtering, og transport.
- Kan være kostbart og har hovedfokus på bygninger fremfor individuelle materialer.

2.1.7. Sammenligning beregningsmodeller

Beregningsmodell	Beskrivelse	Egnet for	Begrensninger
I			
LCA (Life Cycle Assessment)	Omfattende vurdering av miljøpåvirkninger gjennom hele produktets livssyklus	Komplekse produkter og systemer med lang levetid.	Tidskrevende og ressurskrevende
EPD (Environmental Product Declaration)	Standardisert dokument som gir kvantifisert miljødata for et produkt basert på en forhåndsdefinert standard.	Produktsammenligninger innen samme kategori.	Begrenset til miljødata, tar ikke hensyn til økonomiske eller sosiale aspekter
BREEM-NOR	Bygningssertifiseringsmetode som vurderer miljøprestasjonen til bygninger og infrastrukturprosjekter	Bygg- og infrastrukturprosjekter i Norge	Kan være kostbart, mer fokus på bygningsytelsen enn på individuelle materialer

Tabell 1 Sammenligning av beregningsmodeller

For anleggsindustrien, spesielt innen betongproduksjon, er en kombinasjon av ulike modeller nyttig for å kunne evaluere og forbedre miljøpåvirkningen av produksjonsprosesser og materialvalg. I evalueringen av de forskjellige beregningsmodellene for miljøvurdering avslører sammenligningen at mens LCA gir en omfattende vurdering, er den ressurskrevende og kompleks, noe som kan være en ulempe i prosjekter med stramme tidsrammer eller begrensede datakilder. EPD, derimot, tilbyr standardisert og lett sammenlignbar miljøpåvirkningsdata, noe som gjør den ideell for raske produkt-sammenligninger, men den gir ikke innsikt i kostnader eller sosiale aspekter, noe som kan være nødvendig for helhetlige bærekraftvurderinger. BREEAM-NOR er spesielt nyttig for norske byggeprosjekter, og gir en detaljert miljøprestasjonsevaluering av bygninger, men bruken er begrenset geografisk og kan være forbundet med høyere kostnader.

For denne oppgaven er EPD valgt for å gjøre videre beregninger. Dette valget ble gjort på grunn av EPD-ens evne til å gi detaljert og pålitelig informasjon om miljøpåvirkningen av konkrete produkter og prosesser. EPD-er gir i dette tilfellet en transparent og standardisert oversikt over

miljøprestasjonene til betongprodukter, noe som gjør det til et bra verktøy for å identifisere bærekraftige materialvalg og prosesser. Hver av disse modellene har sin plass i miljøvurderinger. Valget mellom dem bør baseres på spesifikke prosjektkrav og tilgjengelige ressurser.

2.2.BETONG OG MILJØ

2.2.1. Bindemiddel

2.2.1.1. Sement

Tradisjonell betong består av vann, sand, stein og sement. For en typisk konstruksjonsbetong kan opptil 90% av det totale klimagassutslippet være fra sementen [12]. Det meste av CO₂-utslippene stammer fra produksjonen og transporten av sement fra fabrikken til blanderverket.

Tradisjonell sement, også kjent som Portland-sement, fremstilles ved å blande kalkstein, leire og sand for så å knuse det til et pulver. Råmaterialet gjennomgår en prosess kalt kalsinering, hvor det varmes opp til ekstremt høye temperaturer, vanligvis rundt 1400-1500 grader Celsius, i en roterende ovn. Dette danner klinker, små mørkegrå korn som blir hovedkomponenten i sementen. Etter nedkjølingen males klinkeren til en fin pulverform før den blandes med gips. Dette sammen utgjør ferdig sement. [12]

CO₂ -utslippet fra produksjonen av sement kommer hovedsakelig fra fyringen av sementovnen og kalsineringsprosessen, der CO₂ spaltes av. Hvis ingen tiltak blir iverksatt og gjennomført for å redusere CO₂-utslippet, blir omtrent 1 tonn CO₂ per tonn klinker sluppet ut. Forbrenning av drivstoff, finmaling, mv. står for rundt 40 prosent av utslippene, mens de gjenværende 60 prosentene kommer fra dannelsen av klinkermineraler ved dekarbonisering av kalkstein [13]. Typiske tiltak for å redusere utslippet ved brenningen er å bytte ut oppfyring med fossilt brensel, til brennstoff basert på avfall, og varmegjenvinning fra ovnene. CO₂-utslippet kan og fanges opp og deponeres ved hjelp av karbonfangst. Karbonfangst blir videre forklart i kapittel 2.2.2. Et annet alternativ for å redusere utslippet, er å erstatte en andel sementklinker med tilsetningsmaterialer. Det er ikke mulig å redusere utslippet fra kalsineringsprosessen, men man kan redusere mengden klinker i sementblandingen. Dette gjøres ved å tilsette pozzolaner (flygeaske eller silikastøv) eller hydrauliske bindemidler (slag).

2.2.1.2. Tilsetningsmaterialer

Flygeaske er et restprodukt fra forbrenning av kull, silikastøv er et biprodukt fra produksjon av silisiummetall eller ferrosilisium, og slagg er et biprodukt fra smelteprosesser, gjerne fra råjernproduksjon [12]. Det vil si at dette er restprodukter fra industri med høye utslipp, men regnes som energi- og karbonnøytrale da klimagassutslippene knyttes til hovedproduktene [14].

Tilsetningsmaterialene fungerer kun som bindemidler når de er i kombinasjon med portlandsementen. Det vil derfor alltid være en andel sementklinker i sementen.

2.2.1.2.1. *Islandsk pozzolan*

En mulig fremtidig erstatter for flygeaske er pozzolaner fra islandske vulkaner. Flygeasken som benyttes mye i dag er hovedsakelig et avfallsprodukt fra kraftverk drevet av kull. Tidligere ble asken frigjort fra pipene sammen med røyken, men ble etter hvert skilt ut og samlet opp for å kunne selges videre. Dette gjorde at CO₂-utslippet fra kraftverkene ble redusert, samtidig som den oppsamlede asken kunne brukes blant annet som en erstatning til noe av sementklinkeren i sement, og da også redusere CO₂-utslippet. Med nedgangen i antall kullkraftverk blir tilgangen på flygeaske også redusert.

Islandsk pozzolan, utvunnet fra vulkansk aske, representerer et lovende alternativ til tradisjonelle tilsetningsstoffer. Materialet har egenskaper som ligner på flygeaske, inkludert et redusert vannbehov, samtidig som at pozzolanet er spesielt effektivt mot alkaliske reaksjoner, kloridinntrengning og karbonatisering, og kan derfor være en verdifull erstatning [15].

2.2.1.2.2. *Superplastiserende*

Superplastiserende midler er kjemikalier som brukes i betongproduksjon for å forbedre konsistensen og egenskapene til fersk betong. Det gir bedre flyteevne, øker synkverdien og reduserer behovet for vann i betongblandingen [16]. Dette gjør at den ferske betongen er lettere å pumpe, spre og forme, noe som gjør arbeidsprosessen enklere og øker produktiviteten på byggeplassen. Reduksjonen av vanninnholdet i betongen resulterer i økt styrke, tetthet og holdbarhet i den herdede betongen. Ulempene med midlene er at de kan være kostbare både å kjøpe og å bruke, de kan gjøre at betongen setter seg raskere enn ønsket, og de kan ha en potensiell negativ påvirkning på miljøet.

2.2.1.2.3. POSS – Polyhedriske Oligomere SilSesquioxaner

Polyhedriske Oligomere SilSesquioxaner (POSS) er et miljøvennlig tilsetningsstoff utviklet av Bioenvision AS (Funzionano AS). Det er en vannavvisende tilsetning som styrker bygningskonstruksjoner, beskytter mot sprekker, vannmigrasjon, utlekking og korrosjon, og fremmer gjenbruk og resirkulering av byggematerialer [17].

2.2.2. Karbonfangst

Slik det er i dag vil det alltid være en andel sementklinker i betongen. Dette understreker hvorfor betydelige investeringer har blitt gjort i karbonfangstteknologier over de siste 20 årene. Ved å fange opp CO₂-utslippet fra sementproduksjonen sitter man igjen med et betydelig mindre CO₂-avtrykk, men uten at det går på bekostning av egenskapene til sementen.

Det er vanskelig å snakke om karbonfangst uten å nevne Brevik CCS, verdens første sementfabrikk med eget karbonfangstanlegg [18]. Omtrent 50% av utslippet fra sementproduksjonen blir fanget opp slik at det ikke slippes ut i atmosfæren.

Prosessen starter ved at røykgass hentes fra fabrikkpipen i Brevik. Denne er da på mellom 100 og 165 grader, og må kjøles ned til 30 grader. Etter avkjølingen tilsettes kaustisk soda (NaOH) for å neutralisere svoveloksid og saltsyre i røykgassen. Deretter ledes gassen videre til en absorber, der CO₂-molekylene reagerer og kjemisk binder seg med en ammoniakkløsning. Denne kjemiske reaksjonen danner en stabil kjemisk forbindelse som gjør det mulig å skille CO₂ fra andre gasser. Den CO₂-rike ammoniakk-væsken pumpes så til en desorber hvor den varmebehandles slik at bindingene mellom molekylene brytes og ren CO₂ blir frigjort. Her brukes restvarme fra fabrikkens til å få den energikrevende prosessen til å skje.

Den rene CO₂-gassen går nå videre for å komprimeres der trykket går fra 1,7 bar til 70 bar. Etter dette kjøles gassen ned og går tilbake til væskeform før trykket igjen reduseres ned til 16 bar. Den flytende CO₂-en transporteres deretter til et mellomlager, hentes og transporteres med skip til et midlertidig lager på Vestlandet, før det fraktes i rør og blir pumpet ned ut til en brønn i Nordsjøen, der det lagres permanent nesten 3000 meter under bakken. Ifølge selskapet blir 55 tonn CO₂ lagret i timen, noe som tilsvarer 400 000 tonn årlig [19]

2.2.3. Standardens krav

Alle prøver av herdet betong oppfyller kravene som er fastsatt i NS-EN 206 5.5 [20], inkludert både trykkfasthet og trekkspaltefasthet. Videre er alle betongblandinger nøye satt sammen i henhold til spesifikasjonene i NS-EN 206 6 [20]. I samsvar med EN197-1 5.2.1, skal forholdet av portlandsement i betongblandingen være slik det er angitt. Naturlig pozzolan og flygeaske må også være i samsvar med de respektive standardene NS-EN 197-1 5.2.3.2 [21] og NS-EN 197-1 5.2.4 [21].

De mekaniske egenskapene må oppfylle kravene angitt i NS-EN 197-1 7.1.1 [20] og NS-EN 197-1 7.1.2 [20]. I henhold til EN197-1 7.4.1 påvirker valget av sement betongens egenskaper, noe som understreker betydningen av å følge standardene nøye for å oppnå ønsket resultat.

2.2.4. Materialeegenskaper

Valget av sementblanding til betong avhenger av flere faktorer og velges ut fra en kombinasjon av materialeegenskaper, prosjektkrav og miljømessige forhold. De viktigste materialeegenskapene til betong er fasthet og bestandighet, etterfulgt av egenskaper som brannmotstand, stivhet og vanntetthet. Når man velger sementblanding, er det viktig å vurdere eksponeringsklasse, bestandighetsklasse og fasthetsklasse. Disse faktorene definerer betongens evne til å tåle miljømessige påkjenninger, dens forventede levetid og dens trykkfasthet ved en bestemt alder. Ved å ta hensyn til disse faktorene kan man sikre at betongen oppfyller kravene og forventningene til det spesifikke prosjektet.

2.2.4.1. Mekaniske egenskaper

2.2.4.1.1. Trykkfasthet

Fasthet, eller trykkfasthet, handler om hvor mye kompresjonskrefter betongen kan utsettes for før den bryter sammen. Trykkfasthet er en avgjørende egenskap for betong når man vurderer og designer bygningsstrukturer. Det er en sentral faktor når man skal vurdere betongens egnethet for ulike bruksområder, som for eksempel fundament, søyler, bjelker og vegger. Det er avgjørende at betongen kan motstå kompresjonskreftene den utsettes for, for å sikre at konstruksjoner, som for eksempel bygninger, broer eller dammer, tåler vekten og belastningen de utsettes for.

Trykkfastheten deles opp i fasthetsklasser som referer til den forventede trykkfastheten til betongen [22]. Dette er for å kunne sikre at betongen har styrke tilstrekkelig nok til å motstå de belastningene den vil bli utsatt for. De vanligste klassene er B20-B45. Høyere trykkfasthet indikerer vanligvis bedre evne til å motstå laster og belastninger, noe som resulterer i mer pålitelige og holdbare konstruksjoner. Tallet i fasthetsklassene, for eksempel "B40", refererer til den karakteristiske trykkfastheten til betongen målt i megapascal (MPa) ved en alder på 28 dager og 56 dager. I tilfellet med "B40", betyr det at betongen har en karakteristisk trykkfasthet på 40 MPa ved en alder på 28 dager. Jo høyere tallet er, desto høyere er betongens styrke.

Fasthetsklasse	B10	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65	B75	B85
----------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabell 2 Fasthetsklasser [22]

2.2.4.1.2. Strekkfasthet

Strekkfasthet angir betongens evne til å motstå krefter som trekker materialet fra hverandre og mulig forårsaker forlengelse eller strekking i betongen. Belastningene oppstår langs den langsiktige akse til sylindren, og er spesielt viktig for komponenter som bjelker. Høyere strekkfasthet indikerer bedre evne til å motstå strekkbelastninger. En tilstrekkelig strekkfasthet sikrer at betongen kan motstå spenningene som oppstår under belastning. Strekkfastheten måles vanligvis i megapascal (MPa).

2.2.4.2. Eksponering

Eksponeringsklassen indikerer hvilket miljø betongen vil bli utsatt for. Hver eksponeringsklasse krever spesifikke egenskaper i betongen for å motstå påvirkningen av det aktuelle miljøet. For eksempel vil betongen som brukes i en konstruksjon nær sjøen, ha forskjellige krav til motstand mot saltvann sammenlignet med betongen brukt i en bygning i innlandet.

Eksponeringsklasser	
X0	Ingen risiko for korrosjon eller angrep
XC1-4	Korrosjon framkalt av karbonatisering
XD1-3	Korrosjon framkalt av klorider som ikke stemmer fra sjøvann
XS1-3	Korrosjon framkalt av klorider fra sjøvann
XF1-4	Fryse-/tineangrep
XA1-4	Kjemisk angrep
XSA	Særlig aggressivt miljø

Tabell 3 Eksponeringsklasser [22]

2.2.4.3. Bestandighet

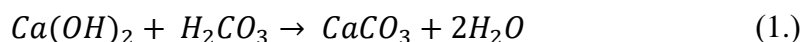
Bestandighetsklassen i betong angir forventet levetid under spesifikke forhold. Den er viktig for å sikre at betongen beholder både sine strukturelle og estetiske egenskaper over tid. Vanninnholdet i betongen korresponderer til tallene i bestandighetsklassene, hvor lavere tall indikerer høyere bestandighet. F-en i klassene står for "frostsikker". Vektforholdet mellom vann og sement, kalt v/c-tallet, er avgjørende ved betongproporsjonering. Dette påvirker betongens egenskaper betydelig. Et v/c-tall under 0,4 kan føre til at sementen ikke utnyttes tilstrekkelig, mens 0,4 regnes som nær ideell. Vanligvis blandes betong med v/c-tall opp mot 0,7 til 0,9 for lettere arbeid, men dette reduserer betongens kvalitet.

Eksponeringsklasse	Bestandighetsklasse					
	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
X0	X	X	X	X	X	X
XC1, XC2, XC3, XC4, XF1		X	X	X	X	X
XA1, XA2, XA4, XD1, XS1			X	X	X	X
XF2, XF3, XF4				X		X
XD2, XD3, XS2, XS3, XA3					X	X

Tabell 4 Bestandighetsklasser [22]

2.2.4.3.1. Karbonatisering

Aldringsprosessen karbonatisering skjer når betongen kommer i kontakt med luft, og CO₂ fra luften reagerer med porevannet i betongen. Reaksjonen ser slik ut:



CO₂ fra luften blir på denne måten kjemisk bundet ved at stabilt CaCO₃ dannes. Dette medfører at pH-en i porevannet synker. Karbonatisering er derfor det motsatte av kalsinering. Betongkvalitet, sementmengde, type bruk (hel betong i primærfasen eller knust i gjenbruksfasen) og spesifikke forhold (f.eks. om betongen er eksponert mot regn) er med på å avgjøre mengden av CO₂ som kan lagres i betongen. Det ble vist i en undersøkelse gjennomført av C. J. Engelsen, H. Justnes og A. Rønning i 2016 at per tonn sement i Norge blir i gjennomsnitt 94 kg CO₂ blir bundet.

Med utgangspunkt i at det totale utslippet ligger på omtrent 700 kg CO₂ per tonn sement, tilsvarer dette mer enn 13% av det totale produksjonsutslippet. Resultatene fra testen viser at siden karboniseringsprosessen ikke finner sted gjennom hele tykkelsen i løpet av primærbruksfasen, har betongen potensiale til å binde mer CO₂ [23].

2.3. NOU – Omstilling til lavutslipp

I 2021 ble Klimautvalget 2050 dannet med det formål om å utføre en omfattende undersøkelse av hvilke tiltak Norge må vurdere for å oppnå målet om å bli et lavutslippssamfunn innen 2050 [1]. Dette omfatter en rekke elementer som ikke er direkte relevante for denne oppgaven. Imidlertid er bygg- og anleggsbransjen svært relevant, da den representerer et betydelig potensial for reduksjon av CO₂-utslipp. Her er betong og betongproduksjon relevant, da det er en sektor med betydelige utslipp, men også et stort potensial for betydelige kutt.

2.3.1. Tiltak ihht. utredningen

Her følger noen konkrete funn fra utredningen. Flere av disse punktene går igjen senere i teksten, og vil bli grundigere utredet.

- Anleggsmaskiner og andre motorredskaper forventes å bli fullstendig elektrifisert. Dette innebærer en overgang fra flytende drivstoff til elektrisitet [1].
- Materialsektoren, med hovedvekt på stål, betong, plast og aluminium, står for betydelige klimagassutslipp på globalt nivå. Utslipp og bruk av naturressurser som sand og mineraler må reduseres i produksjonsprosessen [1].
- Bygge- og anleggssektoren representerer en stor del av avfallsproduksjonen, hvor næringen sto for 25 prosent av Norges totale avfallsproduksjon i 2021. Over 80 prosent av dette avfallet ble estimert til å bli materialgjenvunnet eller brukt til fyll- og dekkmasser. For å redusere utslippene i bygg og anlegg, er det viktig å minimere riving av bygg, velge sirkulære løsninger og materialer med lave utslipp over hele deres livssyklus [1].
- En utfordring er at det ofte er mer økonomisk lønnsomt å bygge nytt enn å bruke brukte materialer og rehabilitere eldre bygg. Det er også begrenset tilgang og et ineffektivt marked for brukte materialer, dette må forbedres [1].
- Regelverk, som Byggteknisk forskrift og Plan- og bygningsloven, må oppdateres med klare krav til ombruk av materialer, energieffektivisering og økt tilrettelegging for rehabilitering. Det bør være insentiver for sirkulære forretningsmodeller [1].
- Det anbefales å implementere avgifter for utslipp av CO₂, med fokus på å fremme forberedelse til ombruk og materialgjenvinning. Samtidig bør dette systemet gi insentiver for CO₂-fangst og -lagring [1].

3. Metode

I dette metodekapittelet presenteres prosessen med støpning, samt beregningene som ble gjort for å bestemme trykkfasthet, elastisitet og spaltestrekfasthet.

3.1. Mikseprosess og utstøping av stykker

Mikseprosessen og utstøping av betongprøver består av flere trinn for å sikre homogenitet og kvalitet i de produserte betongstykkene. Hver fase i prosessen gjøres i henhold til spesifikasjoner i NS-EN 12390-2 (6) [24], og er avgjørende for å oppnå de ønskede mekaniske egenskapene i den ferdige betongen. Prosessen kan beskrives som følger:

Måling av ingredienser:

Ingrediensene, inkludert sement, vann, sand, og tilsetningsstoffer, måles nøyaktig. Det er viktig at mengdene er presise for å oppnå en konsistent blanding med de ønskede egenskapene.

Blanding:

De målte ingrediensene blandes grundig i en betongblander. Blandingen sikrer at alle komponentene fordeles jevnt og danner en homogen betongmasse. Dette trinnet er viktig for å sikre at betongen har jevne egenskaper gjennom hele massen.

Fylling av former:

Betongblandingen fordeles jevnt i støpeformer valgt i samsvar med NS-EN 12390-1 [25]. Betongen helles forsiktig for å sikre en jevn fordeling i formen. Hvis nødvendig fordeles et tynt lag slippmiddel i formen før fylling, for å unngå at det herdete betongen hefter til formen [24].

Komprimering:

Betongen i formene komprimeres for å fjerne eventuelle luftlommer som kan ha blitt fanget under fyllingen, i henhold til NS-EN 12390-2 6.2.1 og 6.2.3 [24]. Komprimeringen utføres manuelt ved hjelp av en stav. Dette trinnet sikrer at betongen blir tett og fri for hulrom, noe som er viktig for dens styrke og holdbarhet.

Herding:

Etter komprimeringen herdes betongen under kontrollerte forhold i samsvar med NS-EN 12390-2 6.5 [24]. Formene med betongprøvene plasseres i et miljø med konstant temperatur og fuktighet. Herdetiden kan variere, men standard herdetider inkluderer perioder på 7, 28 og 56 dager.

Testing:

Når herdetiden er fullført, fjernes prøvene fra formene og gjennomgår ulike tester for å vurdere de mekaniske egenskapene. Vanlige tester inkluderer trykkfasthetstesting, elastisitetmåling og spaltestrekkfasthetstesting.

Denne prosessen sikrer at betongprøvene er laget av god nøyaktighet og jevn kvalitet, noe som er viktig for å få pålitelige testresultater. Gjennom hver av disse trinnene kan eventuelle avvik eller feil identifiseres og korrigeres, noe som bidrar til å oppnå de ønskede egenskapene i den ferdige betongen.

3.2. Metoder for å beregne fasthet og bestandighet:

Dette delkapittelet tar for seg beregningene av trykkfasthet, elastisitet og spaltestrekkfasthet.

3.2.1. Trykkfasthet

Trykkfasthet refererer til evnen betongen har til å motstå krefter som virker i retning mot hverandre langs betongens akse. Trykkfastheten til betong beregnes ved å teste prøver av betong i laboratoriet i henhold til NS-EN 12390-3 (7) [26], ved å påføre gradvis økende last på prøvene til de svikter. Den maksimale belastningen prøven tåler før brudd, divideres deretter med prøvens tverrsnittsareal for å beregne trykkfastheten i enheten. Formelen for å beregne trykkfasthet i henhold til NS-EN 12390-3 (8) [26], er som følger:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (2.)$$

Her er:

- f_c = trykkfastheten i MPa (N/mm^2)
- F = kraft ved brudd i N
- A = tverrsnittarealet som trykkraften virker mot

3.2.2. E – modul

Elastisitet i betong er materialets evne til å deformeres under påvirkning av ytre krefter, for så å kunne reverseres tilbake til opprinnelig form når kraften fjernes. Testingen blir utført ut ifra NS-EN 12390-13 [27].

Elastisitetsmodulen, E – modul, angir forholdet mellom stress (kraft per enhetsareal) og strekk (deformasjon) i materialet når det er under elastisk deformasjon. Jo høyere elastisitetsmodulen er, jo stivere er betongen, og jo mindre midlertidig deformasjon vil den oppleve under påvirkning av en gitt kraft. Formelen for å beregne elastisiteten i henhold til NS-EN 12390-13 [27] er som følger:

$$E_{c,s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0}} \quad (3.)$$

Her er:

- σ_a^m = øvre spenning

$$\sigma_a^m = \frac{f_c}{3}$$

$$f_c = \text{gj.sn. trykkfasthet} * 0,8$$

- σ_b^m = nedre spenning
- $\varepsilon_{a,1}$ = gj.sn. tøying øvre spenning ved 3. lastsyklus
- $\varepsilon_{b,0}$ = gj.sn. tøying øvre spenning ved 2. lastsyklus

3.2.3. Spaltestrekkfasthet

Spaltestrekkfasthet angir materialets evne til å motstå strekkrefter som virker vinkelrett på betongens overflate, og som kan føre til at materialet spalter eller revner. Dette blir testet i samsvar med NS-EN 12390-6 (7) [28].

Spaltestrekkfastheten blir regnet frem ved å doble kraften påført ved brudd, og dividere dette på tverrsnittet av cylinderen, ganget med kontaktlinjen, ganget med pi. Formelen for å beregne spaltestrekkfastheten i henhold til NS-EN 12390-6 (8) [28], er som følger:

$$\text{Spaltestrekkfasthet, } f_c = \frac{2 * F}{d * L * \pi} \quad (4.)$$

Her er:

- f_c = spaltestrekfasthet i MPa
- d = diameter i mm
- L = lengde av sylindereens kontaktlinje i mm
- F = kraft ved brudd i N

Den resulterende spaltestrekfastheten angis i enheten MPa, og den gir en indikasjon på hvor godt betongen tåler strekkbelastninger på tvers av overflaten, noe som er spesielt viktig for konstruksjoner som er utsatt for trekkbelastninger, for eksempel bjelker og gulvplater.

4. Prøveprogram/oppgave

4.1. Oppgave

Denne oppgaven fokuserer på testing av to nye typer miljøbetonger, Schwenk og VPI50, for å kunne se på bestandigheten og de mekaniske egenskapene sammenlignet med referansebetongen, Anlegg FA. Formålet er å identifisere alternativer som oppfyller bransjens krav og standarder, men med et lavere utslipp av CO₂.

I den praktiske delen av oppgaven ble det på laboratoriet støpt enheter av alle blandinger, og den flytende betongen ble testet. Etter støpningen gjennomgikk prøvene en rekke tester, hvor hensikten var å vurdere deres egenskaper. Resultatene fra disse testene blir lagt frem i kapittel 5. Der redegjøres det for hvilken av de to miljøbetongene som oppnådde best resultater.

Den mest egnede beregningsmodellen, EPD, vil bli brukt til å presist estimere CO₂-utslippene forbundet med konstruksjonen av et parkeringshus, for referansebetongen og for valgt miljøbetong. Grunnen for at EPD blir brukt, og ikke de andre beregningsmodellene som ble omtalt i litteraturdelen er at det er hensiktsmessig å bruke det standardiserte og verifiserte dokumentet en EPD er når man skal sammenligne miljøpåvirkningen, inkludert CO₂-utslippet, til ulike produkter. Parkeringshuset er casen i denne oppgaven og gjennomgås i kapittel 6.

Gjennom sammenligning av utslippene mellom referansebetongen og den beste miljøbetongen, vil de potensielle reduksjonene i klimapåvirkningen ved å bruke miljøvennlige alternativer bli illustrert.

I kapittel 7 presenteres et scenario der bruk av miljøbetong fører til en positiv miljøpåvirkning (netto null utslipp). Dette kapittelet vil inkludere tiltak for å oppnå utslippsmål i samsvar med forslagene fra Klimautvalgets NOU 2023: 25 Omstilling til lavutslipp – Veivalg for klimapolitikken mot 2050.

4.2. Betongblandinger

I sammenheng med denne oppgaven er det støpt og testet tre ulike betongsorter som refereres til som Anlegg FA, Schwenk og VPI50.

Målet med å støpe og å teste betong har vært å forsøke å oppnå en trykkfasthet etter 56 dager som samsvarer med trykkfasthetsklassen B55. Forholdet mellom vann og sement, v/c-tallet, har

derfor ikke vært identiske i de tre blandingene, men blitt satt til en verdi med mål om lik oppnådd trykkfasthet.

To separate blandinger ble produsert for hver betongtype. Det tilsvarer til sammen 6 blandinger.

POSS ble tilsatt i en av blandingene for to av betongtypene, Schwenk og VPI50, for å undersøke om dette påvirker bestandighetens egenskaper i betongen. Dette er et impregnerende middel som ble tilsatt i pulverform for å få en tettere betong.

K-verdien, som viser hvordan tilsetningsstoffene påvirker betongens bestandighetsegenskaper [12] ble satt til 1 i alle blandingene for enkelthetens skyld, selv om dette er noe mer konservativt i noen av tilfellene.

Fasthetsklassen for betongen som er testet skal oppfylle er B55. I henhold til tabell NA.2 i NS-EN 206 [20] skal den karakteristiske trykkfastheten for terningene være på minimum 67 MPa etter 28 eller 56 døgn.

4.2.1. Anlegg FA

Anleggssement FA fra Heidelberg Materials er brukt som referanse i denne oppgaven. Sementen i denne blandingen er laget av 100% klinker, og brukes til anleggskonstruksjoner. Den er egnet for alle eksponerings-, bestandighets- og fasthetsklasser [41].

4.2.2. Schwenk

Betongblandingen består av 50% Schwenk Miljøsement og 50 % Schwenk Lavvarmesement. Førstnevnte inneholder 30% slagg [29], og sistnevnte inneholder 70% slagg [30]. De resterende prosentene er sement laget av klinker. Det vil si at blandingen til sammen består av 50% slagg og 50% klinker. Begge blandingene har vært og er på markedet som to separate sementtyper, så det å kombinere de slik de er gjort i denne oppgaven er noe nytt, og muligens en måte å gjøre det på i fremtiden.

Schwenk Lavvarmesement har egenskaper som lav varme- og herdeutvikling, og gir et lavt CO₂-avtrykk noe som gjør den passende i prosjekter som krevet reduserte klimagassutslipp. Schwenk Miljøsement er en universalsement som anvendes i ferdigbetongproduksjon, elementindustri, betongvareproduksjon og injeksjon.

4.2.3. VPI50

VPI50 er en betongblanding som inneholder 50% klinker og 50% naturlig pozzolan fra Island. Pozzolan brukes som en erstatning for tradisjonell flygeaske og bidrar til å redusere betongens karbonavtrykk.

Denne nye typen sement er ennå ikke tilgjengelig på markedet, men potensialet for å redusere miljøpåvirkningen gjør den til en attraktiv kandidat for fremtidige byggeprosjekter. Ved å kombinere klinker og naturlig pozzolan, utnytter VPI50 de gode egenskapene til begge materialene.

4.3. Prøveprogram

Formålet med dette delkapittelet er å vise hva som ble produsert og hva de ulike betongblandingene består av.

Målet er å utvikle en miljøvennlig betong med samme holdbarhet og mekaniske egenskaper som konvensjonell betong produsert med portlandsement.

	Resept nr.	Sement, kg/m³	Sand, kg/m³	Stein, kg/m³	Poss, kg/m³	V/C – tall
Anlegg FA 1	1	357	920	920		0,45
Anlegg FA 2	2	357	920	920		0,45
Schwenk 1	3	342	920	920	0,51 kg	0,48
Schwenk 2	4	342	920	920		0,48
VPI50 1	5	371	920	920		0,42
VPI50 2	6	371	920	920	0,56 kg	0,42

Tabell 5 Forskjeller mellom de ulike betongblandingene

Resept nr.	Dato for støpning	Navn på blanding	Ant. terninger	Ant. sylindre	Superplastiserende, g
1	26.02.24	Anlegg FA 1	15	2	250
2	05.03.24	Anlegg FA 2	15	2	350
3	11.03.24	Schwenk 1	15	2	460
4	15.03.24	Schwenk 2	15	2	310
5	19.03.24	VPI50 1	15	2	358,4
6	22.03.24	VPI50 2	15	2	200

Tabell 6 Prøvetabell

4.4.Lab

I den praktiske delen av denne bacheloroppgaven, laboratoriedelen, ble det støpt og gjennomført testing av fersk og herdet betong i samsvar med standardens krav. Prosessen ble gjennomført som planlagt uten noen nevneverdige avvik.

Tre ulike typer betong ble støpt, og tester for synk og luftinnhold ble utført før den flytende betongen ble fordelt i former til sylindre og terninger. Prøvene ble deretter fjernet fra formene og lagt i vann for herding. Ved neste besøk i laboratoriet ble den herdede betongen testet. Toppen av sylindrene ble kuttet før testene ble utført for å gjøre siden helt slett, før de gjennomgikk måling av E-modulus og spaltestrekktest. Terningene ble testet for fasthet. Alle disse testene ble gjennomført i samsvar med standardens krav.

Resultatene fra testene blir lagt frem og diskutert i kapittel 5. Denne laboratoriedelen har fokusert på å samle inn data og informasjon som er nødvendig for å oppfylle målene i oppgaven. Prosessen har gått uten problemer. Arbeidsgangen er oppsummert som følger:

- støpning av prøver
- testing av synk og luftinnhold
- herding av prøver
- testing av herdet betong for kompresjon, E-modulus og spaltestrekk.

4.5. Beskrivelse av prøving og prøvingsmetoder:

Dette delkapittelet tar for seg den fysiske prøvingen som ble utført, og refererer til standarder underveis.

Formålet med testene er å vurdere betongens trykkfasthet og bestandighet, spesielt med tanke på å oppnå en trykkfasthet som samsvarer med B55-standardens etter 56 dager. Metodene som er blitt brukt inkluderer kompresjonstesting, elastisitetstesting og spaltestrekktesting, samt test av luftinnholdet og synktest.

I henhold til NS-EN 12390-1 [25] er alle testene utført på 28 dager og 56 dagers betong av 150 mm diameter x 300 mm sylindre, NS-EN 12390-1 4.3, og 150 mm terninger, NS-EN 12390-1 4.2

4.5.1. Synktest

Gjennomføringen ble utført i henhold til NS-EN 12350-2 7 [31]. Det ble sørget for at kjeglen, overflaten testen ble utført på, og stikkstangen var rene og frie for smuss og betongrester. Kjeglen ble plassert på en jevn og flat overflate før den ferdigblandede betongen ble hellet oppi delvis og komprimert med stangen for å fjerne eventuelle luftlommer og sikre at konet ble jevnt fylt. Betongen ble fylt til den steg over kanten, hvorefter konet ble fjernet forsiktig vertikalt og betongen sank ut. Betongen ble målt fra den opprinnelige høyden, som tilsvarer kjeglens høyde, til toppen av betongmassen, og diameteren på betongen ble målt.



Figur 1 Måling av diameter til synk

4.5.2. Luftinnholdstest

En luftmåler ble benyttet i henhold til NS-EN 12350-7 6 [32]. Beholderen ble fylt helt opp, i tråd med NS-EN 12350-7 6.2.2, og betongen ble komprimert ved hjelp av en stav i henhold til NS-EN 12350-7 6.2.4 [32]. Kanten ble grundig rengjort. Overdelen ble montert med klemmene på siden og kuleventilene ble åpnet. Vann ble fylt inn i den ene ventilen til det kom vann fri for luftbobler ut av den andre ventilen ved hjelp av en sprøyteflaske. Justeringsventilen ble deretter lukket og luftpumpehåndtaket løsnet. Trykket ble pumpet opp til manometerviseren viste ca. 10 mm over det røde merket. Deretter ble trykket justert forsiktig med justeringsventilen til viseren stod nøyaktig over det røde merket, og kuleventilene ble lukket. Hevarmen ble trykket ned til manometerviseren stabiliserte seg. Luftmengden i prosent ble så lest av direkte fra manometeret [22].

4.5.3. Kompresjonstest (terning)

Etter 28 dagers herding ble 150 mm terningene plassert i komprimeringsmaskinen, som oppfylte kravene i henhold til NS-EN 12390-4 [34]. Testen ble igangsatt ved å påføre en gradvis økende belastning på betongterningen. Testen ble stoppet idet den kontinuerlige påføringen av kraften avtok, og betongterningen sviktet.



Figur 2 Terning - prøvestykket gjennomgår kompresjonstest

4.5.4. E-modul (sylinder)

For å oppfylle kravene i NS-EN 12390-1 4.3.3.2 [25] angående flatheten på den bærende overflaten til sylinderen, ble den ujevne toppen av sylinderen kuttet av. Deretter ble en elastisitetmåler med fire kontaktpunkter festet på sylinderen før den ble plassert i komprimeringsmaskinen. Sylinderen ble deretter utsatt for aksielt trykk gjennom seks sykluser.



Figur 3 Sylinder – prøvestykket gjennomgår test av E-modul

4.5.5. Spaltestrekk (sylinder)

I henhold til NS-EN 206 5.5.1.3 (1) [20] ble prøvestykkene spaltestrekktestet etter 28 dager. Sylinderen ble plassert horisontalt i en jig, i tråd med NS-EN 12390-6 5.2 [28], etter at toppen var blitt kuttet av for å oppfylle kravene i NS-EN 12390-1 4.3.3.2 [21]. Det var viktig at sylinderen lå helt rett og sentrert i jigen oppå stripsene for å sikre en jevn belastningsfordeling, i samsvar med NS-EN 12390-6 5.3. En gradvis økende belastning ble påført i en jevn hastighet i lengderetningen frem til prøvestykket brøt. Hele prosedyren ble gjennomført i henhold til NS-EN 12390-6 7 [28].



Figur 4 Resultat som viser innside av prøvestykket etter spaltestrekkfasthet-test



Figur 5 Resultat etter spaltestrekkfasthet-test i maskin

5. Resultat

I dette kapitlet gjennomgås resultatene av testene som er utført. I det tidligere kapitlet, metodekapitlet, ble det beskrevet hvordan testene ble utført, både for fersk betong og herdet betong. De mekaniske egenskapene til betongen blir gjennom de ulike testene vurdert, og denne delen av oppgaven gir en oversikt over resultatene.

For ikke-herdet betong inkluderer resultatene tester fra synk og luftinnhold. Disse testene gir informasjon om betongens ferske tilstand og dens egenskaper før herding. I neste trinn presenteres resultatene for tester av herdet betong, inkludert kompresjonstest, E-modul og spaltstrekktest. Disse testene viser betongens styrke, sprekkmotstand og elastisitet etter herding, og er avgjørende for å vurdere materialets egnethet til konstruksjonsformålet.

Dataene som her har blitt samlet inn er med på å danne grunnlaget for videre vurdering og konklusjoner i oppgaven.

5.1. Resultat, fersk betong

5.1.1. Synktest

Tabell 7 viser resultatene fra synktestene for de ulike betongblandingene, metode i kapittel 3.3.1.

Test	Synkutbredelse (mm)	Synk radie (flow, mm)
Anlegg FA 1	230	550/580
Anlegg FA 2	230	440
Schwenk 1	230	510/570
Schwenk 2	260	680/690
VPI50 1	230	530/570
VPI50 2	250	540/600

Tabell 7 Resultater synktest

Alle betongblandingene tilhører klasse S5 i henhold til NS-EN 206 Table 3 [20] som viser god konsistens og flyteevne.

5.1.2. Lufttest

Tabell 8 presenterer resultatene fra luftinnholdstestene, metode i 3.3.2.

Fersk Betong	Luft (%)
Anlegg FA 1	X
Anlegg FA 2	X
Schwenk 1	X
Schwenk 2	0,1
VPI50 1	0,5
VPI50 2	1,1

Tabell 8 Resultater lufttest

Luftinnholdet i betongen ble ikke testet for Anlegg FA og den første Schwenk-blandingene. Resultatene for de andre blandingerne ligger innenfor akseptable grenser i henhold til NS-EN 206 NA.12 [19]

5.2. Resultat, herdet betong

5.2.1. Trykkfasthet

Som nevnt tidligere i oppgaven var det kravet etter fasthetsklasse B55 de tre betongblandingerne skulle tilfredsstillende. Den karakteristiske terningsfastheten skal da være minimum 67 MPa i henhold til NS-EN 206 NA. 2 [20].

Tabell 9 viser resultatene fra trykkfasthet målt på terninger av herdet betong ved 7, 28 og 56 dager, metode i 3.3.3.

	7 dager, MPa	28 dager, MPa	56 dager, MPa
Anlegg FA	43,5	64,3	74,1
Schwenk	43,6	72,3	80,6
VPI50	40,6	69,6	78,8

Tabell 9 Resultater kompresjonstest

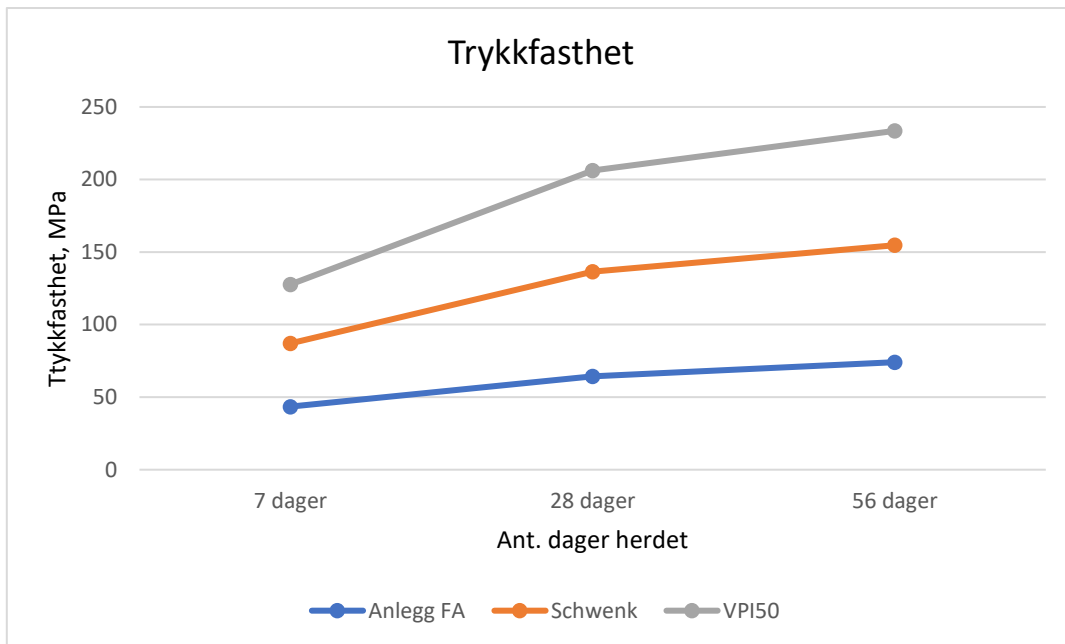


Diagram 1 Resultater kompresjonstest

Resultatene viser at Anlegg FA som ble brukt som referansebetong ga lavest verdier. En del av årsaken er at vann-til-sement-forholdet (v/c-tallet) for denne blandingen viste seg å være høyere enn hva som senere ble ansett som ideelt. Likevel tilfredsstillers alle blandingene kravet til fasthetsklasse B55 etter 56 dager herding.

Vedlegg B2 viser at den første testingen av Anlegg1 FA ga vesentlig lavere trykkfasthet. Fokuset her var å teste utstyr og fremgangsmåte. Grunnen til lave verdier i resultatet fra målt trykkfasthet er at blandingsforholdet ikke ble akkurat som det skulle være ifølge A1

5.2.2. E-modul

Tabell 10 presenterer resultatene fra testen av E-modul, metode i 3.3.4.

	E_{c,s}, GPa
Schwenk	36,9
VPI50	35,7

Tabell 10 Resultater e-modul

Resultatene viser at Schwenk har en E – modul 3,4% høyere enn VPI50. Dette indikerer at Schwenk-betongen er noe stivere enn VPI50, noe som kan ha betydning for konstruksjonens evne til å tåle deformasjon under belastning.

Vedlegg B4 viser at det ble tatt totalt 4 tester av Schwenk, men kun 3 av VPI50. Av hver betongtype, ble to ulike blandinger testet, med to tester av hver, utenom VPI50 2. Grunnen var at sylindren ikke tilfredstilte kravet i NS-EN 12390-1 4.3.3.3 [25] om ikke å være rett nok til at testen kunne blitt utført på riktig måte, og resultatet ville derfor ikke vært pålitelig. Det ble derfor kun gjennomført én test av VPI50 2 for å sikre nøyaktige og pålitelige resultater.

5.2.3. Spaltestrekk

Resultatene fra test av spaltestrekk ble lavere enn ønsket og forventet. En tommelfingerregel er at spaltestrekkfastheten skal ligge på omtrent 10% av trykkfastheten i betong. Tabellen nedenfor viser de gjennomsnittlige verdiene for de tre blandningene.

Tabell 11 viser resultatene fra test av spaltestrekkfasthet, metode i 3.3.5.

	Spaltestrekk, MPa	Andel av trykkfasthet, %
Anlegg FA	3,1	4,8
Schwenk	3,8	5,3
VPI50	3,5	5,0

Tabell 11 Resultater spaltestrekk

Schwenk-betongen hadde den høyeste spaltestrekfastheten med et gjennomsnitt på 3,8 MPa, som tilsvarer 5,3% av trykkfastheten. Selv om dette er en høyere andel av trykkfastheten enn de andre betongblandingene, er det fortsatt lavere enn forventet. Flere faktorer kan ha påvirket resultatene, inkludert mulige unøyaktigheter under testing, utstyrsfeil, eller andre uforutsette variabler som kan ha påvirket prøvene negativt.

Betong har generelt en strekkstyrke som er betydelig lavere enn trykkfastheten. Derfor er det vanlig å forsterke betong som skal utsettes for trekkrefter med armering laget av materialer som har høyere strekkfasthet. Denne praksisen sikrer at konstruksjonene kan motstå strekkbelastninger effektivt og opprettholde strukturell integritet. For fremtidige tester kan det være hensiktsmessig å undersøke og eliminere potensielle feilkilder for å forbedre nøyaktigheten av spaltestrekfasthetsmålingene.

5.2.3.1. Avvik på 56-dagers test

Noen av 56-dagers testene ble utført før 56 dager var gått på grunn av en forsinkelse i støpeprosessen. For å ha resultater klare til fristen for oppgaveinnlevering, ble noen prøver testet før 56 dager. Resultatene er fortsatt veldig gode, tilfredsstillende alle krav, og det er en veldig liten forskjell som utgjør de siste dagene med herding.

5.3.Resultater, POSS

POSS, Polyhedriske Oligomere Silsesquioxaner, ble tilsatt i resept nr. 3 og nr. 6. Det vil si at en av Schwenk-blandingene og en av VPI50-blandingene inneholdt tilsetningsstoffet. Resultatene i tabell 11 viser effekten av POSS på betongens mekaniske egenskaper. Formålet er å evaluere den mulige innvirkningen av POSS på betongens mekaniske egenskaper.

	Poss, kg/m³	Trykkfasthet 56 dager, MPa	E – modul, GPa	Spaltestrek, MPa	Spaltestrek, Andel av trykkfasthet, %
Schwenk 1	0,51 kg	78,9	35,1	3,9	4,9
Schwenk 2		82,3	38,7	3,8	4,6
VPI50 1		80,2	37,2	3,6	4,5
VPI50 2	0,56 kg	77,3	34,2	3,6	4,7

Tabell 12, resultater POSS

Produsenten av POSS hevder at hensikten med tilsetningsstoffet er å forbedre styrken til konstruksjoner og å beskytte dem mot mindre sprekker, vannmigrasjon, utlekking og korrosjon [17]. Til tross for disse påståtte fordelene, viser testresultatene en minimal forskjell mellom betongprøver med og uten POSS-tilsetning. Dette antyder en manglende overbevisende effekt av POSS på betongens mekaniske egenskaper, spesielt når det gjelder kompresjonsstyrke og e-modul. Imidlertid er det verdt å merke seg at prøvene med POSS oppnådde bedre resultater i spaltestrekktesten. Denne tilsynelatende inkonsekvente effekten kan indikere at POSS har en spesifikk innvirkning på materialets evne til å motstå spenning og sprekke dannelse under visse forhold. Likevel krever disse resultatene videre undersøkelse for å avgjøre den faktiske effekten av POSS-tilsetning på betongens ytelse og pålitelighet i ulike bruksområder.

5.4. Sammenligning av resultater fra herdet betong med standard

Resultatene fra testene på trykkfasthet, E-modulus, og spaltestrekk for de ulike betongblandingene viser andre trender sammenlignet med standarder. For eksempel viser trykkfastheten for Schwenk-betongen en økning på 20% sammenlignet med den typiske fasthetsklassen B55, som forventer en trykkfasthet på 67 MPa etter 56 dager, ifølge NS-EN 206 [33].

$$\frac{80,6 \text{ MPa} - 67 \text{ MPa}}{67 \text{ MPa}} * 100\% = 20\%$$

Denne betongen oppnådde en trykkfasthet på 80,6 MPa, noe som tyder på en potensielt høyere ytelse under spesifikke forhold.

Dette viser at Schwenk-betongen kan være et godt valg for prosjekter som trenger ekstra sterk betong. Imidlertid var resultatene for spaltestrekkfasthet noe lavere enn forventet. Mens industrielle standarder typisk forventer en spaltestrekkfasthet som er omtrent 10% av trykkfastheten, registrerte Schwenk-betongen en spaltestrekkfasthet på kun 5.8% av dens trykkfasthet. Dette tyder på at det er nødvendig med mer undersøkelse for å finne ut hva som kan gjøres for å forbedre spaltestrekk fastheten.

Begge miljøbetongene har gitt resultater fra testingen som svarer til kravene i henhold til NS-EN 206, likevel er det Schwenk som har levert høyest trykkfasthet, e-modulus og spaltestrekk. Dette gjør at det er den som blir brukt videre i oppgaven.

5.5.Potensielle begrensninger

Begrenset Utvalg av Betongblandinger:

Oppgaven inkluderer kun tre spesifikke betongblandinger: Anlegg FA, Schwenk og VPI50. Dette utvalget begrenser muligheten for å generalisere funnene til alle typer miljøvennlig eller tradisjonell betong. Andre betongtyper med ulike sammensetninger og egenskaper kan gi forskjellige resultater.

Antall Prøver:

Antallet prøver som ble testet for hver betongblanding kan påvirke påliteligheten av resultatene. Et større antall prøver ville gitt mer robuste data og redusert usikkerheten knyttet til variabilitet mellom prøvene. Flere tester kunne ha bidratt til mer presise og generaliserbare konklusjoner.

Laboratorieforhold vs. Reelle Forhold:

Testene ble utført under kontrollerte laboratorieforhold som ikke nødvendigvis reflekterer forholdene som kan være på byggeplasser. Faktorer som temperatur, fuktighet og håndtering kan påvirke betongens egenskaper i praksis, og disse forholdene kan variere betydelig fra laboratoriemiljøet.

Tidsbegrensninger:

Resultatene er basert på herdetider opp til 56 dager. Hadde man sett på betongens egenskaper over flere måneder eller år, kunne man gitt et bedre bilde av materialets ytelse og holdbarhet over tid. Egenskaper som krymping, kryping og langvarig holdbarhet ble ikke vurdert i denne oppgaven.

Standarder og Metoder:

Selv om standardiserte metoder ble brukt, kan det være små variasjoner i hvordan disse metodene ble implementert. For eksempel, små forskjeller i blandingsprosessen, komprimeringsteknikker eller prøvehåndtering kan påvirke resultatene.

Innovasjonsstadiet for VPI50:

VPI50 er en ny type sement som ennå ikke er tilgjengelig på markedet. Dette betyr at produksjonsprosessen og materialkvaliteten fortsatt er under utvikling.

6. Case

Dette kapitlet tar for seg en praktisk anvendelse av de tidligere analysene og resultatene presentert i denne bacheloroppgaven. Dette gjøres i form av utvikling av et parkeringshus. Tidligere i oppgaven er det gjennomført testing av mekaniske egenskaper i en referansebetong, Anlegg FA, og to miljøbetonger, Schwenk og VPI50, i tillegg til en gjennomgang av flere beregningsmodeller for å beregne utslipp. I dette kapitlet vil Environmental Product Declaration (EPD) bli brukt for å beregne utslippene i forbindelse med byggingen av et parkeringshus.

EPD har blitt valgt som verktøyet for utslippsberegninger siden det gir pålitelige og sammenlignbare resultater. Ved å bruke EPD får man en nøyaktig oversikt over utslippene for både referansebetongen og miljøbetongen.

Hovedmålet med caset er å demonstrere at miljøbetongen, som er testet og analysert tidligere i oppgaven, kan være et like godt alternativ som referansebetongen. Ved å vise at miljøbetongen oppfyller de samme kravene til mekaniske egenskaper, tilfredsstiller kravet til fasthetsklasse B55 etter 56 dagers herding, og samtidig reduserer klimaavtrykket, vil caset vise at miljøbetongen er et reelt alternativ for bærekraftig bygging i praksis.

Elementene parkeringshuset er bygget opp av er meget forenklet i forhold til hva det ville vært i praksis. Tross forenklingen gir det et godt bilde på mengden betong som ville gått med til et parkeringshus med samme størrelse i virkeligheten. Når mengdene er omtrent like, gjør det at beregningene gir en god indikasjon på den totale mengden betong som vil bli brukt i et parkeringshus av tilsvarende størrelse i virkeligheten.

Parkeringshuset består av et dekke og et tak med en lengde på 50 meter, bredde på 20 meter, og tykkelse på 0,3 meter. Søylene har et tverrsnitt på 0,4 meter * 0,4 meter, og en høyde på 4 meter. Det er til sammen 30 søyler.

Parkeringshuset er plassert i Stavanger sentrum, armeringen blir transportert fra Forus (12km), og betongen blir transportert fra Sola (14 km), begge deler med lastebiler.

For beregning av utslipp for betong og armering er det EPD tilhørende riktig produkt som brukes for kg CO₂-ekvivalenter. For beregning av transport fra leverandør til byggeplass

benyttes regneark fra Miljødirektoratet. Andre elementer som ville vært inkludert i et virkelig parkeringshus, som belysning, parkeringslinjer, betalingsautomater, osv., er ikke tatt med i beregningene i denne oppgaven.

Tabell 11 er flytskjemaet som illustrerer systemgrensene er blitt brukt for beregningen til EPD-ene til armeringsnett, kamstål og alt av betong.

A1-A3 Product Stage			A4-A5 Construction Process Stage		B1-B7 Use Stage							C1-C4 End of Life Stage				D Benefits and loads beyond the system boundary			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
Raw Material Supply	Transport to Manufacturer	Manufacturing	Transport to building site	Installation into building	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Deconstruction / demolition	Transport to end of life	Waste Processing	Disposal	Reuse	Recovery	Recycling	Exported energy / Potential

Tabell 13 Livssyklus for en bygning definert i NS-EN 15978:2011 [34]

6.1. Transport

6.1.1. Transport betong

Dekke og tak har en lengde på 50 m, bredde på 20 m og høyde på 0,3. Hver søyle har en lengde og bredde på 0,4 m, høyde på 4 m. Totalt 30 stk. søyler.

$$50 \text{ m} * 20 \text{ m} * 0,3 \text{ m} * 2 + 0,4 \text{ m} * 0,4 \text{ m} * 4 \text{ m} * 30 = 619,3 \text{ m}^3$$

Totalt volum for betong inkluderende dekke, tak og søyler er 619,2 m³.

Alt av betong ankommer byggeplass som fersk betong klar for utstøping på anlegget, ikke som ferdig-støpte prefabrikkerte enheter. En betongbil kan i gjennomsnitt kan ta med seg 4-8 kubikk.

Det tilsvarer ca. 100 turer tur-retur mellom Sola, hvor betongen leveres fra, og til Stavanger sentrum der parkeringshuset skal bygges. Utslipet for transporten av en gjennomsnittlig dieseldrevet betongbil blir på 928g CO₂-ekvivalenter per km [35]. Totale km blir 2800km.

$$928 \frac{g}{km} * 2800 \text{ km} = 1299200 \text{ g} = 1299,2 \text{ kg}$$

Utslipet for transport av betong blir på 1299,2 kg CO₂-ekvivalenter.

6.1.2. Transport armering

For å frakte 24,8 tonn armering fra Forus, hvor leverandøren er, til Stavanger sentrum blir utslippet på 928g CO₂-ekvivalenter per km [35]. Totale km tur – retur blir 24 km.

$$928 \frac{g}{km} * 24 \text{ km} = 22300 \text{ g} = 22,3 \text{ kg}$$

Totalt utslipp blir 22,3 kg CO₂-ekvivalenter.

6.2. Armering

For enkelthetens skyld tas det utgangspunkt i at samme mengde og samme type armering brukes uavhengig av hvilken type betong som blir brukt. 40 kg armering per kubikk betong.

6.2.1. Armeringsnett

Lengde på 50 m, bredde på 20 m og høyde på 0,3 for dekke og tak.

$$50 \text{ m} * 20 \text{ m} * 0,3 \text{ m} * 2 = 600 \text{ m}^3$$

Dekke og tak tilhørende parkeringshuset har et samlet volum på 600 m³.

$$40 \frac{kg}{m^3} * 600 m^3 = 24000 kg = 24 \text{ tonn}$$

24 tonn armering er det som er behovet. Per 1 kg armeringsnett er det et utslipp på 1,5487 kg CO₂-ekvivalenter, inkludert A1-A3, C1-C4 og D [36].

$$1,5487 \frac{kg}{kg} * 24000 kg = 37168,8 kg$$

Utslippet for armeringsnettet er 37168,8 kg CO₂-ekvivalenter.

6.2.2. Armering kamstål

Lengde og bredde på 0,4 m, høyde på 4 m for hver søyle. Totalt 30 stk.

$$0,4 m * 0,4 m * 4 m * 30 = 19,2 m^3$$

Søylene tilhørende parkeringshuset har et samlet volum på 19,2 m³.

$$40 \frac{kg}{m^3} * 19,2 m^3 = 768 kg$$

768 kg kamstål er det samlede behovet for søylene. Per 1 kg kamstål er det et utslipp på 0,6920 kg CO₂-ekvivalenter, inkludert A1-A3, C1-C4 og D [37].

$$0,6920 \frac{kg}{kg} * 768 kg = 531,5 kg$$

Utslippet for kamstålet er 531,5 kg CO₂-ekvivalenter.

6.3. Oppsummering – utslipp som er uavhengig av betongtype

	Utslipp, kg CO ₂ -ekvivalenter
Transport – betong	1299,2
Transport – armering	22,3
Armeringsnett	37168,8
Kamstål	531,5
SUM UTSLIPP	= 39021,8

6.4. Betong

$$600m^3 + 19,2m^3 = 619,3 m^3$$

Totalt volum for betong inkluderende dekke, tak og søyler er 619,2 m³.

6.4.1. Anlegg FA

Per 1 tonn sement er det et utslipp på 602 kg CO₂-ekvivalenter, inkludert A1-A3 [38].

Densiteten til betongblanding Anlegg FA er 2388 kg/m³ [vedlegg 2].

$$619,2 m^3 * 2388 \frac{kg}{m^3} * 602 \frac{kg}{1000 kg} = 890147059 kg$$

Utslipet for betongblanding Anlegg FA er 890147059 kg CO₂-ekvivalenter.

$$890147059 kg + 39021,8 kg = 890186081 kg = 890186,1 tonn$$

Dermed er 890186,1 tonn det totale klimagassutslippet for parkeringshuset når betongblandingen Anlegg FA brukes.

6.4.2. Schwenk

Per 1 tonn sement er det et utslipp på 253 kg CO₂-ekvivalenter, inkludert A1 – A3 i Schwenk Lavvarmesement [38], og i Schwenk Miljøsement er det et utslipp på 545 kg CO₂-ekvivalenter per 1 tonn sement, inkludert A1 – A3 [39]. Siden betongblandingen inneholder like store andeler av hver blanding får betongblandingen brukt i testene et utslipp på 8,1358 kg CO₂-ekvivalenter.

Densiteten til betongblanding Schwenk er 2376 kg/m³ [vedlegg 5].

$$619,3 m^3 * 2376 \frac{kg}{m^3} * 399 \frac{kg}{1000 kg} = 587111263kg$$

Utslipet fra betongblanding Schwenk er 11971478,2 kg CO₂-ekvivalenter.

$$587111263 kg + 39021,8 kg = 587150285 kg = 587150,3 tonn$$

Dermed er 587150,3 tonn det totale klimagassutslippet for parkeringshuset når betongblandingen Schwenk brukes.

6.5.Oppsummering case

Kapitlet har tatt for seg en praktisk bruk av både referansebetongen Anlegg FA og miljøbetong Schwenk, i byggingen av et fiktivt parkeringshus i Stavanger. EPD er benyttet for å beregne og sammenligne CO₂-utslippene forbundet med produksjon og transport av de to betongtypene.

Gjennom beregningene viste Schwenk-betongen å ha et betydelig lavere CO₂-utslipp sammenlignet med Anlegg FA-betongen. Ved å bruke Schwenk-betong i byggeprosjektet, reduserer man ikke bare de direkte klimagassutslippene betydelig, men demonstrerer også at høykvalitets byggematerialer kan oppnå både teknisk overlegenhet og miljøvennlighet.

Caset understreker betydningen av valg av materialer, hvor bærekraftige alternativer ikke bare oppfyller, men kan overgå de mekaniske og miljømessige kravene som er stilt. Bruken av Schwenk-betong i et stort prosjekt som dette illustrerer hvordan nye løsninger kan bidra til å redusere byggebransjens miljøfotavtrykk.

7. Diskusjon

Mot nullutslipp innen betongproduksjon

I en verden påvirket av klimaendringer, er behovet for bærekraftige løsninger i byggebransjen mer aktuelt enn noensinne. Produsenter av byggematerialer, spesielt de som er ansvarlige for produksjonen av sement og betong, spiller en sentral rolle i å redusere klimaavtrykket. Disse materialene utgjør en betydelig del av byggebransjens totale karbonavtrykk, både på grunn av de høye utslippene knyttet til produksjonsprosessen og den omfattende globale bruken. Derfor har et regjeringsoppnevnt utvalg kommet med dokumentet «Omstilling til lavutslipp». Dokumentet er en utredning av nødvendige tiltak for å kunne nå målet om at Norge blir et lavutslippssamfunn innen 2050 [1].

En viktig strategi for å oppnå nullutslipp innen betongproduksjon er gjennom utvikling og bruken av nye typer sement med redusert karbonavtrykk. Resultatene fra testene gjennomført i forbindelse med denne oppgaven har vist at mer miljøvennlig betong ikke nødvendigvis innebærer dårligere tekniske egenskaper. Gitt de høye utslippene fra produksjon av tradisjonell Portland-sement, som fortsatt blir brukt som det primære bindemiddelet i betongproduksjon, må alternative bindemidler og produksjonsmetoder undersøkes og tas i bruk for å kunne redusere klimaavtrykket.

Naturlig vulkansk pozzolan aske fra Island representerer et fremtidig alternativ til flygeaske, som i dag er et biprodukt fra en industri med høye CO₂-utslipp. Med nedgangen i kullkraftverk øker behovet for å finne bærekraftige materialalternativer. Vulkansk pozzolan aske tilbyr potensielle miljøfordeler på grunn av sin naturlige opprinnelse og kan redusere avhengigheten av fossilt avledede biprodukter, og fremme en mer bærekraftig praksis innen byggebransjen.

Som nevnt er de vanligste tilsetningsmaterialene effektive kun i kombinasjon med Portland-sement, inkludert vulkansk pozzolan aske. Derfor vil det alltid være en andel sementklinker i sementen, så det er avgjørende å minimere utslippene så mye som mulig. Oppvarming av ovnene, som er nødvendig for kalsineringen, krever mye energi. Ved å benytte alternative drivstoffkilder som biomasse eller fornybare ressurser som erstatning for tradisjonelt fossilt brensel, bidrar man til å redusere CO₂-utslippene

Siden man ikke kommer utenom enn viss mengde portlandsement i betongen, kommer man heller ikke utenom CO₂-en som spaltes av i kalsineringsprosessen. Karbonfangst og lagring (CCS) av 100% av utslippet avgjørende for å nå nullutslippsmålene.

I dag fanges og lagres omtrent halvparten av CO₂-utslippene fra produksjonen av Portlandsement i Brevik. Ved å øke denne andelen til 100%, kan vi vesentlig påvirke det totale miljøregnskapet i positiv retning. Netto CO₂-utslipp kan dermed bli negativt, ettersom mer CO₂ potensielt kan absorberes gjennom karbonatiseringsprosessen når betongen er i bruk, enn det som frigjøres under produksjon.

Karbonatisering bidrar til det totale miljøregnskapet ved å binde CO₂ fra luften i herdet betong over tid. Heidelberg Materials er i ferd med å utvikle en sement som gjør det mulig å bygge med betong som ikke etterlater seg et karbonavtrykk, altså en betong med netto-null utslipp [40]. En kombinasjon av karbonfangst og -lagring, sammen med karbonatiseringen naturlige prosess gjør dette mulig.

Videre må hele livssyklusen av betong vurderes, inkludert hvordan all maskinbruk og transport knyttet til produksjon og byggeplassaktiviteter kan elektrifiseres. I henhold til det regjeringsoppnevnte utvalget, forventes det at alle anleggsmaskiner elektrifiseres [1]. Denne elektrifiseringen av anleggsmaskiner og transportmidler vil bidra til betydelige utslippsreduksjoner og støtte opp under målet om nullutslipp.

Det er rom for en mer tilpasset tilnærming til bruk av tilsetningsstoffer i betongproduksjonen, spesielt i områder med mildere klima hvor kravene til frostbestandighet er lavere. Ved å redusere overdimensjoneringen i betongkonstruksjoner kan man ytterligere redusere både materialbruk og klimapåvirkning.

Når betongen avslutter sin livssyklus, er gjenbruk sentralt: Den knuses for å resirkulere armeringen og bruke betongfragmentene som tilslag i ny betongproduksjon. Moderne tiltak gjør gjenbruk mer lønnsomt, men rehabilitering av bygg fremfor riving er fortsatt mindre vanlig, delvis grunnet manglende reguleringer i Byggeteknisk forskrift og Plan- og bygningsloven [1]. Oppdateringer av disse lovene kan fremme ombruk og energieffektivisering ved å sette klare krav.

Selv om materialer som tre og stål tradisjonelt har vært sett på som mer miljøvennlige enn betong, viser moderne, miljøvennlig betong, at den kan oppnå høy styrke og bestandighet med betydelig reduserte CO₂-utslipp. En av de mest bemerkelsesverdige funnene i denne studien er at miljøbetongene viser egenskaper som både tilsvarer og overgår referansebetongen. Schwenk-betongen utmerker seg med en trykkfasthet på 80,6 MPa etter 56 dager, mens VPI50-betongen oppnår 78,8 MPa. Til sammenligning viser referansebetongen Anlegg FA en trykkfasthet på

74,1 MPa. Dette indikerer at begge miljøbetongene ikke bare oppfyller kravet til fasthetsklasse B55, men også demonstrerer en høyere styrke enn den tradisjonelle betongen.

Mer miljøvennlig betong, som de testede Schwenk- og VPI50-betongene, viser at det er mulig å oppnå høy styrke og bestandighet samtidig som CO₂-utslippene reduseres betydelig. Dette representerer en betydelig forbedring i både miljøpåvirkning og tekniske egenskaper, noe som understreker betongens potensial i en bærekraftig byggebransje. Schwenk-betongen, med sin lavere CO₂-utslipp sammenlignet med referansebetongen, fremstår som et spesielt bærekraftig alternativ. Dette kan bidra til å redusere byggebransjens karbonavtrykk uten å gå på kompromiss med styrke.

For å realisere ambisjonen om nullutslipp i betongproduksjonen kreves en innsats fra industri, forskningsmiljøer og myndigheter. Med riktig støtte og innovasjon kan dette målet ikke bare være realistisk, men også økonomisk og praktisk gjennomførbart innen den fastsatte tidsrammen av regjeringens klimamål for 2050.

8. Konklusjon

Denne bacheloroppgaven har undersøkt bruk av miljøvennlige betongblandinger innenfor bygg- og anleggsbransjen. Dette er en industri som spiller en avgjørende rolle for å nå bærekraftige utviklingsmål, på grunn av dens betydelige miljøpåvirkning.

Gjennom bruk av beregningsmodellen EPD og praktiske tester, har det blitt vist at miljøbetong ikke bare kan møte de tekniske kravene som stilles i byggeprosjekter, men også redusere CO₂-utslippene sammenlignet med tradisjonell betong.

Oppgaven har vist at alternative blandinger som Schwenk-blandingen og bruk av vulkansk pozzolan som erstatning for flygeaske kan tilby betydelige miljøfordeler uten å gå på kompromiss av de mekaniske egenskapene. Disse funnene støttes av data fra testene hvor Schwenk-betong demonstrerte høyere trykkfasthet og bedre miljøprestasjon enn referansebetongen Anlegg FA. Videre har bruken av POSS i betongblandinger vist seg å ha en positiv, men begrenset, innvirkning på spaltestrekkfastheten, noe som indikerer potensialet for ytterligere forbedringer i betongens sprekkmotstand.

Casestudien om parkeringshuset har illustrert hvordan praktisk bruk av miljøvennlige betongblandinger kan realiseres i virkelige byggeprosjekter. Ved å velge miljøvennlige materialer kan vi oppnå betydelige kutt i CO₂-utslippene, som demonstrert ved de lavere utslippstallene for Schwenk-betong sammenlignet med referansebetongen. Dette understreker viktigheten av materialvalg og viser at bærekraftige praksiser kan implementeres effektivt i konstruksjonssektoren.

Oppgaven understreker også nødvendigheten av fortsatt forskning og utvikling innen betongproduksjonens teknologier for å møte fremtidige klimamål. Bruken av avanserte teknikker som karbonfangst og -lagring (CCS) og karbonatiseringsprosesser for herdet betong kan ytterligere redusere miljøpåvirkningen gjennom hele livssyklusen.

Disse resultatene viser tydelig at overgangen mot et samfunn med lavere utslipp krever en tilnærming der innovasjon støttes av teknologisk utvikling og endringer i regelverk og standarder for å fremme bruk av bærekraftige materialer

For at Norge skal nå sine klimamål innen 2050, er det avgjørende at bygg- og anleggsbransjen fortsetter å prioritere og integrere miljøvennlige løsninger i alle ledd av produksjons- og byggeprosessen.

9. Referanser

- [1] «NOU 2023:25 Omstilling til lavutslipp,» 2023.
- [2] «epd-norge.no,» [Internett]. Available: <https://www.epd-norge.no/>. [Funnet februar 2024].
- [3] «youtube.com,» [Internett]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=g8egvshD_Sc. [Funnet februar 2024].
- [4] «epd-norge.no,» [Internett]. Available: <https://www.epd-norge.no/pcr/pcr-register/>. [Funnet februar 2024].
- [5] «epd-norge.no,» [Internett]. Available: <https://www.epd-norge.no/lage-epder/>. [Funnet februar 2024].
- [6] «lca.no,» [Internett]. Available: <https://lca.no/en/what-is-lca/>.
- [7] «athenasmi.org,» [Internett]. Available: <https://www.athenasmi.org/resources/about-lca/whats-the-difference/>. [Funnet februar 2024].
- [8] «athenasmi.org,» [Internett]. Available: <https://www.athenasmi.org/resources/about-lca/whats-the-difference/>. [Funnet februar 2024].
- [9] «ecochain.com,» [Internett]. Available: <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-lca-guide/>. [Funnet februar 2024].
- [10] «linkedin.com,» [Internett]. Available: https://www.linkedin.com/advice/3/what-difference-between-life-cycle-analysis-dhzkc?trk=public_post. [Funnet februar 2024].
- [11] «byggalliansen.no,» [Internett]. Available: <https://byggalliansen.no/sertifisering/om-breeam/nysgjerrig-pa-breeam-nor/>. [Funnet februar 2024].
- [12] Norsk Betongforening, «Publikasjon nr. 37 - Lavkarbonbetong,» Norsk Betongforening, 2020.
- [13] «sement.heidelbergmaterials.no,» [Internett]. Available: <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/sementproduksjon-co2>. [Funnet mars 2024].
- [14] K. O. K. o. L. H. B. P. Thyholdt, «Nye sementtyper og ny produksjonsteknologi skaper fremtidens betong,» *Rapport nr. 6 BETONG OG MILJØ*, oktober 2018.

- [15] «www.sement.heidelbergmaterials.no,» [Internett]. Available: https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/vulkansk_aske. [Funnet april 2024].
- [16] S. F. V. F. A. C. F. A. D. Breilly, «[sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com/),» [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821018250>. [Funnet mars 2024].
- [17] L. B. T. F. T. B. M. E. J. Z. A. S. K.T. Fosså, «[sintef.no](https://www.sintef.no/),» [Internett]. Available: https://www.sintef.no/contentassets/04444eb286404e2ca6d2e71ab4399799/be-strong---m1-1_.pdf. [Funnet april 2024].
- [18] Gassnova, «ccsnorway.com,» [Internett]. Available: <https://ccsnorway.com/no/fangst-heidelberg-materials/>. [Funnet mars 2024].
- [19] Heidelberg Materials Sement Norge, «[youtube.com](https://www.youtube.com/watch?v=5HHHN2s9ZCA),» [Internett]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=5HHHN2s9ZCA>. [Funnet mars 2024].
- [20] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «NS-EN 206:2013, Betong- Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar,» Standard Norge, 2022.
- [21] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «NS-EN 197-1, Sement Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper,» Standard Norge, 2011.
- [22] Betongsentrum, «[betongsentrum.no](https://www.betongsentrum.no/),» [Internett]. Available: <https://www.betongsentrum.no/valg-av-riktig-betongkvalitet/>. [Funnet mars 2024].
- [23] Norsk Betongforening, «Rapport nr. 6 BETONG OG MILJØ,» 2018.
- [24] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «Prøving av herdnet betong - Del 2: støping og herdning av prøvelegemer for fasthetsprøving,» Standard Norge, 2019.
- [25] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «Prøving av herdnet betong - Del 1: Form, mål og andre krav til prøvelegemer og former,» Standard Norge, 2021.
- [26] Den Europeiske standardiseringsorganisasjonen, «Prøving av herdet betong - Del 3: Prøvelegemets trykkfasthet,» Standard Norge, 2019.
- [27] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «Prøving av herdnet betong - Del 13: Bestemmelse av sekantmodul for elastisitet under trykk,» Standard Norge, 2021.
- [28] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «Prøving av herdnet betong - Del 6: Prøvelegemers spaltestrekkfasthet,» Standard Norge, 2023.

- [29] Schwenk, «schwenk.no,» [Internett]. Available: <https://schwenk.no/wp-content/uploads/sites/4/2020/04/Teknisk-datablad-Schwenk-Miljosement-februar-2024.pdf>. [Funnet april 2024].
- [30] Schwenk, «schwenk.no,» [Internett]. Available: <https://schwenk.no/wp-content/uploads/sites/4/2020/04/Teknisk-datablad-Schwenk-Lavvarmesement-februar-2024.pdf>. [Funnet april 2024].
- [31] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «Prøving av fersk betong - Del 2: Synkmål,» Standard Norge, 2019.
- [32] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «Prøving av fersk betong - Del 7: Luftinnhold, Trykkmetoder,» Standard Norge, 2023.
- [33] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «NA:2022, Nasjonalt tillegg - Betong - SPesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar,» Standard Norge, 2022.
- [34] P. I. Helgesen, «Fotavtrykksmetodikk i Enova,» ENOVA, 2020.
- [35] Miljødirektoratet, «miljødirektoratet.no,» 2020. [Internett]. Available: <https://www.miljodirektoratet.no/contentassets/1c4c987b32b04b94859a162aa0823f47/lastebil-og-varebil--teknologi-og-kjorelengdetiltak.xlsx>. [Funnet april 2024].
- [36] Norsk Stål, «epd-norge.no,» 2021. [Internett]. Available: file:///C:/Users/265562/OneDrive%20-%20Universitetet%20i%20Stavanger/Bachelor/EPD/NEPD-2677-1375_Armeringsnett-til-bruki-betong.pdf. [Funnet april 2024].
- [37] Kamstål AS, «epd-norge.no,» 2020. [Internett]. Available: file:///C:/Users/265562/OneDrive%20-%20Universitetet%20i%20Stavanger/Bachelor/EPD/NEPD-2201-1007_Armeringsprodukter-fra-Kamstal-AS.pdf. [Funnet april 2024].
- [38] Heidelberg Materials, «epd-norge.no,» 2022. [Internett]. Available: https://www.epd-norge.no/getfile.php/1330997-1709741718/EPDer/Byggevarer/Sement/NEPD-3947-2908_Norcem-Anleggsement-FA--Brevik---CEM-II-A-V-42-5-N%281%29.pdf. [Funnet april 2024].
- [39] Schwenk Norge AS, «epd-norge.no,» Januar 2023. [Internett]. Available: https://schwenk.no/wp-content/uploads/sites/4/2020/04/EPD-4142-3348_SCHWENK-Lavvarmesement-Cem-III-B-42-5-L-LH-SR-na-.pdf.

- [40] Schwenk Norge AS, «epd-norge.no,» Januar 2023. [Internett]. Available: https://schwenk.no/wp-content/uploads/sites/4/2020/04/EPD-4143-3353_SCHWENK-Miljosement-Cem-II-B-S-52-5-N.pdf.
- [41] Heidelberg Materials, «sement.heidelbergmaterials.no,» [Internett]. Available: <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/evozero>. [Funnet mai 2024].
- [42] «epd-norge.no,» [Internett]. Available: <https://www.epd-norge.no/pcr/pcr-register/>. [Funnet februar 2024].
- [43] Heidelberg Materials, «sement.heidelbergmaterials.no,» [Internett]. Available: https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/AnleggFA_1. [Funnet april 2024].
- [44] Betongsentrum, «betongsentrum.no,» [Internett]. Available: <https://www.betongsentrum.no/produkt/luftmaler-betong/>. [Funnet april 2024].
- [45] Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, «Prøving av herdnet betong - Del 4: Trykkfasthet, Krav til prøvingsmaskiner,» Standard Norge, 2020.
- [46] H. J. A. R. R. C. J. Engelsen, «The Quantity of CO₂ Bound by Concrete Carbonation in Norway,» 2016.

10. Vedlegg:

A. Betongprosjonering

A1. Betongprosjonering Anlegg FA

Mix proporsjon		SKANSKA
Project	Anlegg FA	
Batch no		0
Quality requirements		0

Batch volume:	125 liter
Date:	
Time for water addition:	
Responsible:	
Executed by:	

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Standard FA	0,0	0,000			0,000
Norcem Anlegg FA	356,7	44,590			44,590
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	14,9	1,858	0,0	0,000	1,858
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	167,2	20,902		-1,345	19,557
Absorbed water	9,2	1,150			1,150
Sand 0/8 mm	919,7	114,965	0,5	0,575	115,540
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	919,7	114,965	0,5	0,575	115,540
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	1,9	0,232	84	0,195	0,232
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000

20,707

*Se fotnote på delark "Resept"

** NB! Våte mengder, også for silikaslurry

Fresh concrete					
Time after water addition					
Slump					
Slump flow					
Air					
Density					

Samples (number)					
Casted time:					
Cubes					
150x300 cylindre					
100x200 cylindre					

Vedlegg 1 Anlegg FA Mix Design

Concrete mix design **SKANSKA**

02015-09-21 02

Project	Anlegg FA
Batch nr	0
Quality requirement	0
Executed by	0
Date	04.05.20204

w/b-ratio	0,45
Matrix volume (l/m ³)	320
Volume cement paste (l/m ³)	292
Assumed air content (%)	2,0
Effectiv binder (kg/m ³)	372

Comments:

"Obtained" equ "Desired", Ctrl+N

Reset volume correction; Ctrl-K

Concrete mix		Desired	Obtained	Fresh concrete		Volume corrections		
Materials	kg/m ³	kg	kg	Properties	corr.luft	corr.dens	Corrigert	
Norcem Standard FA	0,0	0,0	39,5	Desired volume (l)	125,0	-4,9	-84,6	397,7
Norcem Anlegg FA	356,7	44,6	24,5	Weight volume (l)	81,1	-3,1	-52,5	246,7
	0,0	0,0	0,0	Measured air content (%)	3,0	0,0	0,0	0,0
Elkem Microsilica	14,9	1,9	2,1	Measured concrete density (l)	1930	-0,3	-4,5	21,1
Normineral flyveaske	0,0	0,0	0,0	Effectiv w/(c+Σkp)	0,253	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0
Free water	167,2	20,9	16,7			-2,1	-35,8	168,4
Absorbed water	9,2	1,1	0,9			-0,1	-1,9	9,1
Sand 0/8 mm	919,7	115,0	51,0			-6,4	-109,2	513,5
Årdal 0/2 mm	0,0	0,0	0,0	Aggressives		0,0	0,0	0,0
Årdal 8/16mm	919,7	115,0	56,7	Chloride content [% of c]	0,07 %	-7,1	-121,4	570,8
Årdal 16/22 mm	0,0	0,0	0,0	Alkalis [kg/m ³]	1,80	0,0	0,0	0,0
Stalite	0,0	0,0	0,0	Part react. rocks [%]	0,0	0,0	0,0	0,0
Test	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0
Test	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0
Mapei Dynamon SX-N	1,86	0,23	0,50			-0,1	-1,1	5,03
	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00
	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00
	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00
	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00
	0,00	0,00	0,00			0,0	0,0	0,00
Prop. Concrete dens. (kg/m ³)	2388					-23,9	-410,9	1928



Comments:

Yellow fields are filled in, green is calculated.

The matrix volume includes aggregate particles less than 0.125 mm.

When moisture in the aggregate is determined on the basis of oven-dried aggregate, absorbed moisture shall be stated with measured value. The associated density should then also be based on dry aggregate. If moisture in the aggregate is given on an SSD basis, absorbed moisture equal to 0. In this case, the densities should also be stated as SSD density.

All sub-materials except water and TSS are indicated in dry weight. When calculating volume, densities and mass ratios, the water content of Admixture is taken into account in the free water volume. This also applies to corrected recipes. If the weighed amount of Admixtur deviates from the proportioned amount, the mass ratio and the amount of free water in the corrected recipe are automatically corrected.

Note that for pozzolanes, fillers and admixtures, the solid content and moisture are stated on a dry basis. Fiber is not included in the matrix volume.

Vedlegg 2 Anlegg FA Recipe

Concrete Mix design

SKANSKA

Project	Anlegg FA
Batch number	
Quality requirements	
Executed by	
Date	04.05.2024

Initialparametre	Value
$m = w/(c+\Sigma kp)$	0,45
Air content	2,0 %

Cement type	Part	Part of clinker	Part FA	Part slagg	[kg/m ³]	Alkalis	Chlorides
Norcem Standard FA	0,0 %	82,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	1,4 %	0,1 %
Norcem Anlegg FA	100,0 %	82,0 %	17,0 %	0,0 %	3020	0,5 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Additions	Type	Andel (av b)	k	[kg/m ³]	Alkalis	Chlorides
Elkem Microsilica	Silika	4,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %
	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Admixtures	% av b	[kg/m ³]	Dry stof	[kg/m ³] TS	Alkalis	Chlorides
Mapei Dynamon SX-N	0,5 %	1050	16,0 %	1424	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m ³]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matrix	Value
Desired matrix volume [l/m ³]	320
Obtained matrix volum [l/m ³]	320
Clinker part in binder	78,7 %
Total FA- content of binder	16,3 %
Total slag content of binder	0,0 %
Volume cement paste [l/m ³]	292,3
Effectiv water content [l/m ³]	167,2
w/p	0,38
Effectiv binder [kg/m ³]	372
Totalt binder [kg/m ³]	372

Beregn

Comments:

Yellow blanket is filled in, green is calculated.

The red background in the cell for obtained matrix volume indicates that the computation macro has not been run, and there is no response between it and the obtained matrix volume. This will also give the blanket the recipe form.

Vedlegg 3 Anlegg FA Matrix

A2. Betongproporsjonering Schwenk

Mix proporsjon						SKANSKA
Project	Schwenk					
Batch no						0
Quality requirements						0
Batch volume:	100 liter					
Date:						
Time for water addition:						
Responsible:						
Executed by:						
Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg	
Norcem Standard FA	0,0	0,000			0,000	
Schwenk Lavvarmesement	170,8	17,080			17,080	
Schwenk Miljøsement	170,8	17,080			17,080	
Elkem Microsilica	14,2	1,423	0,0	0,000	1,423	
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000	
	0,0	0,000			0,000	
Free water	170,8	17,080		-1,069	16,011	16,930
Absorbed water	9,2	0,920			0,920	
Sand 0/8 mm	919,7	91,972	0,5	0,460	92,432	
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Årdal 8/16mm	919,7	91,972	0,5	0,460	92,432	
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000	
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000	
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000	
Mapei Dynamon SX-N	1,8	0,178	84	0,149	0,178	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000	0	0,000	0,000	
	0,0	0,000			0,000	
	0,0	0,000			0,000	
*Se fotnote på delark "Resept" ** NB! Våte mengder, også for silikaslurry						
Fresh concrete						
Time after water addition						
Slump						
Slump flow						
Air						
Density						
Samples (number)						
Casted time:						
Cubes						
150x300 cylindre						
100x200 cylindre						

Vedlegg 4 Schwenk Mix Design

Concrete mix design **SKANSKA**

02015-09-21 02

Project	Schwenk
Batch nr	0
Quality requirement	0
Executed by	0
Date	04.05.2024

w/b-ratio	0,48
Matrix volume (l/m ³)	320
Volume cement paste (l/m ³)	292
Assumed air content (%)	2,0
Effectiv binder (kg/m ³)	356

Comments:

Concrete mix		Desired		Obtained		Fresh concrete		Volume corrections		
Materials	kg/m ³	kg	kg	kg	kg	Properties	corr.luft	corr.dens	Corrigert	
Norcem Standard FA	0,0	0,0	39,5			Desired volume (l)	-4,9	-83,2	397,6	
Schwenk Lavvarmeselement	170,8	17,1	24,5			Weight volume (l)	-3,0	-51,6	246,6	
Schwenk Miljøsement	170,8	17,1	0,0			Measured air content (%)	3,0	0,0	0,0	
Elkem Microsilica	14,2	1,4	2,1			Measured concrete density (kg/m ³)	1930	-0,3	-4,4	21,1
Normineral flyveaske	0,0	0,0	0,0			Effectiv w/(c+Σkp)	0,253	0,0	0,0	0,0
Free water	170,8	17,1	16,7					0,0	0,0	0,0
Absorbed water	9,2	0,9	0,9					-2,1	-35,2	168,4
Sand 0/8 mm	919,7	92,0	51,0					-0,1	-1,9	9,1
Årdal 0/2 mm	0,0	0,0	0,0			Aggressives		-6,3	-107,5	513,3
Årdal 8/16mm	919,7	92,0	56,7			Chloride content [% of c]	0,04 %	0,0	0,0	0,0
Årdal 16/22 mm	0,0	0,0	0,0			Alkalis [kg/m ³]	1,21	-7,0	-119,5	570,7
Stalite	0,0	0,0	0,0			Part react. rocks [%]	0,0	0,0	0,0	0,0
Test	0,0	0,0	0,0					0,0	0,0	0,0
Test	0,0	0,0	0,0					0,0	0,0	0,0
Test	0,0	0,0	0,0					0,0	0,0	0,0
Test	0,0	0,0	0,0					0,0	0,0	0,0
Test	0,0	0,0	0,0					0,0	0,0	0,0
Mapel Dynamon SX-N	1,78	0,18	0,50					-0,1	-1,1	5,03
	0,00	0,00	0,00					0,0	0,0	0,00
	0,00	0,00	0,00					0,0	0,0	0,00
	0,00	0,00	0,00					0,0	0,0	0,00
	0,00	0,00	0,00					0,0	0,0	0,00
	0,00	0,00	0,00					0,0	0,0	0,00
Prop. Concrete dens. (kg/m ³)	2376							-23,8	-404,3	1928



Comments:

Yellow fields are filled in, green is calculated.

The matrix volume includes aggregate particles less than 0.125 mm.

When moisture in the aggregate is determined on the basis of oven-dried aggregate, absorbed moisture shall be stated with measured value. The associated density should then also be based on dry aggregate. If moisture in the aggregate is given on an SSD basis, absorbed moisture equal to 0. In this case, the densities should also be stated as SSD density.

All sub-materials except water and TSS are indicated in dry weight. When calculating volume, densities and mass ratios, the water content of Admixture is taken into account in the free water volume. This also applies to corrected recipes. If the weighed amount of Admixtur deviates from the proportioned amount, the mass ratio and the amount of free water in the corrected recipe are automatically corrected.

Note that for pozzolanes, fillers and admixtures, the solid content and moisture are stated on a dry basis. Fiber is not included in the matrix volume.

Vedlegg 5 Schwenk Recipe

Concrete Mix design

SKANSKA

Project	Schwenk
Batch number	
Quality requirements	
Executed by	
Date	04.05.2024

Initialparametre	Value
$m = w/(c+\sum kp)$	0,48
Air content	2,0 %

Cement type	Part	Part of clinker	Part FA	Part slagg	[kg/m ³]	Alkalis	Chlorides
Norcem Standard FA	0,0 %	82,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	1,4 %	0,1 %
Schwenk Lavvarmesement	50,0 %	30,0 %	0,0 %	70,0 %	2950	0,7 %	0,1 %
Schwenk Miljøsement	50,0 %	72,0 %	0,0 %	28,0 %	3000	0,0 %	0,0 %

Additions	Type	Andel (av b)	k	[kg/m ³]	Alkalis	Chlorides
Elkem Microsilica	Silika	4,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %
	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %

Admixtures	% av b	[kg/m ³]	Dry stof	[kg/m ³] TS	Alkalis	Chlorides
Mapei Dynamon SX-N	0,5 %	1050	16,0 %	1424	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %

Fiber	Vol %	[kg/m ³]
	0,0 %	7800
	0,0 %	1050

Matrix	Value
Desired matrix volume [l/m ³]	320
Obtained matrix volum [l/m ³]	320
Clinker part in binder	49,0 %
Total FA- content of binder	0,0 %
Total slag content of binder	47,0 %
Volume cement paste [l/m ³]	292,3
Effectiv water content [l/m ³]	170,8
w/p	0,40
Effectiv binder [kg/m ³]	356
Totalt binder [kg/m ³]	356

Beregn

Comments:
 Yellow blanket is filled in, green is calculated.
 The red background in the cell for obtained matrix volume indicates that the computation macro has not been run, and there is no response between it and the obtained matrix volume. This will also give the blanket the recipe form.

Vedlegg 6 Schwenk Matrix

A3. Betongproposjonering VPI50

Mix proporsjon SKANSKA

Project	VPI50
Batch no	0
Quality requirements	0

Batch volume:	125 liter
Date:	
Time for water addition:	
Responsible:	
Executed by:	

Materials	Mix kg/m ³	Batch kg	Moisture* %	Corr. kg	Weight** kg
Norcem Standard FA	0,0	0,000			0,000
vpi50	370,9	46,358			46,358
	0,0	0,000			0,000
Elkem Microsilica	15,5	1,932	0,0	0,000	1,932
Normineral flyveaske	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000
Free water	162,3	20,282		-1,352	18,929
Absorbed water	9,2	1,150			1,150
Sand 0/8 mm	919,7	114,965	0,5	0,575	115,540
Årdal 0/2 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	919,7	114,965	0,5	0,575	115,540
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,5	0,000	0,000
Stalite	0,0	0,000	2,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Test	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	1,9	0,241	84	0,203	0,241
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
	0,0	0,000			0,000
	0,0	0,000			0,000

20,079

*Se fotnote på delark "Resept"

** NB! Våte mengder, også for silikaslurry

Fresh concrete					
Time after water addition					
Slump					
Slump flow					
Air					
Density					

Samples (number)					
Casted time:					
Cubes					
150x300 cylindre					
100x200 cylindre					

Vedlegg 7 VPI50 Mix Design

Concrete mix design **SKANSKA**

02015-09-21 02

Project	VPI50
Batch nr	0
Quality requirement	0
Executed by	0
Date	04.05.2024

w/b-ratio	0,42
Matrix volume (l/m ³)	320
Volume cement paste (l/m ³)	292
Assumed air content (%)	2,0
Effectiv binder (kg/m ³)	386

Comments:

"Obtained" equ "Desired", Ctrl+N

Reset volume correction; Ctrl-K

Concrete mix		Desired	Obtained	Fresh concrete		Volume corrections		
Materials	kg/m ³	kg	kg	Properties	corr.luft	corr.dens	Corrigert	
Norcem Standard FA	0,0	0,0	39,5	Desired volume (l)	-4,9	-84,6	397,7	
vpi50	370,9	46,4	24,5	Weight volume (l)	-3,1	-52,5	246,7	
	0,0	0,0	0,0	Measured air content (%)	0,0	0,0	0,0	
Elkem Microsilica	15,5	1,9	2,1	Measured concrete density (kg/m ³)	-0,3	-4,5	21,1	
Normineral flyveaske	0,0	0,0	0,0	Effectiv w/(c+Σkp)	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
Free water	162,3	20,3	16,7		-2,1	-35,8	168,4	
Absorbed water	9,2	1,1	0,9		-0,1	-1,9	9,1	
Sand 0/8 mm	919,7	115,0	51,0		-6,4	-109,2	513,5	
Årdal 0/2 mm	0,0	0,0	0,0	Aggressives	0,0	0,0	0,0	
Årdal 8/16mm	919,7	115,0	56,7	Chloride content [% of c]	0,0	0,0	0,0	
Årdal 16/22 mm	0,0	0,0	0,0	Alkalis [kg/m ³]	-7,1	-121,4	570,9	
Stalite	0,0	0,0	0,0	Part react. rocks [%]	0,0	0,0	0,0	
Test	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
Test	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	
Mapel Dynamon SX-N	1,93	0,24	0,50		-0,1	-1,1	5,03	
	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0	0,00	
	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0	0,00	
	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0	0,00	
	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0	0,00	
	0,00	0,00	0,00		0,0	0,0	0,00	
Prop. Concrete dens. (kg/m ³)	2398				-23,9	-411,0	1928	



Comments:

Yellow fields are filled in, green is calculated.

The matrix volume includes aggregate particles less than 0.125 mm.

When moisture in the aggregate is determined on the basis of oven-dried aggregate, absorbed moisture shall be stated with measured value. The associated density should then also be based on dry aggregate. If moisture in the aggregate is given on an SSD basis, absorbed moisture equal to 0. In this case, the densities should also be stated as SSD density.

All sub-materials except water and TSS are indicated in dry weight. When calculating volume, densities and mass ratios, the water content of Admixtur is taken into account in the free water volume. This also applies to corrected recipes. If the weighed amount of Admixtur deviates from the proportioned amount, the mass ratio and the amount of free water in the corrected recipe are automatically corrected.

Note that for pozzolanes, fillers and admixtures, the solid content and moisture are stated on a dry basis. Fiber is not included in the matrix volume.

Vedlegg 8 VPI50 Recipe

Concrete Mix design

SKANSKA

Project	VPI50
Batch number	
Quality requirements	
Executed by	
Date	04.05.2024

Initialparametre	Value						
m = w/(c+Σkp)	0,42						
Air content	2,0 %						
Cement type	Part	Part of clinker	Part FA	Part slagg	[kg/m ³]	Alkalis	Chlorides
Norcem Standard FA	0,0 %	82,0 %	18,0 %	0,0 %	3000	1,4 %	0,1 %
vpi50	100,0 %	50,0 %	0,0 %	50,0 %	3020	0,5 %	0,1 %
	0,0 %	100,0 %	0,0 %	0,0 %	1000	0,0 %	0,0 %
Additions	Type	Andel (av b)	k	[kg/m ³]	Alkalis	Chlorides	
Elkem Microsilica	Silika	4,0 %	1,0	2200	0,1 %	0,1 %	
Normineral flyveaske	FA	0,0 %	0,7	2200	1,0 %	0,3 %	
	Slagg	0,0 %	0,6	1000	1,0 %	0,3 %	
Admixtures	% av b	[kg/m ³]	Dry stof	[kg/m ³] TS	Alkalis	Chlorides	
Mapei Dynamon SX-N	0,5 %	1050	16,0 %	1424	0,0 %	0,0 %	
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %	
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %	
	0,0 %	1000	100,0 %	1000	0,0 %	0,0 %	
Fiber	Vol %	[kg/m ³]					
	0,0 %	7800					
	0,0 %	1050					
Matrix	Value						
Desired matrix volume [l/m ³]	320						
Obtained matrix volum [l/m ³]	320						
Clinker part in binder	48,0 %						
Total FA- content of binder	0,0 %						
Total slag content of binder	48,0 %						
Volume cement paste [l/m ³]	292,3						
Effectiv water content [l/m ³]	162,3						
w/p	0,35						
Effectiv binder [kg/m ³]	386						
Totalt binder [kg/m ³]	386						

Beregn

Comments:

Yellow blanket is filled in, green is calculated.

The red background in the cell for obtained matrix volume indicates that the computation macro has not been run, and there is no response between it and the obtained matrix volume. This will also give the blanket the recipe form.

Vedlegg 9 VPI50 Matrix

B. Herdet Resultater

B1.Kompresjonstest 7 dager



Simple standard protocol

18.04.2024

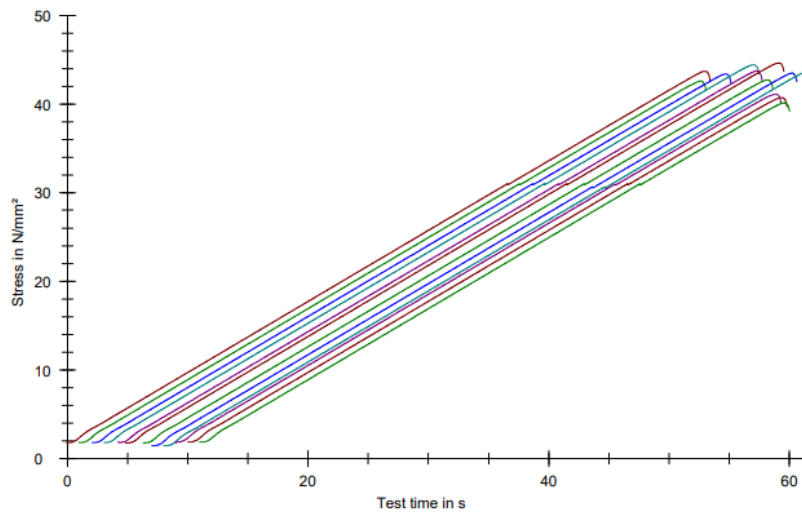
Parameter table:

Test protocol	: Compression test for cubes	Type strain extensometer:	
Tester	: Ibrahim-Stig -V2024	Machine data	: Controller TT0322
Customer	:		: PistonStroke
Test standard	: NS-EN 12390-3:2019		: LoadCell 3 MN
Strength grade:			
Creation date	: Mars 2024		
Age	: 7 T		
Other	:		

Results:

Nr	Date	ID	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
1	11.03.2024	AnleggFA 2-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	436,85	43,68
2	11.03.2024	AnleggFA 2-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	425,83	42,58
3	11.03.2024	AnleggFA 2-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	433,81	43,38
4	11.03.2024	AnleggFA 2-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	444,16	44,42
5	11.03.2024	AnleggFA 2-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	437,27	43,73
6	19.03.2024	Schwenk1-8dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	446,13	44,61
7	19.03.2024	Schwenk1-8dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	427,23	42,72
8	19.03.2024	Schwenk1-8dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	434,66	43,47
9	19.03.2024	Schwenk1-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	436,09	43,61
10	25.03.2024	VPI1-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	410,77	41,08
11	25.03.2024	VPI1-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	407,00	40,70
12	25.03.2024	VPI1-7dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	401,24	40,12

Series graphics:



Statistics:

Series n = 12	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
\bar{x}	100,0	100,0	10000,0	100,0	428,42	42,84
s	0,0	0,0	0,0	0,0	14,63	1,46
v	0,00	0,00	0,00	0,00	3,42	3,42

Vedlegg 10 – resultater kompresjonstest 7 dager

B2. Kompresjonstest 28 dager

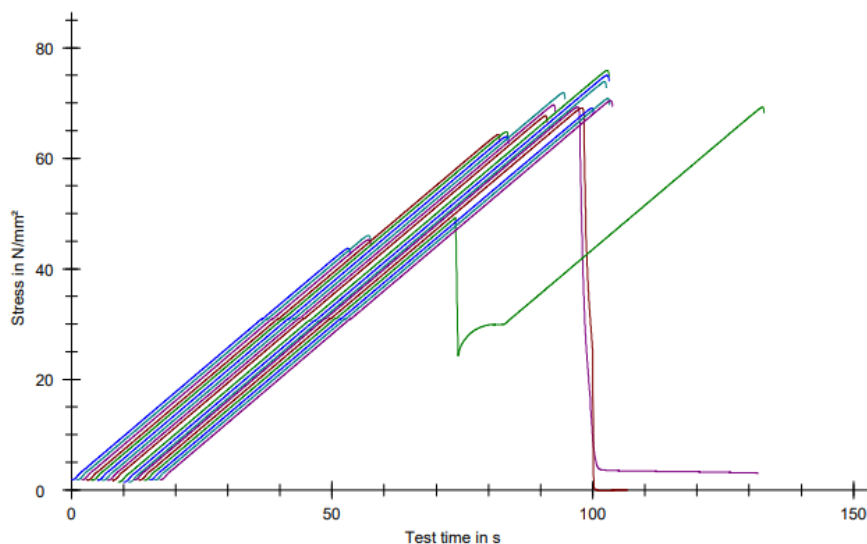
Parameter table:

Test protocol	: Compression test for cubes	Type strain extensometer:	
Tester	: Ibrahim-Stig -V2024	Machine data	: Controller TT0322
Customer	:		PistonStroke
Test standard	: NS-EN 12390-3:2019		LoadCell 3 MN
Strength grade:			
Creation date	: Mars 2024		
Age	: 7 T		
Other	:		

Results:

Nr	Date	ID	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
13	25.03.2024	Anlegg1 FA-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	436,84	43,68
14	25.03.2024	Anlegg1 FA-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	460,59	46,06
15	25.03.2024	Anlegg1 FA-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	452,55	45,26
16	02.04.2024	Anlegg2 FA-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	642,87	64,29
17	02.04.2024	Anlegg2 FA-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	647,76	64,78
18	02.04.2024	Anlegg2 FA-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	639,42	63,94
19	08.04.2024	Schwenk1-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	718,96	71,90
20	08.04.2024	Schwenk1-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	696,65	69,66
21	08.04.2024	Schwenk1-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	677,18	67,72
22	12.04.2024	Schwenk2-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	759,07	75,91
23	12.04.2024	Schwenk2-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	750,08	75,01
24	12.04.2024	Schwenk2-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	738,56	73,86
25	15.04.2024	VPI50 1-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	692,58	69,26
26	15.04.2024	VPI50 1-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	691,12	69,11
27	15.04.2024	VPI50 1-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	692,63	69,26
28	18.04.2024	VPI50 2-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	690,42	69,04
29	18.04.2024	VPI50 2-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	708,11	70,81
30	18.04.2024	VPI50 2-28dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	704,54	70,45

Series graphics:



Statistics:

Series n = 18	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
\bar{x}	100,0	100,0	10000,0	100,0	655,55	65,56
s	0,0	0,0	0,0	0,0	100,19	10,02
v	0,00	0,00	0,00	0,00	15,28	15,28

Vedlegg 12 - resultater kompresjonstest 28 dager 2/2

B3. Kompresjonstest 56 dager

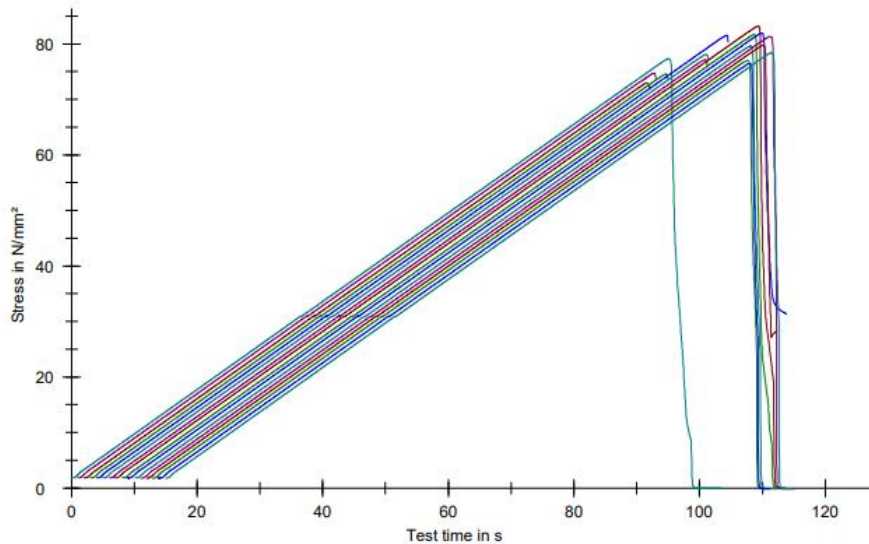
Parameter table:

Test protocol	: Compression test for cubes	Type strain extensometer:	
Tester	: Ibrahim-Stig -V2024	Machine data	: Controller TT0322
Customer	:		: PistonStroke
Test standard	: NS-EN 12390-3:2019		: LoadCell 3 MN
Strength grade:			
Creation date	: Mars 2024		
Age	: 7 T		
Other	:		

Results:

Nr	Date	ID	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
34	24.04.2024	Schwenk1-40dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	773,35	77,34
35	29.04.2024	Anlegg2 FA-56dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	747,00	74,70
36	29.04.2024	Anlegg2 FA-56dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	729,84	72,98
37	29.04.2024	Anlegg2 FA-56dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	745,92	74,59
38	06.05.2024	Schwenk1-56dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	815,66	81,57
39	06.05.2024	Schwenk1-56dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	781,14	78,11
40	06.05.2024	Schwenk1-56dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	771,55	77,15
41	08.05.2024	Schwenk2-54dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	832,11	83,21
42	08.05.2024	Schwenk2-54dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	816,96	81,70
43	08.05.2024	Schwenk2-54dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	819,38	81,94
44	08.05.2024	VPI50_1-51dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	796,08	79,61
45	08.05.2024	VPI50_1-51dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	813,55	81,36
46	08.05.2024	VPI50_1-51dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	797,69	79,77
47	08.05.2024	VPI50_2-48dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	770,34	77,03
48	08.05.2024	VPI50_2-48dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	764,45	76,45
49	08.05.2024	VPI50_2-48dager	100,0	100,0	10000,0	100,0	783,69	78,37

Series graphics:



Statistics:

Series n = 16	a mm	b mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
\bar{x}	100,0	100,0	10000,0	100,0	784,92	78,49
s	0,0	0,0	0,0	0,0	29,94	2,99
v	0,00	0,00	0,00	0,00	3,81	3,81

Vedlegg 14 – resultater kompresjonstest 48 dager – 56 dager 2/2

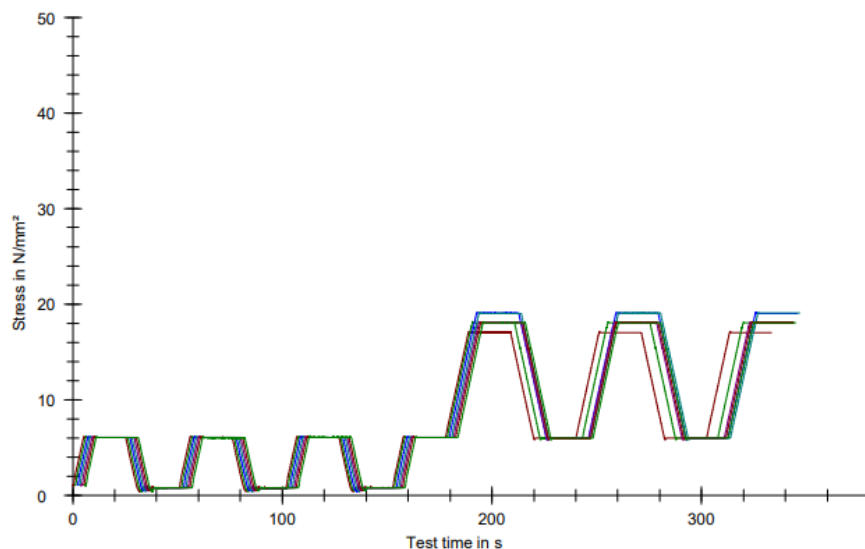
B4. E – modul

Parameter table:

Test protocol :	Type strain extensometer:
Tester :	Machine data :
Customer :	Controller TT0322
Test standard : EN12390-13 method A	PistonStroke
Strength grade :	LoadCell 3 MN
Creation date :	Extensometer
Age : 0 T	Extensometer2
Other :	

Results:	Nr	$\epsilon_{b2,E1}$ mm	$\epsilon_{b2,E2}$ mm	$\epsilon_{b3,E1}$ mm	$\epsilon_{b3,E2}$ mm	$\Delta\epsilon_{b23,E}$ %	$\Delta\epsilon_{b23,E}$ %	$\Delta\epsilon_{b3,E1}$ %	$\sigma_{m,a,1}$ N/mm	$\sigma_{m,b,0}$ N/mm	$\epsilon_{a,1}$ mm	$\epsilon_{b,0}$ mm	$E_{c,0}$ N/mm	$\sigma_{m,a,3}$ N/mm	$\sigma_{m,b,2}$ N/mm	$\epsilon_{a,3}$ mm	$\epsilon_{b,2}$ mm	$E_{c,s}$ N/mm
max.						10,00	10,00	20,00										
min						-10,00	-10,00	-20,00										
1	E-mod	0,039	0,027	0,039	0,026	0,18	0,97	10,28	17,03	6,04	0,092	0,025	32678	17,01	5,96	0,093	0,032	36469
2	E-mod	0,046	0,030	0,046	0,030	0,01	0,08	10,66	18,04	6,03	0,116	0,030	27829	18,03	5,94	0,118	0,046	33724
3	E-mod	0,047	0,030	0,048	0,029	0,41	0,48	12,37	19,04	6,02	0,099	0,028	37065	19,02	5,96	0,099	0,034	40126
4	E-mod	0,045	0,033	0,045	0,033	0,20	0,33	7,90	19,03	6,02	0,112	0,032	32568	19,05	5,94	0,113	0,043	37339
5	E-mod	0,046	0,022	0,047	0,021	0,43	0,68	18,68	18,07	6,05	0,093	0,021	33185	18,03	5,97	0,094	0,032	39237
6	E-mod	0,025	0,031	0,025	0,029	0,57	1,48	3,41	18,02	6,04	0,112	0,028	28390	18,06	5,95	0,114	0,045	35197
7	E-mod	0,035	0,043	0,035	0,047	0,28	2,22	7,07	18,06	6,04	0,146	0,057	26978	18,02	5,95	0,169	0,099	34199

Series graphics:



Statistics:

Series n = 7	σ_m N/mm ²	$E_{c,0}$ N/mm ²	$E_{c,s}$ N/mm ²
\bar{x}	18,29	31242,40	36613,44
s	0,69	3639,33	2447,80
v	3,78	11,65	6,69

B5. Spaltestrekk

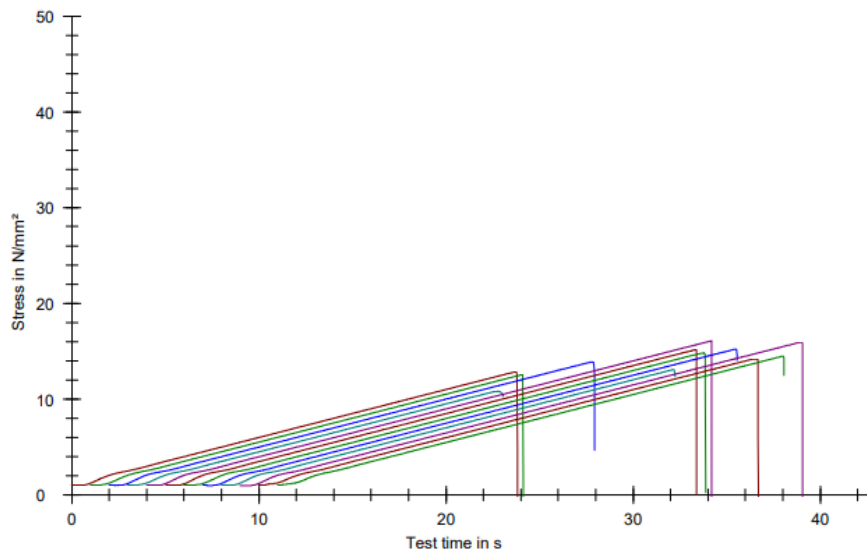
Parameter table:

Test protocol	: Split test	Type strain extensometer:	
Tester	: BYG605	Machine data	: Controller TT0322
Customer	:		PistonStroke
Test standard	: NS-EN 12390		LoadCell 3 MN
Strength grade:			
Creation date	: April 2023		
Age	: 28 T		
Other	:		

Results:

Nr	Date	ID	d mm	A mm ²	h mm	F _m kN
1	25.03.2024	Anlegg FA1-28d syl	150,0	17671,5	300,0	226,86
2	25.03.2024	Anlegg FA1-28d syl	150,0	17671,5	300,0	221,16
3	03.04.2024	Anlegg FA2-28d syl	150,0	17671,5	300,0	245,18
4	03.04.2024	Anlegg FA2-28d syl	150,0	17671,5	300,0	190,71
5	08.04.2024	Schwenk1-28d syl	150,0	17671,5	300,0	283,84
6	08.04.2024	Schwenk1-28d syl	150,0	17671,5	300,0	267,65
7	12.04.2024	Schwenk2-28d syl	150,0	17671,5	300,0	261,41
8	12.04.2024	Schwenk2-28d syl	150,0	17671,5	300,0	268,82
9	15.04.2024	VPI50_1-28d syl	150,0	17671,5	300,0	230,85
10	15.04.2024	VPI50_1-28d syl	150,0	17671,5	300,0	281,51
11	18.04.2024	VPI50_2-28d syl	150,0	17671,5	300,0	250,45
12	18.04.2024	VPI50_2-28d syl	150,0	17671,5	300,0	255,53

Series graphics:



Statistics:

Series n = 12	d mm	A mm ²	h mm	F _m kN	σ _m N/mm ²
\bar{x}	150,0	17671,5	300,0	248,67	14,07
s	0,0	0,0	0,0	27,33	1,55
v	0,00	0,00	0,00	10,99	10,99