

Erasmus+-prosjekt 2022-1-NO01-KA220-HED-000087893

Dette Erasmus+-prosjektet er finansiert med støtte fra Europakommisjonen. Denne publikasjonen gjenspeiler kun forfatterens synspunkter, og Europakommisjonen og de nasjonale kontorene for Erasmus+ kan ikke holdes ansvarlig for bruken av informasjonen i publikasjonen.

Casestudierapport om BIM-

LCA-byggeprosjekt

Geopolymerbetong: En fremtidsrettet betong

BACHELOROPPGAVE

Geopolymerbetong: En fremtidsrettet betong B23B02

15.05.2023

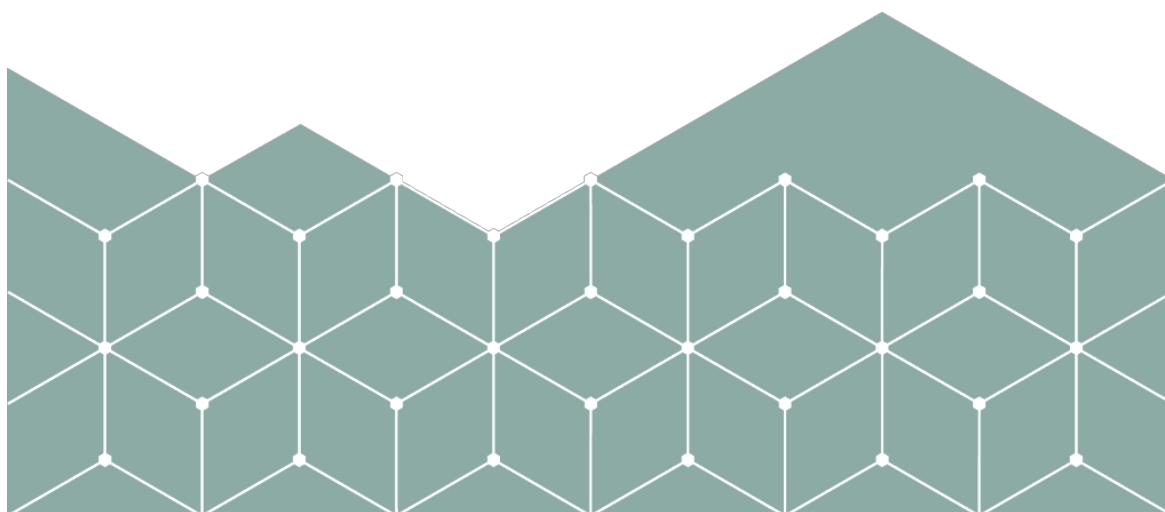
Institutt for ingeniørvitenskap - Sivilingeniørfag

Christian Janshaug

Sindre Andreas Johansen Melgaard

Frederik Toverød

Simon Hauk Vold





Avhandlingsrapport

Avhandlingskategori: <i>teknisk</i>
Antall studiepoeng: *0
Fagområde: <i>Civilt Engineering - strukturell og sivilingeniør</i>

Fritt tilgjengelig



Tilgjengelig etter avtale med samarbeidende
planleggingsfirma



Rapporttittel: <i>Etteopol yzrier E'oncreie. A fyW re-orientert betong</i>	Dato: <i>1.1.2023</i> Antall slurl-sider: <i>13</i> Antall sider: / GJ Antall vedlegg: <i>2J</i> Totalt antall sider i denne avhandlingen er: <i>14</i>
Forfattere: <i>Christian Janshaug</i> <i>Simon Hand I'old, G</i> <i>Fraferik Toi'erad</i> <i>Sindre Andrea Johansen ñelgaard</i>	Supervisors: <i>1) Susana Garcia...</i> <i>2) Hairik Caer</i> <i>3) Mariw Birkeland</i>
Avdeling / Studieprogram: <i>Avdeling for ingeniørfag / sivilingeniør</i>	Avhandlingsnummer: <i>fi2JfiG2</i>

Utført i samarbeid med: <i>joine Eieiidom og Selvaag Boliy F.iasmis</i> +	Kontaktperson hos samarbeidspartneren: <i>Espeii C'hrisii'n Aiidreseii</i>
---	---

Denne avhandlingen undersøker holdbarheten og egenskapene til egenutviklet geopolymerbetong, og sammenligner dens CO₂-utslipp med tradisjonell betong. Studien fremhever geopolymerbetong som et bærekraftig alternativ, og fremhever dens lavere utslipp og utmerkede egenskaper. Forskingen benytter BIM-modellering og UA-analyse for å vurdere betongens miljøpåvirkning og egnethet for prefabrikerte brukområder. Samlet sett bidrar studien til økt kunnskap om kopolymerbetong og fremmer bevissthet om utslipp i byggebransjen.

3 nøkkelord

Geopolymerbetong
LCA

Forord

I dette forordet ønsker vi å sammenfatte den omfattende reisen vi har vært gjennom på det treårige sivilingeniørstudiet, som strekker seg fra 2020 til 2023. Vi har tilegnet oss omfattende kunnskap om byggregrelaterte fagområder, problemløsning og prosjektarbeid i løpet av disse tre årene, som har vært fylt med spenning, utfordringer og spennende opp- og nedturer. Alt i alt har denne reisen i stor grad formet og forberedt oss som fremtidige sivilingeniører, og gitt oss uvurderlige erfaringer.

Deltakelsen i BIM-LCA-pilotprosjektet gjennom Erasmus+-workshopen i Cartagena UPCT har vært en lærerik opplevelse som har fungert som en kick-off for denne bacheloroppgaven, gitt verdifull innsikt og lagt grunnlaget for videre utforskning.

Innledningsvis vil vi rette en stor takk til Susana Garcia Sanfelix for hennes uvurderlige hjelp med studier av betong og kjemiske aspekter, og for hennes veiledning gjennom hele bacheloroppgaven. Hennes ekspertise og støtte har i stor grad bidratt til vår vekst og forståelse på disse områdene.

Vi vil også rette en stor takk til Marius Birkeland og Henrik Røer for deres viktige bidrag til BIM-komponenten og bygg- og anleggstemaet som er utforsket i denne avhandlingen.

I tillegg vil vi rette en stor takk til Espen Andresen i Jotne Eiendom og Selvaag Bolig for å ha gitt oss et referansebygg og verdifull innsikt i FMV-Vest-prosjektet.

Til slutt vil vi takke Bernt Kristiansen for verdifulle tips, Mahdi Kioumarsi for konstruktive tilbakemeldinger, Lars Gunnar Furelid Tellnes for LCA-relaterte spørsmål, Rudi Yi Xu for karbonatiseringstesting, Rino Nilsen for 3D-printutstyr, Arne Johan Østenby for elektrisk oppsett av klorid-testen, Jane Mælen for verdifull informasjon om prefabrikkerte elementer og Parham Shoaie for støtte i laboratorierelaterte prosedyrer og utmerkede tilbakemeldinger.

Sammendrag

Denne avhandlingen, med tittelen "Geopolymerbetong: A future-oriented concrete", har som mål å undersøke holdbarheten og egenskapene til en egenutviklet geopolymerbetong. Studien omfatter også en sammenligning av CO₂-utslippene i produksjonsfasen av geopolymerbetong og tradisjonell betong, med sikte på å øke bevisstheten om utslipp i bygg- og anleggsbransjen gjennom bruk av BIM- og LCA-metoder.

Avhandlingen fokuserer primært på geopolymer som en lovende løsning for en grønn omstilling i bygg- og anleggsbransjen. Nøkkelkomponentene i studien inkluderer BIM-modellering og LCA-analyse. LCA-analysen viser en positiv CO₂-balanse, noe som indikerer lavere utslipp for geopolymerbetong sammenlignet med tradisjonell betong, selv om den også belyser et negativt aspekt når det gjelder energiforbruk.

Omfattende laboratorietester utført av gruppen viser at geopolymerbetong har utmerkede egenskaper, noe som forbedrer både holdbarhet og levetid. Som et resultat av dette konkluderes det med at geopolymerbetong er egnet for prefabrikerte bruksområder. Studien understreker behovet for videre utforskning av potensielle forbedringer når det gjelder å standardisere bruken av utradisjonell betong.

Samlet sett bidrar denne avhandlingen til kunnskap om og forståelse av geopolymerbetong som et bærekraftig alternativ, samtidig som den fremhever viktigheten av bevissthet om utslipp og fremme av miljøvennlig praksis i bygg- og anleggsbransjen.

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	iv
Innhold	v
Liste over figurer	ix
Liste over tabeller	xi
Symboler.....	xii
1 Innledning	1
1.1 Problemstilling	2
1.2 Begrensninger	3
1.3 Forskningsmetode	4
2 Teori	5
2.1 Tradisjonell betong	5
2.1.1 Cement.....	6
2.1.2 Hydreringsprosessen	7
2.1.3 Tilsetningsstoffer	9
2.1.4 Tilsetningsstoffer	15
2.1.5 Masseforhold	16
2.1.6 Tilslagsmaterialer.....	16
2.2 Geopolymerbetong.....	17
2.2.1 Masseforhold mellom GPC, L/GB	17
2.2.2 Geopolymer som bindemiddel.....	17
2.2.3 Alkaliske aktivatorer.....	22
2.2.4 Herdebetingelser	23
2.2.5 GPCs selvhelbredende egenskaper	23
2.2.6 GPC i bruk i dag	24

2.3 Teori knyttet til metodologi	27
2.3.1 Utvikling av oppskrift.....	27
2.3.2 Samlet størrelse	27
2.3.3 Blanding og herding av betong.....	28
2.4 Teori knyttet til testprosedyren	28
2.4.1 Vanninnhold i tilslaget.....	28
2.4.2 Partikkelstørrelsesfordeling i tilslaget	28
2.4.3 Spesifikk varmekapasitet	28
2.4.4 Isotermisk ledningskalorimetri	29
2.4.5 Innledende og endelig herdetid - VICAT	29
2.4.6 Bearbeidbarhet	30
2.4.7 Innhold av luft	32
2.4.8 Tetthet	32
2.4.9 Trykkfasthet	32
2.4.10 Kloridinntrengning.....	33
2.4.11 Kullsyre	35
2.5 Holdbarhet og forsterkning	36
2.5.1 Betongdekke	37
2.5.2 Minimum forsterkning.....	39
2.6 BIM, bygningsinformasjonsmodellering.....	40
2.6.1 Brukere av BIM.....	40
2.6.2 BIM-standard	40
2.6.3 Revit	40
2.6.4 Fordeler.....	41
2.7 LCA.....	42
2.7.1 Brukere av LCA.....	42

2.7.2 LCA Standard	43
2.7.3 SimaPro	43
2.7.4 Fordeler.....	44
2.7.5 GWP - potensial for global oppvarming.....	44
3 Rammeverk.....	46
4 Metode.....	48
4.1 Utvikling av oppskrift.....	52
4.1.2 Samlet størrelse.....	53
4.1.3 Blanding og herding av betong.....	53
4.2 Testprosedyrer.....	54
4.2.1 Vanninnhold i tilslaget.....	54
4.2.2 Partikkelstørrelsesfordeling av tilslag	55
4.2.3 TAM kalorimetrisk test	57
4.2.4 Innledende og endelig herdetid for sementpasta, VICAT	60
4.2.5 Slump-test	61
4.2.6 Test av flyteevne.....	63
4.2.7 Innhold av luft	64
4.2.8 Tetthet.....	65
4.2.9 Test av trykkfasthet.....	65
4.2.10 Hurtig test av kloridpermeabilitet.....	67
4.2.11 Karbonatiseringsdybden	70
5 Resultater	73
5.1 Geopolymer.....	73
5.2 Potensiell bruk av geopolymerbetong, BIM-gjennomgang	80
5.3 LCA-studie.....	84
5.4 Feilkilder og diskusjon.....	91

6 Konklusjon.....	92
7. Forslag til videre arbeid.....	93
8 Referanse	95
9 Vedlegg.....	106

Liste over figurer

Figur 1: Globale CO2-utslipp fordelt på sektorer (Ali, 2020, s. 12)	1
Figur 2: SEM av CH og C-S-H, Mix 8 (Armentrout & Belkowitz, 2009).....	8
Figur 3: Trykkfasthet for SF-holdig mørtel (Muwashee & Al-Jameel, 2021)10	Figur 4:
OPC-forhold, trykkfasthet med % FA (Abushad & Sabri, 2017)	12
Figur 5: Bilde a) viser SEM-bilde av slagpartikler, mens b) viser SEM-bilde av flyveaskepartikler (Verma & Dev, 2021).....	21
Figur 6: 1 av de 33 ferdigstøpte GPC-panelene (WAGNERS, u.å.).....	24
Figur 7: Plan for belegning/ rullebane, BWW lufthavn (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015)	25
Figur 8: Tverrsnitt for høyfast betongdekke (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015).....	25
Figur 9: Geopolymer twin batch-anlegg (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015).....	26
Figur 10: Hydreringsprosessen (Wadsö, 2005).....	29
Figur 11: Arbeidsevne (Maage, 2015, s. 181).....	30
Figur 12: Kompresjonstestmaskin (EPOXY TILE FLOORING, 2021).....	33
Figur 13: Tverrsnitt av en armert søyle (Anre, 2020)	37
Figur 14: Produktets livssyklusfaser (Livsløpsvurdering, 2020)	42
Figur 15: Prinsipp for oppbygging av LCA (BNP Media, 2021).....	44
Figur 16: Flytskjema over utviklingen av GPC	51
Figur 17: Betongtvangsblender av typen ZK 50 HE (Pemat)	53
Figur 18: TAM-apparatet.....	57
Figur 19: Rate vs. omfang av prosessen (Wadsö, 2005)	59
Figur 20: Vicatronic automatisk Vicat-opptaksapparat (MATEST, u.å.).....	60
Figur 21: Tabell for setningstest (Mishra, u.å.).....	61
Figur 22: Smelteflyt i skapelsen.....	62
Figur 23: Flytspredning (Standard Norge, 2019).....	63

Figur 24: Måleverktøy for kontroll av luftinnhold i fersk betong (Vegdirektoratet, 2014) .	64
Figur 25: Oppsett av selve testen, RCPT.....	67
Figur 26: Oppsett av testen, RCPT (Nordtest, 1999)	67
Figur 27: Illustrasjon av måling av kloridinntrengningsdybde (Nordtest, 1999).....	69
Figur 28: Kloridinntrengningsdybden begynner å bli synlig etter bruk av $AgNO_3$	69
Figur 29: Den karbonatiserte overflaten.....	71
Figur 30: Prinsipp for måling av akselerert karbonatisering, (Atiş, 2003).....	71
Figur 31: Herdingsprosess for GP5.2 og CEMII/A-S 42.5 R	77
Figur 32: Foto av standard stålstøp, som viser hvordan GPC-en fester seg til stålet	79
Figur 33: Foto av plaststøpingen som ble brukt til kloridmigrasjonstestsylindrene	79
Figur 34: Feilmodus for GP5.2.....	79
Figur 35: Foto etter avforming av GP5.2-opskrift.....	79
Figur 36: "Modellageret" i dag.....	80
Figur 37: Realistisk avtrykksbilde av modulveggen.....	80
Figur 38: Forholdet mellom betongdekke og W/C (Maage, 2015, s. 220)	81
Figur 39: Tverrsnitt av modulveggen	81
Figur 40: Konseptuell tegning av armering.....	82
Figur 41: "Modellageret" med en vegg erstattet med en GPC-modulvegg.....	83
Figur 42: CEM-II /A-S 42.5N Livssyklusnettverk for betong.....	87
Figur 43: GP5.2 livssyklusnettverk	88
Figur 44: Energiforbruk.....	89
Figur 45: LCA CO ₂ -utslipp.....	90

Liste over tabeller

Tabell 1: De fire hovedmineralene i OPC (Maage, 2015, s. 83).....	7
Tabell 2: Klasse av tilsetningsstoffer (SINTEF, 2010)	15
Tabell 3: Kjemiske sammensetninger slag og FA.....	19
Tabell 4: Setningsklasser (Standard Norge, 2004).....	30
Tabell 5: Klasser for fall- og flyteevne (Standard Norge, 2013, s. 28).....	31
Tabell 6: Flytklasser (Standard Norge, 2013, s. 27).....	31
Tabell 7: Modifikasjonsfaktorer for omregning av betongprøvers styrke (Building Research Institute, u.å.)	32
Tabell 8: Brukte standarder	47
Tabell 9: Oppskrift og faktisk vekt på GP5.2.....	52
Tabell 10: Minste prøvemengde av den øvre kornstørrelsen	54
Tabell 11: Målt mengde tilslag.....	56
Tabell 12: Verdier for varmekapasitet.....	58
Tabell 13: Testspenning og varighet ((Nordtest, 1999)	68
Tabell 14: Klassifiseringskriterier for kloridbestandighet for betong (Dhanya, Santhanam, Pillai, & Gettu, 2014, s. 13).....	70
Tabell 15: GP5.2-resultater.....	74
Tabell 16: Herdede egenskaper	77
Tabell 17: Akselerert karboniseringsdybde (mm) for sammenlignbar betong (Atiş, 2003)	78
Tabell 18: Sement-slagg-forholdet i den sammenlignede oppskriften (Kopecskó & Balázs, 2017)	84
Tabell 19: Oppskriften som ble brukt i LCA-studien (Kopecskó & Balázs, 2017)	85
Tabell 20: Nøkkerverdier brukt i LCA-studien	86

Symboler

Forkortelser

ASR- Alkali-silika-reaksjon

BFS- masovnsagg

BIM - Bygningsinformasjonsmodellering

EFC - Earth Friendly Concrete (miljøvennlig betong)

EPD - Environmental Product

Declaration (miljødeklarasjon) FA - Flyveaske

GGBFS - malt granulert

masovnsagg GPC - geopolymertbetong

LCA - livssyklusanalyse

OPC - vanlig portlandsement

PCR- Regler for produktkategorier

SCC - selvkonsoliderende betong

SF- Silica Fume

Kjemiske forkortelser AgNO_3

- Sølvnitrat

Al- Aluminium

Al_2O_3 - Aluminiumoksid

$\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ - Dibenzalaceton

C2S-

Dikalsiumsilikat

C3A- trikalsiumaluminat

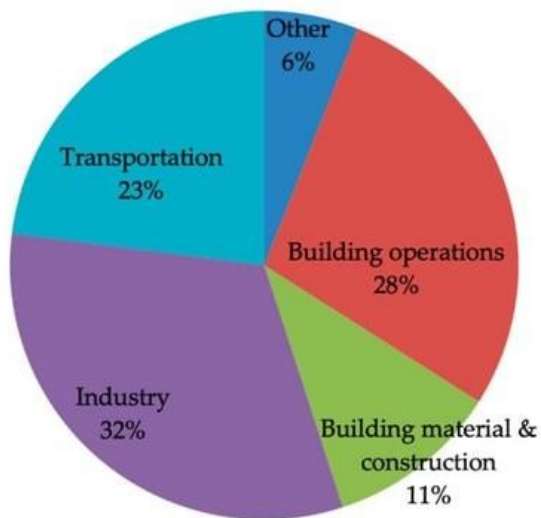
C3S- Tricalcium Silica

C4AF	- Tetrakalsiumaluminoferritt
Ca	- Kalsium
Ca(OH) ₂	- Kalsiumhydroksid
CaSiO ₃	- Kalsiumsilikat
CH	- Kalsiumhydroksid / Portlanditt
CH ₄	- Metan
CO	- Karbonmonoksid
CO ₂	- Karbondioksid
Fe	- Jern
H ₂ O	- Vann
K	- Kalium
K ₂ O	- Kaliumoksid
K ₂ SiO ₃	- Kaliumsilikat
KOH	- Kaliumhydroksid
Li	- Litium
MgO	- Magnesiumoksid
Na	- Natrium
Na ₂ O	- Natriumoksid
Na ₂ SiO ₃	- Natriumsilikat
NaCl	- Natriumklorid
O	- Oksygen
Si	- Silisium

1 Innledning

For hvert år som går, endrer klimaet seg. Målinger har vist at temperaturen øker, isbreene smelter, havnivået stiger og det blir mer uforutsigbart ekstremvær. Dette skyldes økningen av klimagasser som slippes ut i atmosfæren (FN-Sambandet, 2023).

Byggebransjen alene står for omtrent 38 % av verdens utslipp (FNs miljøprogram, 2021). Av disse 38 % står produksjonen av betong for hele 10 % av utslippene (Saeed, et al., 2022, s. 5-9). På grunn av de utmerkede egenskapene som



Figur 1: Globale CO₂-utslipp fordelt på sektorer (Ali, 2020, s. 12)

På grunn av betongens trykkfasthet, holdbarhet, brannmotstand og motstand mot andre mekaniske påkjenninger har det blitt det mest brukte materialet i byggebransjen. Det er anslått et årlig forbruk på 12,5 milliarder kubikkmeter i 2021 (Seehusen, 2021). Betong brukes i stor grad i prefabrikkerte elementer og støpte konstruksjoner på stedet, ettersom det har stor fleksibilitet til å formes til utfordrende former samtidig som de ønskede egenskapene opprettholdes.

Dagens klimagassutslipp må minimeres for å unngå samfunnskollaps og bevare miljøet (FN-Sambandet, 2023). Det betyr at alle aktører innen de ulike næringene må bidra, inkludert byggebransjen (FN-Sambandet, 2023).

Gruppens visjon er å gjennomføre en grundig undersøkelse av geopolymerbetong for å se om tradisjonell betong kan erstattes - ved å bruke tekniske verktøy som brukes i byggebransjen.

1.1 Problemstilling

I forbindelse med Erasmus+-programmet og i samarbeid med Høgskolen i Østfold har gruppen vært engasjert i et internasjonalt BIM-LCA-konstruksjonsprosjekt. Som en del av dette har bacheloroppgaven blitt skrevet i samarbeid med Jotne Eiendom og Selvaag Bolig. Den fokuserer på utviklingen av byområdet FMV-Vest i Fredrikstad, hovedsakelig mot et bygg kalt "Modellageret". Dette bygget har en forventet levetid på 10 år før den nye reguleringsplanen trer i kraft.

Gruppen har derfor valgt å belyse den grønne omstillingen i byggebransjen ved å ta utgangspunkt i følgende problemstilling:

Formålet med denne avhandlingen er å undersøke holdbarheten og egenskapene til en egenutviklet geopolymerebetong, samt å sammenligne CO₂-utslippene fra produksjonsfasen med tradisjonell betong - med mål om å fremme utslippsbevissthet i bygg- og anleggsbransjen ved hjelp av BIM og LCA.

1.2 Begrensninger

Med tanke på tidsbegrensningene for bacheloroppgaven er det hensiktsmessig å sette følgende begrensninger for å sikre at resultatene blir så nyttige som mulig:

Geopolymerbetong

- Det er kun materialets egenskaper som vurderes, ikke den estetiske utformingen.
- Eventuelle økonomiske aspekter vil ikke bli vurdert eller tatt med i beslutningsgrunnlaget.
- Materialeegenskapene vil bli testet i laboratoriet ved Høgskolen i Østfold og begrenset til det utstyret som er tilgjengelig.
- Begrensninger med hensyn til å blande tilstrekkelig mengde prøver.
- Sammenligningen med tradisjonell betong er begrenset til litteratur og standarder.

Potensiell bruk av geopolymerbetong, BIM-gjennomgang

- Det er ikke de påvirkende kreftene og statikken i utformingen av modulveggen som er i fokus i denne oppgaven, men *heller* den potensielle bruken av geopolymerbetong.
- Forankringsløsningen for modulveggen vil ikke bli vurdert, men kort diskutert ettersom gjenbruk er et mål.

LCA-studie

- Verdiene for LCA-studien er hentet fra SimaPro-databasen, og energiforbruket er delvis antatt og ikke en sikker verdi.
- LCA-studien er begrenset til produksjonsfasen av ferdigblandet betong.

1.3 Forskningsmetode

Under gjennomføringen av bacheloroppgaven benytter gruppen ulike forskningsmetoder, som vist i de følgende punktene:

- Ekskursjon til Cartagena og workshops knyttet til tekniske verktøy.
- Litteratursøk og metodisk innhenting av informasjon knyttet til temaet.
- Prosjektplanlegging og fremdriftsoppfølging i Microsoft Project.
- Flytskjema for blanding og utvikling av oppskrifter i Microsoft Visio.
- Muntlig informasjonsinnhenting fra samarbeidspartnere og veiledere.
- Støping og laboratorierelatert testing.
- Modellering i Revit.
- Livsløpsvurdering i SimaPro.
- Resultatrapportering i Excel.

2 Teori

Betong er et av de mest brukte materialene i verden og spiller en avgjørende rolle i bygg- og anleggsbransjen (Gregory & Logan, 2021). Historisk sett har betong blitt brukt i ulike former i tusenvis av år, og utviklingen av moderne Portland-sementbasert betong kan spores tilbake til 1800-tallet (th) (Kontrollrådet, 2018). I dag er betong fortsatt et populært byggemateriale på grunn av sine allsidige egenskaper, men produksjonen av betong har en betydelig miljøpåvirkning med store mengder karbondioksidutslipp (Gregory & Logan, 2021).

I 1978 ble geopolymere først introdusert som et alternativ til vanlig portlandsement, OPC (Parshwanath, Nataraja & Lakshmanan, 2011). Geopolymer er basert på mindre bearbejdede mineraler med aluminiumsilikater. Egnede råmaterialer for geopolymere kan være flyveaske, jernslag eller til og med leire (Betongfokus, 2019). For å avgjøre om geopolymere er et miljøvennlig og holdbart materiale, må leseren støtte seg til litteratur og forskningsbasert dokumentasjon som presenteres nedenfor, inkludert BIM og LCA.

2.1 Tradisjonell betong

Betong er et allsidig teknisk materiale som består av et hydraulisk sementerende stoff, vanligvis OPC, tilslag, vann og ofte kontrollerte mengder medrevet luft. Betong er i utgangspunktet en plastisk, bearbejdbar blanding som kan støpes til en rekke ulike former. Styrken utvikles under hydratiseringsreaksjonen mellom sement og vann. Produktene, hovedsakelig kalsiumsilikater, kalsiumaluminater og kalsiumhydroksid, er relativt uløselige og binder tilslaget i en herdet matrise (Jahren, 2012, s. 11). Betongmassen fungerer som en homogen væske, der matriksfasen omgir partikkelfasen (Maage, 2015, s. 143).

2.1.1 Sement

Definisjonen av sement brukes vanligvis for å beskrive en tørr substans som ennå ikke er aktivert. Partikkelstørrelsen varierer fra 0,5 til 80 μm , og fargen er normalt grå på grunn av råmaterialene som inneholder jern (Fe). Disse råmaterialene består hovedsakelig av kalkstein, gips og andre materialer med høyt innhold av kalk og silisiumdioksyd. Blant disse er kvarts, skifer, sand eller leire (Jahren, 2012, s. 16).

Når det gjelder produksjon av sement, brennes kalkstein sammen med for eksempel kvarts og skifer. Blandingen knuses og varmes opp i roterende ovner ved rundt 1450 °C. Dette resulterer i klinker som males sammen med gips og blir til sement (Heidelberg Materials, u.å.). Kalkstein består hovedsakelig av karbon og oksygen, og når den varmes opp, starter kalsineringsprosessen der kalkstein spaltes i kalsiumoksid (CaO) og karbondioksid (CO_2) frigjøres - noe som fører til omfattende CO_2 -utslipp (Heidelberg Materials, u.å.).



Det anslås at det brukes rundt 3 tonn betong per menneske hvert år (Gagg, 2014, s. 1).

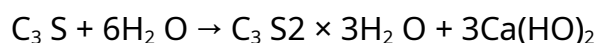
2.1.2 Hydreringsprosessen

OPC består hovedsakelig av fire mineraler, nemlig trikalsiumsilikat (C₃S), dikalsiumsilikat (C₂S), trikalsiumaluminat (C₃A) og tetrakalsiumaluminatferritt (C₄AF). Det ubundne CaO er det viktigste mineralet for egenskapene, i tillegg til magnesiumoksid (MgO), gips, kaliumoksid (K₂O) og natriumoksid (Na₂O). Forholdet mellom disse fire mineralene beskriver sementens eksotermiske, styrke-, holdbarhets- og herdeegenskaper (Maage, 2015, s. 83).

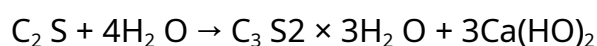
Navn	Kjemisk formel	Symbol
Trikalsiumsilikat	$3CaO \times SiO_2$	C3S
Dikalsiumsilikat	$2CaO \times SiO_2$	C2S
Trikalsiumaluminat	$3CaO \times Al_2 O_3$	C3A
Tetra kalsiumaluminatf erritt	$4CaO \times Al_2 O_3 \times Fe_2 O_3$	C4AF

Tabell 1: De fire hovedmineralene i OPC (Maage, 2015, s. 83)

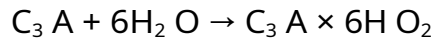
Formel for hydreringsprosessen til C₃S:



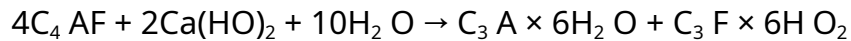
Formel for hydratiseringsprosessen av C₂S:



Formel for hydreringsprosessen til C_3A :

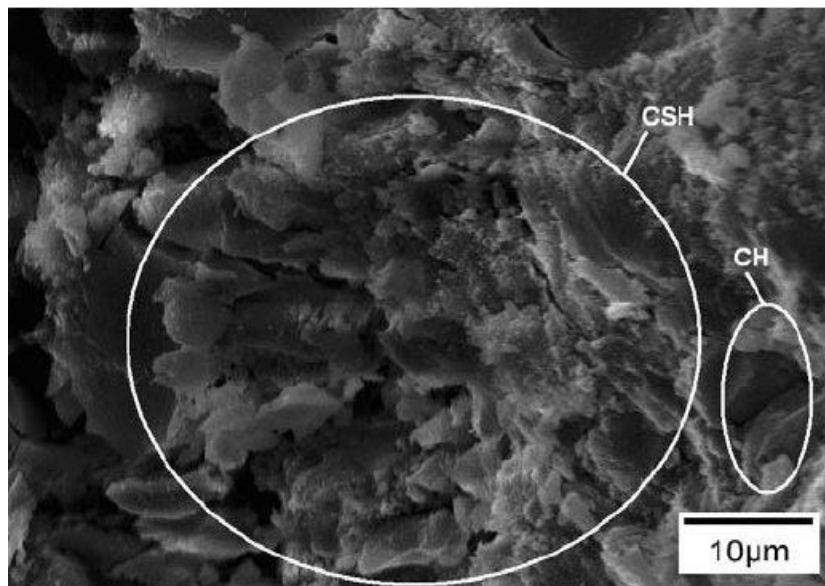


Formel for hydratiseringsprosessen til C_4AF :



(Saleh & Eskander, 2020)

Hydreringen er en eksoterm prosess som frigjør mye energi. Prosessen kalles latent hydraulisk, og hydratiseringsreaksjonen kan fortsette selv om gipsen er helt nedsenket, i fravær av luft. Reaksjonen forsinkes av en liten mengde gips som må brytes ned for at hydratiseringsprosessen skal komme i gang. Dette sikrer bearbeidbarheten til betongblandingen i ca. 2 til 3 timer (Maage, 2015, s. 57). Ifølge Powers' modell er reaksjonsproduktene kalsiumsilikathydrat (C-S-H) og portlanditt (CH), samt ettringitt. Det er imidlertid ikke mulig å oppnå 100 % hydrering, men omtrent tre fjerdedeler vil være hydrert etter 1 år. C-S-H danner gelporene, som er hovedkilden til det som gir sementpastaen dens styrke og herdede egenskaper (Maage, 2015, s. 58-59).



Figur 2: SEM av CH og C-S-H, Mix 8 (Armentrout & Belkowitz, 2009)

2.1.3 Tilsetningsstoffer

Tilsetningsstoffer deles inn i puzzolaner og latent hydrauliske materialer og har som mål å erstatte Portland-sement. Basert på ønskede egenskaper kan de ulike materialene doseres i varierende prosentandel i forhold til portlandsement (Maage, 2015, s. 92-93).

Puzzolanmaterialer er en samlebetegnelse for materialer som reagerer med reaksjonsproduktet kalsiumhydroksid (Ca(OH)_2) (Maage, 2015, s. 93).

Silikastøv, 0,01-1 μm

Silica Fume, SF, er et biprodukt fra produksjonen av silisium og ferrosilisiummetall. SF er svært finkornet, og partiklene er i størrelsesorden 1/100 av størrelsen på sementpartikler. I Europa må SF være i samsvar med standarden *NS-EN 13263-1 "Silikastøv for betong, Del 1: Definisjoner, krav og samsvarskriterier"* (Maage, 2015, s. 93-99).

Innvirkning på fersk betong (Maage, 2015, s. 95-96):

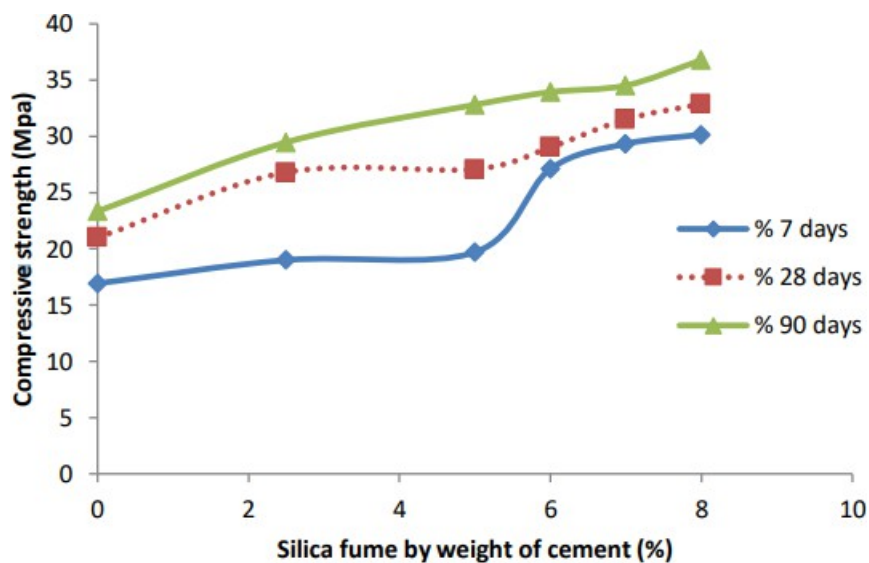
- SF bidrar til å gjøre betongen litt stivere og reduserer risikoen for segregering.
- Betong med SF har høyere viskositet og flytesjuvspenning, og derfor brukes det alltid plastiseringsmidler.
- Det bidrar til langsommere styrkeutvikling og mindre varmeutvikling.

Innvirkning på herdet betong og mekaniske egenskaper (Maage, 2015, s. 96-98):

- Puzzolanreaksjonen til SF er mer påvirket av temperatur - lavere tidligfasthet ved lave temperaturer sammenlignet med vanlig betong og omvendt.
- SF-betong er mer motstandsdyktig mot høye herdetemperaturer ettersom den utvikler mindre porøse produkter enn tradisjonell betong.
- SF kan forbedre betongens trykkfasthet, vedheft og slitestyrke sammenlignet med betong uten SF.

Innflytelse på holdbarheten (Maage, 2015, s. 98-99):

- SF reduserer potensialet for alkali-silikareaksjon, ASR, ettersom puzzolaner binder alkaliene i betongen og gjør dem utilgjengelige for senere reaksjon med reaktivt tilslag.
- Tilsetningen av SF gir en finere porestruktur i betongen, noe som fører til en tettere betong.
- Ved bruk av SF reduseres inntrengning av klorider betydelig.



Figur 3: Trykkfasthet for mørtel som inneholder SF (Muwashee & Al-Jameel, 2021)

Flyveaske, 1-100 µm

Flyveaske, FA, er et biprodukt fra rensing av røykgasser i kullkraftverk. *NS-EN 197-1* refererer til to typer FA: en silikatholdig og en kalsiumholdig type. FA inneholder vanligvis noe restkarbon, noe som gjenspeiles i den litt mørkere fargen på betongen (Maage, 2015, s. 101). Bruk av FA i Europa er underlagt standarden *NS-EN 450-1: "Flyveaske til betong, Del 1: Definisjon, spesifikasjoner og samsvarskriterier"* (Maage, 2015, s. 101-103).

Påvirkning på fersk betong (Maage, 2015, s. 102):

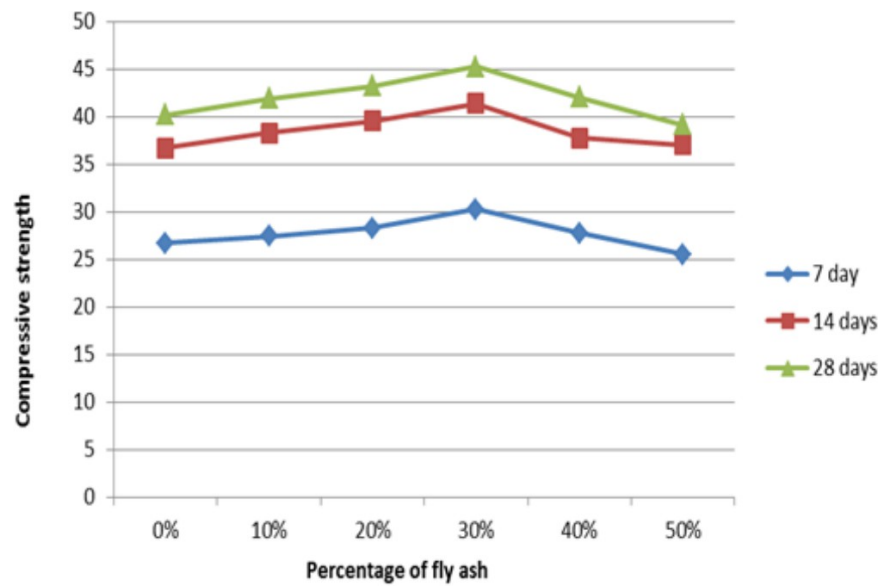
- Partiklene i FA er i hovedsak sfæriske, og partikkelstørrelsen er lik OPC. Dette forbedrer betongens bearbeidbarhet.
- FA har lavere tetthet enn sement. Dette kan bidra til høyere matrisevolum, noe som kan forbedre bearbeidbarheten til betongen.
- FA bidrar til god stabilitet.

Innvirkning på herdet betong og mekaniske egenskaper (Maage, 2015, s. 102-103):

- FA reagerer langsommere enn sement, noe som kompenseres ved å male sementen til en finere tilstand.
- På lang sikt vil puzzolanreaksjonen bidra til at betong med FA utvikler høyere styrke enn betong uten FA.
- Vedheftet påvirkes positivt ved bruk av FA.

Innvirkning på holdbarheten (Maage, 2015, s. 103):

- FA har samme innvirkning på holdbarheten som SF, og motstandsdyktigheten mot utvasking, sulfatangrep og syreangrep påvirkes positivt ved bruk av FA.
- Karbonatiseringen kan forplante seg raskere inn i betongen når mengden FA øker.
- Kloridinntrengningen reduseres kraftig, og den elektriske motstanden øker med økende innhold av FA.



Figur 4: OPC-forhold, trykkfasthet med % FA (Abushad & Sabri, 2017)

Slagg

Slagg, eller masovnsslagg (BFS), er et biprodukt fra produksjonen av råjern. Det innsamlede avfallet består i utgangspunktet av relativt store partikler og må knuses og males til en partikkelstørrelse som sement. Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS, er et biprodukt fra jern- og stålindustrien som produseres ved at masovnsslagg hurtigslukkes og males, og det brukes ofte som et supplerende sementholdig materiale i betongproduksjon (GCP, u.å.). GGBFS omtales ofte som slagg i betongterminologien, og det er et "latent hydraulisk" materiale, noe som betyr at det kan reagere kjemisk uten kombinasjon med sement hvis pH-nivået er høyt nok. Det består av 30-50 % CaO, 30-40 % silisiumoksid eller silika (SiO_2), 10-25 % aluminiumoksid eller alumina (Al_2O_3), samt andre oksider (Maage, 2015, s. 103-105). Bruk av slagg vil redusere utslippene knyttet til betong og redusere avfallsmengden i stålindustrien (Samferdsel og infrastruktur, 2019). I Europa brukes standarden *NS-EN 15167-1: "Malt granulert masovnsslagg til bruk i betong, mørtel og injeksjonsmørtel, Del 1: Definisjoner, spesifikasjoner og samsvarskriterier"* (Maage, 2015, s. 105).

Påvirkning på fersk betong (Maage, 2015, s. 105):

- Betong med slaggsement har ofte bedre bearbeidbarhetsegenskaper og redusert segregering sammenlignet med betong som bare inneholder OPC.
- Slaggsement i betong fører ikke nødvendigvis til redusert varmeutvikling.

Påvirkning på herdet betong og mekaniske egenskaper (Maage, 2015, s. 105):

- Slagg reagerer langsomt, og styrken vil være lavere de første dagene sammenlignet med om OPC hadde blitt brukt. Dette kan til en viss grad justeres ved å male slaggsementen til en finere tilstand.
- Reaksjonen av slaggsement varer i en lengre periode. Det betyr at betong med slaggsement vil oppnå høyere styrke enn betong med OPC.

Innvirkning på holdbarheten (Maage, 2015, s. 105):

- Slagg bidrar til redusert kloridinntrengning, ettersom C-S-H-produkter dannes over tid.
- Poresystemet i betongen blir finere, noe som resulterer i en tettere betong, og dermed øker motstandsdyktigheten mot alkalireaksjoner og sulfatangrep påvirkes positivt ved bruk av slagg.
- Det faktum at absorpsjonen av vann i poresystemet øker betydelig, betyr at betong med slaggsement vil ha redusert frostbestandighet.

2.1.4 Tilsetningsstoffer

Tabellen nedenfor viser de mest brukte tilsetningsstoffene:

Class of admixtures	Description of the substance's mode of action in concrete
Water – reducing or plasticizing	Reduces the water requirement in each concrete mixture without affecting the consistency or increase the slump/spread measurement without affecting the water requirement or has both effects simultaneously.
Highly water – reducing or super plasticizing	Significantly reduces the water requirement in each concrete mixture without affecting the consistency, or significantly increases the slump/spread measurement without affecting the water requirement or has both effects simultaneously.
Air – entraining	The admixture adds a controlled amount of small, uniformly distributed air bubble during mixing that remain in the mixture after hardening.
Setting accelerators	Reduces the time before the concrete mixture transitions from a plastic to a hardened state.
Hardening accelerators	Causes faster development of early strength in concrete, with or without affecting the setting time.
Setting retarders	Increases the time before the concrete mixture transitions from a plastic to a hardened state.
Water – repellent	Reduces the capillary water absorption in curing concrete.
Admixture for reduced water separation	Reduces water loss by reducing water separation <Bleeding>.
Setting – retarding and water – reducing	Provides combined effect of a water – reducing admixture (primary function) and a setting – retarding admixture (secondary function).
Setting – retarding and high – range water-reducing	Provides combined effects of a water – reducing admixture (primary function) and a setting accelerating admixture (secondary function).
Accelerating setting and water reducing	Provides combined effects of a water – reducing admixture (primary function) and a setting – retarding admixture (secondary function).

Tabell 2: Klasse av tilsetningsstoffer (SINTEF, 2010)

2.1.5 Masseforhold

Masseforholdet avhenger av forholdet mellom vann og sement, i tillegg til tilsetningsstoffer og deres respektive k-faktor (Maage, 2015, s. 100). Masseforholdet er den største faktoren for de herdete egenskapene, som styrke og holdbarhet. I tillegg vil eventuelle tilsetningsstoffer og tilsetningsstoffer som brukes, påvirke de andre egenskapene (Maage, 2015, s. 13).

Formel for masseforhold (Maage, 2015, s. 155):

$$m = \frac{v}{c} = \frac{v}{(c + \sum k * p)}$$

Hvor?

m- Masseforhold

v- Mengde vann

c- Mengde sement

p- Mengde tilsetningsstoffer

k- Effektivitetsfaktor

2.1.6 Aggregater

Betongtilslag deles hovedsakelig inn i grovt og fint tilslag. En tilslagsfraksjon defineres av betegnelsen d/D, som representerer den minste og største nominelle partikkelstørrelsen. Den øvre nominelle partikkelstørrelsen representerer ikke den maksimale faktiske partikkelstørrelsen, noe som betyr at det alltid vil være et visst antall partikler med overstørrelse (Maage, 2015, s. 133). Partikkelstørrelsesfordelingen dokumenteres ved hjelp av siktanalyse i henhold til *NS-EN 933-1* (CEN, 2012).

2.2 Geopolymerbetong

Geopolymerbetong, GPC, har fått mye oppmerksomhet de siste årene og er et relativt nytt byggemateriale. I likhet med vanlig betong består også GPC av et bindemiddel, en væske og tilslag. Hovedforskjellen er at bindemiddelet ikke inneholder OPC, og at væsken hovedsakelig består av alkaliske aktivatorer. Den andre store forskjellen mellom OPC-betong og GPC er at GPC utnytter avfallsmaterialer mye bedre, noe som reduserer CO₂-utslippene betydelig. Den regnes også som ganske kostnadseffektiv, og gir infrastruktur med lang levetid og lavt energiforbruk (Ahmed, et al., 2022).

2.2.1 Masseforhold mellom GPC, L/GB

I 2.1.5 Masseforhold omfatter begrepet masseforhold, som nevnt, også væske/bindemiddel-forholdet, som representerer masseforholdet mellom den totale mengden fritt vann og vannet i de alkaliske løsningene, samt den totale massen av geopolymer-faststoffene, inkludert FA, GGBFS, kaliumhydroksid (KOH)-pellets og natriumsilikat (Na_2SiO_3)-faststoff. Dette forholdet foreslås å ha en lignende effekt som forholdet mellom vann og sement (W/C) for vann og sement (Pilehvar, et al., 2018). Begrepet "væske" brukes imidlertid i forslaget til å omfatte den totale mengden alkaliske løsninger, ekstra vann, superplastisatorer og geopolymerbindemidler, som inkluderer FA og GGBFS (Pilehvar, et al., 2018). Med disse to forslagene bestemte gruppen seg for å bruke det sistnevnte forholdet, ettersom gruppen har definert hele den alkaliske løsningen, superplastifiseringsmiddelet og vannet som en *væske*.

2.2.2 Geopolymer som bindemiddel

Det er økende enighet om at kalksteinbasert bindemiddel regnes som førstegenerasjons sement, OPC som andregenerasjons sement og geopolymersement omtales ofte som tredjegerasjons sementmateriale (Singh, Ishwarya, Gupta & Bhattacharyya, 2015). Det har fått mye positiv oppmerksomhet de siste årene på grunn av den tidlige trykkfastheten, den gode kjemiske motstandsdyktigheten, den lave permeabiliteten og de brannhemmende egenskapene. Ordet "geopolymer" er et generelt begrep som ofte brukes om amorfe alkalialuminosilikater, ettersom amorft beskriver et fast stoff som ikke har en krystallinsk struktur (Mavračić, Mocanu, Deringer, Csányi & Elliott, 2018). Videre er disse også kjent under andre navn som "geocementer", "alkali-aktiverede sementer", "uorganiske polymerer", "alkalibundet keramikk", "hydrokeramikk" med mer (Singh, Ishwarya,

Gupta, & Bhattacharyya, 2015). Til tross for at terminologien varierer, beskriver disse ulike begrepene materialer med sammenlignbar kjemi.

Den kjemiske forbindelsen består vanligvis av en repeterende enhet av sialatmonomer. Monomer er en type kjemisk forbindelse, der molekylene reagerer i seg selv for å skape større molekyler, gitt de rette forholdene (Helseth, 2021). Sialatmonomerer er en forkortet form av alkalisisilium-okso-aluminat, der alkaliene er natrium (Na), kalium (K), litium (Li) og kalsium (Ca). De kjennetegnes av sin sammensetning, som inkluderer silisium- (Si), aluminium- (Al) og oksygenatomer (O), sammen med alkalimetallkationer som Na eller K. Slike materialer som har blitt brukt som råmaterialer i geopolymer, omfatter feltspat, kaolinitt og faste industrielle restprodukter. Disse inkluderer FA, gruveavfall og metallurgisk slagg. Det som beskriver reaktiviteten, er egenskaper som kjemisk sammensetning, morfologi, glassaktig fase, finhet og mineralogisk sammensetning av disse aluminosilikatkildene. De felles faktorene som utvikler geopolymerens egenskaper, omfatter materialer som har tilstrekkelig reaktivt glassaktig innhold, høy amorf tilstand, ubetydelig behov for vann og evne til å frigjøre aluminium lett (Singh, Ishwarya, Gupta & Bhattacharyya, 2015).

Geopolymeriseringsprosessen består vanligvis av følgende trinn (Cong & Cheng, 2021):

1. Oppløsning av forløperen
2. Dannelse av den opprinnelige gelen
3. Dannelse av silikatgel-nettverksstruktur

Som med OPC har valg av råmaterialer og forholdet mellom dem stor innvirkning på geopolymerens egenskaper, som holdbarhet, varmeutvikling, potensiell styrke, styrkeutvikling (Maage, 2015, s. 83-87). Siden det er brukt slagg og FA som bindemiddel, vil mineralsammensetningen av materialene bli diskutert. Tabell 3 nedenfor viser sammensetningen av tilsetningsstoffene som er brukt i dette prosjektet. Blaine-verdien, eller spesifikt overflateareal, og partikkelfinhet viser også effektiviteten til et puzzolanisk materiale (Taffase & Espinosa-Leal, 2023, s. 2).

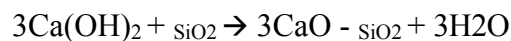
MERIT		FA from Norcem	
	Slag		FA F
H2O	0,18	H2O	0,54
CO2	1,41	CO2	1,25
Na2O	0,55	Na2O	0,86
MgO	12,79	MgO	1,24
Al2O3	11,82	Al2O3	21,13
SiO2	32,12	SiO2	60,59
SO3	2,69	SO3	0,66
K2O	0,96	K2O	2,65
CaO	34,25	CaO	2,04
TiO2	2,15	TiO2	1,10
V2O5	0,11	V2O5	0,05
Cr2O3	0,01	Cr2O3	0,02
MnO	0,51	MnO	0,09
Fe2O3	0,21	Fe2O3	7,13
CuO	0,01	CuO	0,02
Rb2O	0,00	Rb2O	0,01
SrO	0,06	SrO	0,06
Y2O3	0,01	Y2O3	0,01
ZrO2	0,04	ZrO2	0,06
Nb2O5	0,00	Nb2O5	0,00
BaO	0,07	BaO	0,12
	99,94		99,61

Tabell 3: Kjemisk sammensetning av slagg og FA

Slagg eller GGBFS i geopolymere

Slagg aktiveres av Ca(OH)_2 , sulfater og alkalier (Maage, 2015, s. 105). Den store mengden CaO og SiO_2 i slagg sikrer den hydrauliske egenskapen ved å reagere med dihydrogenmonoksid (H_2O), i tillegg til at det kan herde helt nedsenket. SiO_2 , og Al_2O_3 , er et amorft materiale, og har dermed puzzolaniske egenskaper. Når pH-verdien er ≥ 11 , blir Al_2O_3 og SiO_2 løselig, noe som muliggjør en puzzolanisk reaksjon (Singh, Siddique & Singh, 2022, s. 1-29). SiO_2 må være i en amorf tilstand for å kunne delta i puzzolanreaksjonen (Maage, 2015, s. 101). SiO_2 og CaO vil danne kalsiummetasilikat (CaSiO_3), samt C-S-H-produkter, ved at SiO_2 reagerer med Ca(OH)_2 (Maage, 2015, s. 94).

Puzzolanisk reaksjon (Setina, Gabrene & Juhnevica, 2013, s. 1006):



FA (type F) i geopolymere

FA består hovedsakelig av SiO_2 og Al_2O_3 , og i likhet med slagg genererer det en puzzolanisk reaksjon. Finheten til FA-pulveret har stor innvirkning på herdingen og styrkeutviklingen. Ultrafin FA reduserer porøsiteten, noe som gir mer holdbar betong, men reduserer også herdetiden (Deb & Sarker, 2016, s. 1-5). Bearbeidbarheten forbedres på grunn av partiklenes sfæriske form og små proporsjoner (Maage, 2015, s. 101). I tillegg reduseres porøsiteten, og vannsorpptiviteten blir redusert som et resultat av dette. Det vil da øke diffusjonsmotstanden for klorid på grunn av de reduserte permeable porene (Saha, 2018, s. 25-31). På grunn av det lave innholdet av CaO og det høye nivået av amorf silika vil imidlertid den tidlige utviklingen av trykkfasthet være lavere, mens den langsiktige vil være høyere. FA bidrar også gradvis til at tørkekrympingen reduseres, ettersom den inneholder betydelig mindre kalk (Saha, 2018, s. 25-31).

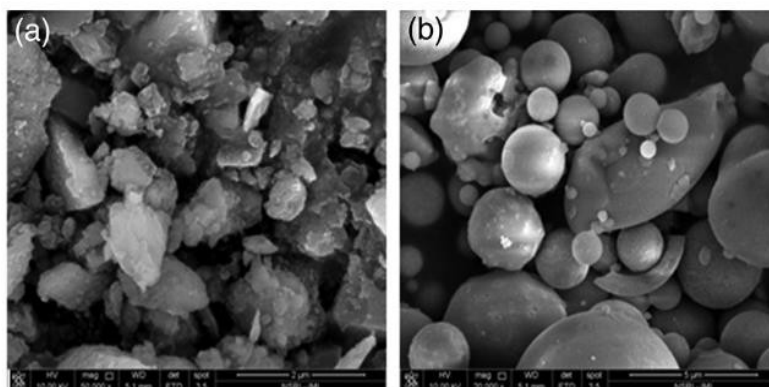
Grunnen til at FA type F er så effektiv når det gjelder å bidra til mindre permeabilitet og høyere motstand mot kloridionreduksjon, skyldes reduksjonen av hovedsakelig to transportmetoder (Saha, 2018, s. 25-31):

- Sammenkobling av hulrom i betong.
- Frie hydroksyl-ioner (HO-ioner).

Jo finere FA er, desto mindre blir sammenkoblingen, noe som gjør det vanskeligere for ionene å bevege seg gjennom betongen. Ettersom FA type F også reduserer ASR, binder den i tillegg HO-ionene i poreløsningen. Disse to faktorene bidrar derfor til å gjøre betongen mer holdbar, særlig på grunn av den reduserte kloridgjennomtrengeligheten (Saha, 2018, s. 25-31).

Forholdet mellom FA og GGBFS

Med større forhold mellom FA og GGBFS reduseres den innledende herdetiden på grunn av reaksjonen av Ca som finnes i GGBFS. Blandingens bearbeidbarhet øker i GPC med økende mengde FA på grunn av den lille partikkelstørrelsen og -formen. På grunn av finheten og den høye Blaine-verdien til FA, øker den puzzolaniske reaktiviteten og kapillærporene kollapser (Ahmed, et al., 2022). Dette gir lavere porøsitet og høyere styrke og tetthet, ettersom mer materiale fyller porene som kunne vært fylt med luft eller vann. Økende andel GGBFS reduserer bearbeidbarheten, ettersom partiklene har en mer kantete form enn FA-partiklene. Styrkeutviklingen er til å begynne med langsommere, men styrken øker opp til 180 dager (Ahmed, et al., 2022). Forholdet mellom GGBFS og FA på 20 til 80 er optimalt ifølge Ahmed. Et forhold på 25 til 75 mellom GGBFS og FA er også foreslått for å ha de beste mekaniske egenskapene (Patil, Karikatti & Chitawadagi, 2018).



Figur 5: Bilde a) viser SEM-bilde av slagpartikler, mens b) viser SEM-bilde av flyveaskepartikler (Verma & Dev, 2021)

2.2.3 Alkaliske aktivatorer

Aktivatorene som brukes til å lage GPC, er KOH, natriumhydroksid (NaOH), kaliumsilikat (K_2SiO_3) og Na_2SiO_3 . Disse brukes til å aktivere aluminosilikatstoffer og produsere hydratiseringsproduktene C-S-H, CH og ettringitt.

Geopolymeriseringsprosessen består vanligvis av tre påfølgende trinn (Cong & Cheng, 2021):

1. Oppløsning av aluminosilikatmaterialer ved hjelp av alkaliske aktivatorer.
2. Kondensasjonsreaksjon mellom aluminiumoksid og silikahydroksyl for å danne geopolymergel.
3. Kondenserer videre og danner et tredimensjonalt nettverk.

Når man sammenligner NaOH med KOH, viser KOH et høyere innhold av alkalinitet, men NaOH ser ut til å ha større evne til å frigjøre silikat- og aluminatmonomerer (Singh, Ishwarya, Gupta & Bhattacharyya, 2015). Høyere molaritet av alkaliske aktivatorer, som NaOH, gir større trykkfasthet, men lavere bearbeidbarhet (Ahmed, et al., 2022). KOH hadde også høyere trykkfasthet med høyere konsentrasjon, opp til 14M (Hardjito & Tsen, 2008).

Forholdet mellom aktivatorene

For å oppnå den høyeste trykkfastheten laget Detphan og Chindaprasirt GPC av risskallaske og FA, som ble aktivert med en NaOH- og Na_2SiO_3 -løsning. Det optimale masseforholdet mellom Na_2SiO_3 og NaOH var 4:1 (Saeed, et al., 2022). Andre kilder oppgir at forholdet

mellom de to alkaliske løsningene bør være $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 2,5$ (Ketana, Reddy, Rao, &

Shrihari, 2021). Gruppen har lagt seg på et forholdstall som ikke er så langt unna disse resultatene, selv om disse to er svært forskjellige, 2,5:1 og 4:1. 1,5:1 er det gruppen vil ta hensyn til. Forholdet mellom de alkaliske aktivatorene vil endre bearbeidbarheten og herdetiden (Saeed, et al., 2022).

2.2.4 Herdebetingelser

De optimale herdebetingelsene for FA-basert GPC er herding i ovn i området 40 °C til 100 °C, og 20 timer ble ansett som optimal varighet for herding i ovn (Fadhil, Haruna, Mohammed & Sha'aban, 2017, s. 32). Dette skyldes at geopolymeraktiviteten øker ved høyere temperaturer enn omgivelsestemperaturen. Bindingen mellom pastaen og tilslagene øker, noe som gir en generell økning i styrke og holdbarhet. Mekanisk aktivering og oppløsningshastighet for FA-partiklene og morfologisk transformasjon forbedres når herdetemperaturen øker (Fadhil, Haruna, Mohammed & Sha'aban, 2017, s. 32).

2.2.5 GPCs selvhelbredende egenskaper

Hovedårsaken til at noen betongkonstruksjoner svikter, er korrosjon av armeringsjern (Rodriguez, Ortega & Casal, 1997). En vanlig og viktig årsak til korrosjon av armeringsjern er sprekker i betongen. Etersom betongkonstruksjonens levetid først og fremst avhenger av dens evne til å tette og beskytte armeringsjernene, er denne selvhelbredende egenskapen rudimentær. Sprekker er ikke uvanlig, og de oppstår på grunn av herdevarme, tørkekrymping, plastisk krymping, forringelse og påførte krefter (Maage, 2015, s.

407). Disse gjør at kjemikalier og ioner kan trenge inn i betongen gjennom vannsorpjon og diffusjon. Dette vil destabilisere oksidlaget, og armeringsjernene vil begynne å korrodere. Videre vil dette føre til både redusert tverrsnittsareal på armeringsjernene, samt redusert lastekapasitet og volumutvidelse av armeringsjernene (Maage, 2015, s. 218-227). Dette skyldes at korrosjonsproduktet skaper indre strekkspenninger som fører til sprekker i betongen.

FA type F, som brukt, har vist selvhelbredende egenskaper. Omfanget av selvhelingen avhenger av skadene på betongen (Ross, Genedy, Juenger & van Oort, 2022). FA type F har "autogen" selvhelbredelse, og reparasjonsprosessen skjer på grunn av inkorporeringen av polymerer. Helingsmekanismen settes i gang på grunn av dannelsen av amorfe aluminosilikat-reaksjonsprodukter, samt en kalsittavsetning. Evnen til å lukke sprekker, for å stoppe ytterligere inntrengning, er det som avgjør en god selvhelbredende evne (Ross, Genedy, Juenger & van Oort, 2022). De nevnte fordelaktige egenskapene til FA i GPC kan forlenge konstruksjonens levetid.

2.2.6 GPC i bruk i dag

En av årsakene til den langsomme overgangen til GPC er det farlige miljøet som skapes av de alkaliske aktivatorene. På grunn av at alkali er sterkt kaustisk soda, er løsningene farlige for operatørene som blander GPC, så vel som for støpearbeiderne (National Center for Biotechnology Information, 2023). Når man lager en NaOH- eller KOH-løsning fra pellets med vann, er reaksjonen mellom de to komponentene, dvs. NaOH og H_2O , dessuten svært eksoterm. Den vil nesten nå koketemperaturen til vann (BYJU's Learning, 2023). Dette betyr at håndtering av store mengder av denne væsken, og blanding av den, bør gjøres ekstremt forsiktig og på en streng måte. GPC brukes dessuten i en rekke prosjekter med ulike bruksområder, som for eksempel følgende:

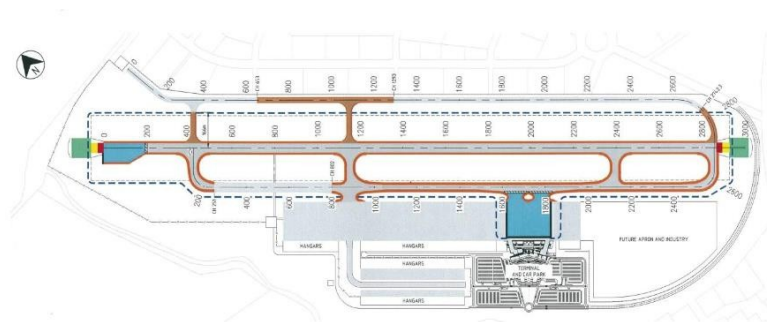
Queensland University GCI (Global Change Institute)

Australierne har forsket på GPC i en lengre periode og har allerede, som de første i verden, tatt i bruk GPC til strukturelle formål - som de prefabrikkerte platene i bygningen til Queensland University Global Change Institute, GCI. Dette er en fireetasjes konstruksjon, der tre av etasjene består av 33 forhåndsstøpte GPC-plater. De ferdigstøpte platene er laget av slagg/FA-basert GPC, kalt Earth Friendly Concrete, EFC, og er designet av Wagners Australia (WAGNERS, u.å.).



Figur 6: 1 av de 33 forhåndsstøpte GPC-panelene (WAGNERS, u.å.)

Brisbane West Wellcamp lufthavn

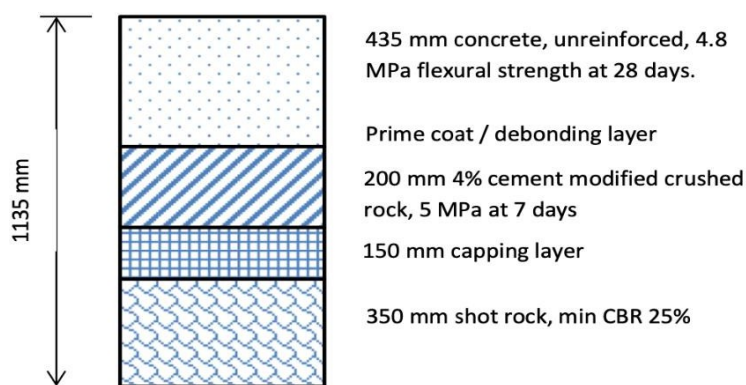


(pavement plan - excerpt from ACG Engineers drawings)

Figur 7: Plan for belegning/ rullebane, BWW lufthavn (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015)

BWW Airport ble fullt operativ med kommersielle flyvninger i 2014. Wagner's Australia leverte ca. 40 000 m³ geopolymertbetong til prosjektet, noe som gjorde det til den største anvendelsen av denne betongklassen i verden på det tidspunktet. EFC var godt egnet for prosjektet på grunn av sin høye bøyestrekkefasthet, lave krymping og gode bearbeidbarhet (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015).

EFC ble levert av Wagners Australia til byggingen av de 435 mm tykke rullebanene for tungtransport, som vist i figur 8 nedenfor, i svingområdene for flyene. Det var tre områder med rullebaner i geopolymert, inkludert snuplassen i nordenden av rullebanen, taksebanen på vestsiden av rullebanen og hangarene på østsiden av rullebanen (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015).



(pavement design by ACG Engineers)

Figur 8: Tverrsnitt for høyfast betongdekke (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015)

Blandingen av GPC som ble brukt i dette prosjektet, ble utviklet i løpet av en periode på 10 år av Wagners for å skape en kommersiell betong som kunne produseres og håndteres på samme måte som konvensjonell betong. Sammendraget av blandingsparametrene for denne GPC-en (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015):

- Totalt alumina-silikatbindemiddel bestående av slagg + FA, 415 kg/m^3 .
- Forholdet mellom vann og bindemiddel: 0,41.
- Nominell maksimal tilslagsstørrelse 40 mm, i samsvar med 28 mm i henhold til AS 2758.1 (3).
- Kjemisk aktivator, 37 kg/m^3 tørrstoffinnhold.
- Egenutviklet vannreducerende tilsetning.

Betongen som ble brukt på BWV Airport, ble produsert i et dobbelt mobilt våtblandeanlegg som ble etablert på prosjektområdet, med en maksimal leveringskapasitet på $120 \text{ m}^3 / \text{t}$, som vist i figur 9 (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015).



Figur 9: Geopolymer twin batch-anlegg (Glasby, Day, Genrich & Aldred, 2015)

2.3 Teori knyttet til metodologi

For å bestemme betongens egenskaper i både fersk og herdet tilstand har gruppen benyttet seg av ulike teorier knyttet til metoden. I dette kapittelet beskrives teorien bak metodene som er brukt.

2.3.1 Utvikling av oppskrift

En betongblanding er proporsjonert ut fra betongens ønskede egenskaper. Hovedregelen er at matrisesammensetningen styrer egenskapene til den herdete betongen, mens tilslagssammensetningen styrer egenskapene til den ferske betongen (Maage, 2015, s. 156).

Dette er en grov regel, noe som betyr at det fortsatt er mulig å justere egenskapene til den ferske betongen ved å endre litt på matriseegenskapene uten samtidig å endre egenskapene til den herdete betongen (Maage, 2015, s. 156).

2.3.2 Aggregert størrelse

Partikkelstørrelsen påvirker i stor grad betongens egenskaper i fersk tilstand, men også i herdet tilstand (Maage, 2015, s. 119). Fraksjonene som brukes i produksjon av ferdigbetong og prefabrikkert betong, deles vanligvis inn i fraksjonene 0-8 mm, 8-16 mm og 16-22 mm i produksjon av ferdigbetong (Maage, 2015, s. 130). Fint tilslag har egenskapen til en "filler-effekt" som fyller hulrom med materiale i stedet for luft. Dette gir noe mindre bearbeidbarhet, men øker stabiliteten samtidig som det reduserer blødningen, øker trykkfastheten og forbedrer komprimeringsgraden (Diagne, Ibrahima & Gueye, 2021).

For å oppnå høy trykkfasthet foreslår Neville og Aïtcin fraksjoner i størrelsen 10-14 mm for høytytelsesbetong, HPC (Neville & Aïtcin, 1998). For HPC er det viktig at tilslagsstørrelsen velges med omhu. Årsaken til at mindre fraksjoner er fordelaktige, skyldes to parametere. For det første vil differensialspenningene i grensesnittet mellom tilslag og sementpasta sannsynligvis føre til mikrosprekker, og dette kan forhindres med mindre fraksjoner. For det andre, på grunn av findelingen av bergarter, reduseres også store feil, noe som fører til at mindre tilslag er sterkere enn større (Neville & Aïtcin, 1998).

Kantete tilslag har også fordeler i forhold til runde tilslag, ettersom kantete tilslag har

høyere trykkfasthet på grunn av bedre sammenlåsing mellom de kantete tilslagene (Nitka & Tejchman, 2020). På grunn av anbefalingen fra

maksimalt 10-14 mm (Neville & Aïtcin, 1998), ble det valgt en 25 % reduksjon av 8-16 mm til 0-8 mm fraksjoner, i stedet for forholdet mellom den opprinnelige 50-50-fordelingen.

2.3.3 Blanding og herding av betong

Små endringer i sammensetningen av betongblandingen kan gi betydelige forskjeller i bearbeidbarhet og styrkeegenskaper. Derfor brukes prøveblandinger, og blandingen justeres i henhold til ønskede egenskaper (Maage, 2015, s. 165).

Standard herding av betong er vannlagring ved 20 °C (Heidelberg Materials). Høyere temperaturer, over 40 °C, fører til rask hydratasjon og dermed rask styrkeutvikling og vice versa. Høye herdetemperaturer kan derimot føre til lavere sluttstyrke og kan forårsake oppsprekking (Maage, 2015, s. 323-324).

2.4 Teori knyttet til testprosedyren.

For å bestemme betongens egenskaper i både fersk og herdet tilstand har gruppen benyttet seg av ulike teorier knyttet til testprosedyren. I dette kapittelet vil vi beskrive teorien bak testprosedyren vi har brukt.

2.4.1 Vanninnhold i tilslaget

Vanninnholdet i tilslag kontrolleres for å måle den totale mengden fritt vann som finnes i en tilslagsprøve. Vannet kan komme fra overflaten av tilslaget og fra vann som er tilgjengelig i porene i tilslagspartiklene (Pavement Interactive, u.å.).

2.4.2 Partikkelstørrelsesfordeling i tilslaget

Partikkelstørrelsesfordelingen er et mål på vektprosenten av ulike partikkelstørrelser i granulat og tilslagsmaterialer. Partikkelstørrelsesfordelingen er viktig for å bestemme betongens tekniske egenskaper og uttrykkes i form av en siktekurve (Thue, 2019).

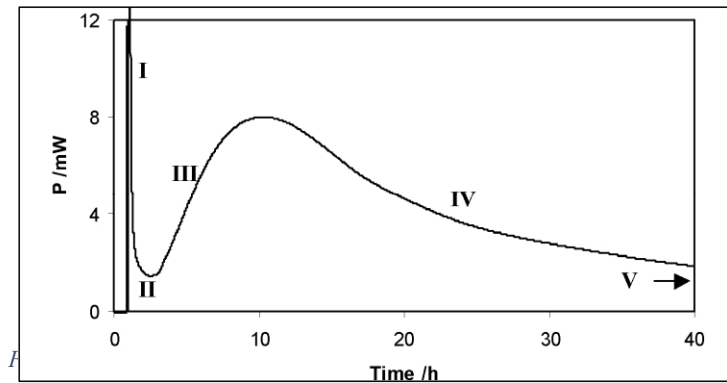
2.4.3 Spesifikk varmekapasitet

Spesifikk varmekapasitet, c , angir hvor mye energi som kreves for å varme opp 1 kg materiale med 1 K. Den angir også på samme måte hvor mye varme som frigjøres når materialet avkjøles. Spesifikk varmekapasitet uttrykkes i J/(kgK) (CBI Norge, u.å.).

2.4.4 Isotermisk ledningskalorimetri

Ved bruk av isotermisk konduksjonskalorimeter måles hydratiseringsvarmen til sementholdige materialer direkte ved å overvåke varmestrømmen fra prøven når både prøven og omgivelsene er tilnærmet isoterme. Isotermisk kalorimetri er en god måte å følge og dokumentere alle stadier av hydratiseringsprosessen på (Wadsö, 2005):

- I. Rask innledende prosess
- II. Hvileperiode
- III. Akselerasjonsperiode
- IV. Retardasjonsperiode
- V. Reaksjoner på lang sikt

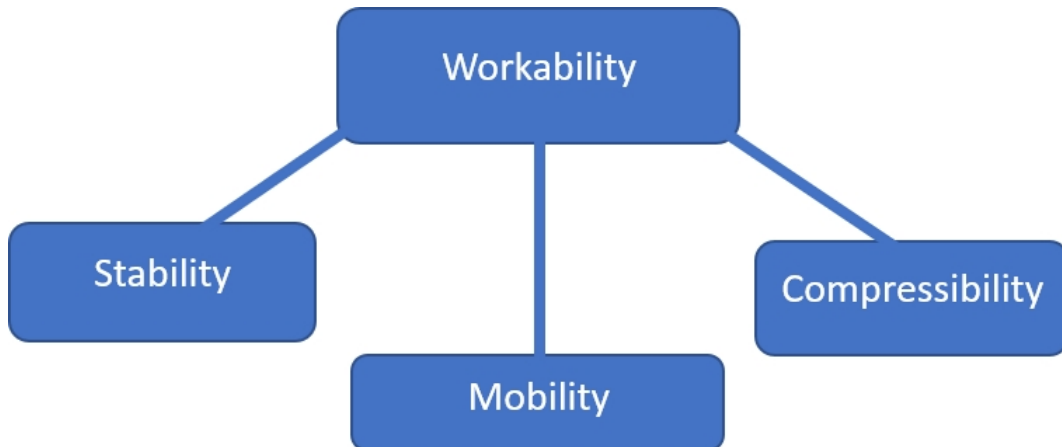


2.4.5 Innledende og endelig herdetid - VICAT

Overgangen der mørtelen går fra å være et flytende/plastisk materiale til å bli et fast stoff, kalles herdetid. Etter herding blir massen stiv, mens styrkeutviklingen ennå ikke har kommet skikkelig i gang. Avbindingstiden for betong bestemmes i henhold til *NS-EN 480-2* som den alderen betongen har nådd en penetrasjonsmotstand på 3,5 MPa fra et stempel, men den kan også bestemmes ut fra varmeutviklingskurven (Meyer, 2021).

2.4.6 Bearbeidbarhet

I betongterminologien er begrepet bearbeidbarhet delt inn i tre grener: stabilitet, mobilitet og kompressibilitet. Felles for dem er at de kvalitativt og delvis kvantitativt beskriver oppførselen til fersk betong (Maage, 2015, s. 181).



Figur 11: Arbeidsevne (Maage, 2015, s. 181)

En vanlig metode for å klassifisere betongens bearbeidbarhet er ved hjelp av setningstester. Bruksområdet for denne metoden strekker seg fra svært stiv til svært flytende betong.

Table 3 — Slump classes

Class	Slump tested in accordance with EN 12350-2 mm
S1	10 to 40
S2	50 to 90
S3	100 to 150
S4	160 to 210
S5 ^a	≥ 220

^a See Note 1 to 5.4.1.

Tabell 4: Setningsklasser (Standard Norge, 2004)

Tabell 3 Setningsklasser fra NS-EN 206:2013+A2+NA er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller innestår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

Når setningen er høyere enn 250 mm, gir ytterligere forskjeller ubetydelige variasjoner i betongens bearbeidbarhetsegenskaper.

For betong med en setning høyere enn 250 mm er det naturlig å bruke spredningsmålinger (Maage, 2015, s. 187). Ved hjelp av spredningsmålingene kan betongens konsistensklasse klassifiseres.

Table 6 — Slump-flow classes

Class	Slump-flow ^a tested in accordance with EN 12350-8 mm
SF1	550 to 650
SF2	660 to 750
SF3	760 to 850
^a The classification is not applicable to concrete with D_{\max} exceeding 40 mm.	

Tabell 5: Klasser for fall- og flyteevne (Standard Norge, 2013, s. 28)

Tabell 6 Flyteklasser fra NS-EN 206:2013+A2+NA er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller innestår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

Det er også naturlig å utføre en test av strømningsdiameter for å klassifisere strømningsklasse. Dette gjøres i henhold til testmetode NS-EN 12350-5.

Table 5 — Flow classes

Class	Flow diameter tested in accordance with EN 12350-5 mm
F1 ^a	≤ 340
F2	350 to 410
F3	420 to 480
F4	490 to 550
F5	560 to 620
F6 ^a	≥ 630
^a See Note 1 to 5.4.1.	

Tabell 6: Flytklasser (Standard Norge, 2013, s. 27)

Tabell 5 Flyteklasser fra NS-EN 206:2013+A2+NA er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller innestår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

2.4.7 Innhold av luft

Betong er et porøst materiale som inneholder 120-180 l/m³ porer i betongen. En stor del av disse porene, spesielt på overflaten, blir fylt med vann når betongen utsettes for fritt vann i kortere eller lengre perioder. Når vannet i disse porene fryser, utvider isen seg, noe som kan skade betongen (Maage, 2015, s. 227). I dag kontrolleres mengden luftinnhold i betongen ved hjelp av en standardprosedyre, som er forklart i kapittel 4.2.7 Luftinnhold.

2.4.8 Tetthet

Tetthet, eller massetetthet, uttrykkes i kg/m³ og er forholdet mellom massen til en gitt betongprøve og dens volum.

2.4.9 Trykkfasthet

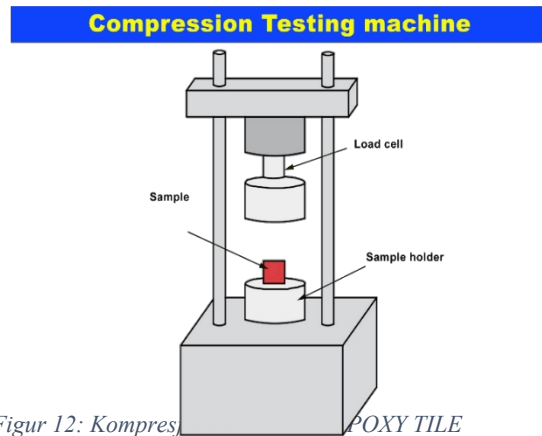
Shape of Test Specimen	Size in mm	Modification Factor
Cube	100 x 100 x 100	0.8
	150 x 150 x 150	0.8
	200 x 200 x 200	0.83
Cylinder	150Φ x 300	1.0
	100Φ x 200	0.97
	200Φ x 500	1.05
Square Prism	150 x 150 x 450	1.05
	200 x 200 x 600	1.05

Tabell 7: Modifikasjonsfaktorer for omregning av betongprøvers styrke (Building Research Institute, u.å.)

Trykkfasthet defineres som gjennomsnittsverdien av den maksimale belastningen på flere standardiserte prøvelegemer som er belastet til brudd. Den maksimale belastningen omregnes til nominell spenning (Maage, 2015, s. 195).

EN 206 /4/ definerer betongens trykkfasthet i fasthetsklasser med betegnelsen B og et tosifret tall,

for eksempel B25, som representerer det karakteristiske styrkemålet på sylindere etter standard herding i 28 døgn (Maage, 2015, s. 195). Det betyr at betongen tildeles en fasthetsklasse avhengig av kravene til karakteristisk sylindrefasthet, f_{ck} , selv om karakteristisk kubikkfasthet, $f_{ck,cube}$, er høyere. Modifikasjonsfaktorer vist i tabell 7 kan brukes når testing av kubestyrke for å presentere den karakteristiske sylindrestyrken.



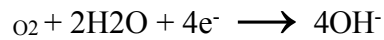
Figur 12: Kompresjonstest av betong (Maage, 2015, s. 195). (POXY TILE FLOORING, 2021)

2.4.10 Kloridinntrengning

Når nok klorider treffer armeringsstålet, ødelegges det passiverende oksidlaget, og korrosjon kan oppstå selv om pH-verdien er høy. Denne typen korrosjon har ofte en raskere progresjon enn når prosessen er initiert av karbonatisering (Maage, 2015, s. 42). Korrosjon som følge av kloridinntrengning anses som "farligere" enn karbonatisering, ettersom utviklingen skjer i mer avgrensede områder på ståloverflaten der oksidlaget ødelegges. Dette fører til en raskere nedbrytning av stålet, noe som kan sammenlignes med "kutting" av armeringen, kalt "pitting" (Maage, 2015, s. 224).

Grenseverdien for hvor mye klorider som er tilstrekkelig til å utløse korrosjon, er ikke et definert område, men bestemmes av faktorer som betongens pH-nivå, porestruktur, porøsitet, fuktighet osv. (Maage, 2015, s. 221). Det finnes både frie og bundne klorider i betong. De frie kloridene er oppløst i porevannet, mens noen vil være kjemisk eller fysisk bundet til reaksjonsprodukter. Det er bare de frie kloridene som skaper problemer med hensyn til korrosjon. Forholdet mellom frie og bundne klorider er ikke vesentlig avhengig av masseforholdet eller fuktighetsnivået, men snarere av sementtypen, mengden SF og pH-nivået i betongen.

Den katodiske prosessen, korrosjonens "motor" (Maage, 2015, s. 223):



Anodeprosessen, stål korroderer (Maage, 2015, s. 223):

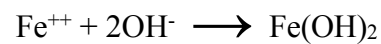


Korrosjonsprosessen foregår på følgende måte:

1. Under initieringsprosessen oppstår det ingen korrosjon, og det er ingen tegn til nedbrytning.
2. Etter initieringsprosessen er det uforutsigbart når korrosjonsskadene blir synlige.

Anodeprosessen, som er beskrevet kjemisk ovenfor, er en reaksjon på stålet der jernet går i oppløsning. Elektronene beveger seg fra et sted i stålet til et annet sted, der det er nok O og H₂O til å starte katodeprosessen. Jo større forholdet mellom katode og anode er, desto raskere går korrosjonsprosessen (Maage, 2015, s. 223).

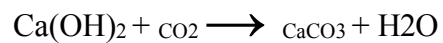
Korrosjonsprosess, eller "rust" (Maage, 2015, s. 224):



2.4.11 Karbonatisering

Betong er i prinsippet et svært alkalisk byggemateriale med en pH-verdi på rundt 13,5 - 14,0 (Maage, 2015, s. 219). Dette skyldes reaksjonsproduktet $\text{Ca}(\text{OH})_2$, som dannes under herdeprosessen av betong, samt små mengder alkaliske forbindelser som Na_2O og K_2O . Kombinasjonen av disse komponentene fører til ionedannelse i porevannet, og det dannes et oksidlag på overflaten av armeringsstålet - korrosjon kan ikke forekomme (Maage, 2015, s. 219).

Når CO_2 trenger inn i betongen og reagerer kjemisk med de nevnte komponentene, oppstår karbonatiseringsprosessen (Maage, 2015, s. 219):



I karbonatisert betong vil pH-verdien reduseres til ca. 8,3, og armeringsstålet er ikke lenger beskyttet av oksidfilmen. Denne prosessen avhenger av den relative luftfuktigheten og stopper helt opp ved under ca. 50 % luftfuktighet, ettersom det ikke er nok vann i porene i betongen til at den kjemiske reaksjonen kan finne sted (Maage, 2015, s. 219).

2.5 Holdbarhet og forsterkning

⁽¹⁾ Holdbarhet beskriver en konstruksjons evne til å oppnå den tiltenkte levetiden og oppfylle kravene til brukbarhet, styrke og stabilitet, uten vesentlig reduksjon av nytteverdien eller behov for omfattende uforutsett vedlikehold (Standard Norge, 2004, s. 45).

Kapittel 4 - 4.1 Generelt (1) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller inntestår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

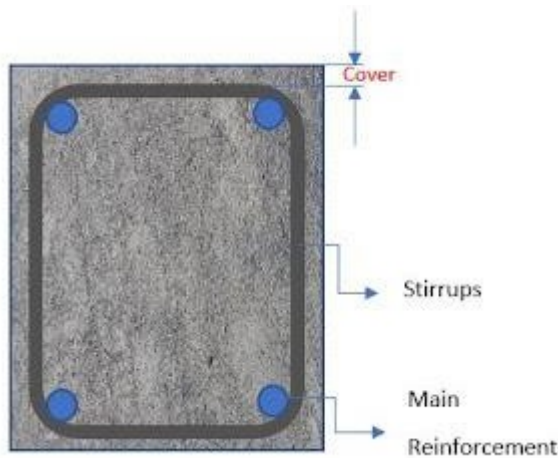
⁽¹⁻²⁾ For å oppnå den dimensjonerende levetiden bør det tas hensyn til design, materialvalg, konstruksjonsdetaljer, utførelse, kvalitetskontroll, inspeksjon og dokumentasjon i prosjekteringsfasen (Standard Norge, 2004, s. 47).

Kapittel 4 - 4.3 Krav til bestandighet (1) og (2) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller innteståelser for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no.

Betongkonstruksjoner er vanligvis holdbare og vil vanligvis tjene sin funksjon i en lengre periode enn det som er beregnet, forutsatt at de er riktig utformet og konstruert. Det er imidlertid observert ulike former for forringelse. Årsakene til forringelse er relativt godt kjent (Maage, 2015, s. 217).

Når man ser på de ulike typene skader på betongkonstruksjoner både i Norge og i de fleste andre land i dag, ser man raskt at skadene i stor grad er knyttet til armeringskorrosjon. For å forhindre at korrosjon starter, er betongoverdekningen avgjørende (Maage, 2015, s. 217-226).

2.5.1 Betongdekke



Figur 13: Tverrsnitt av en armert søyle (Anre, 2020)

(1-2) For å oppnå den tiltenkte levetiden til en betongkonstruksjon må det iverksettes tiltak for å beskytte de ulike komponentene i konstruksjonen mot relevante miljøfaktorer (Standard Norge, 2004, s. 47).

Kapittel 4 - 4.3 Krav til bestandighet (1) og (2) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymerbetong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller inneståelser for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

(1) Betongoverdekningen er avstanden mellom overflaten på de ytterste armeringsjernene og den nærmeste overflaten på betongen (Standard Norge, 2004, s. 47).

(2) Ved dimensjonering av betongkonstruksjoner i henhold til NS-EN 1992-1-1 er nominell overdekning, C_{nom} , definert som en minimum overdekning, C_{min} , pluss et avvik ΔC_{dev} som skal tas hensyn til i prosjekteringen (Standard Norge, 2004, s. 47).

Kapittel 4 - 4.4.1.1 Generelt (1) og (2) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller innestår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

(1-2) Minste betongoverdekning, C_{min} , skal sikre sikker overføring av krefter gjennom adhesjon, beskyttelse av stål mot korrosjon og tilfredsstillende brannmotstand (Standard Norge, 2004, s. 48).

Kapittel 4 - 4.4.1.2 Minste overdekning C_{min} (1) og (2) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller innestår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

(1) For å oppnå nominell dekning gjøres det et tillegg til minimumsdekningen ved å øke minimumsdekningen med absoluttverdien av det tillatte negative avviket, ΔC_{dev} (Standard Norge, 2004, s. 51).

Kapittel 4 - 4.4.1.3 Tillatte avvik, hensyn ved prosjekteringen (1) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller inntår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

(2) Nominell overdekning for armering (Standard Norge, 2004, s. 47):

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

Hvor?

C_{min} - Minste overdekning, mm

ΔC_{dev} - Tillatt avvik, mm C_{nom} -

Nominell overdekning, mm

Kapittel 4 - 4.4.1.1 Generelt (1) og (2) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller inntår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

2.5.2 Minimum forsterkning

(3) Minste armeringsareal, A_s , min, er spesifisert for å forhindre sprøbrudd, store sprekker og for å ta opp krefter som oppstår fra påførte påvirkninger (Standard Norge, 2004, s. 151).

Kapittel 9 - 9.1 Generelt (3) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller inntår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

(1) Ved armering av betong i bygningskonstruksjoner brukes tverrsnittet (Standard Norge, 2004, s. 151):

$$A_{s, \min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d \geq 0,0013 \cdot b_t \cdot d$$

Hvor?

f_{ctm} - Gjennomsnittlig verdi av betongens aksiale

strekkfasthet f_{yk} - Karakteristisk flytegrense for

armering b_t - Gjennomsnittlig bredde på

strekksonen

d - Effektiv tykkelse på tverrsnittet, avstand fra midtlinjen av strekkarmeringen til kompresjonskanten.

Kapittel 9 - 9.2.1.1 Minste og største armeringsareal (1) fra NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller inntår for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

2.6 BIM, bygningsinformasjonsmodellering

Bygningsinformasjonsmodellering, BIM, er en digital prosess som brukes i byggebransjen og ingeniørbransjen. En BIM-modell er en nøyaktig og detaljert modell av en bygning eller infrastruktur. BIM-modeller kan inneholde all relevant informasjon for et byggeprosjekt, inkludert dimensjoner, materialer, funksjoner og plassering. BIM-modeller kan også inneholde informasjon om energiforbruk, kostnader, byggetid, drift og vedlikehold (Autodesk, u.å.).

2.6.1 Brukere av BIM

Alle yrkesgrupper som er involvert i et byggeprosjekt, kan bruke BIM. De typiske brukerne er arkitekter, ingeniører, entreprenører og byggherrer. BIM gjør det mulig å effektivisere samarbeidet og kan bidra til et mer nøyaktig prosjekt og et bedre sluttprodukt. Arkitekter tegner, ingeniører kalkulerer, interiørarkitekter visualiserer rom og innredning, entreprenører utfører mengdeberegninger, planlegger logistikk og gjennomfører prosjektet som planlagt, mens byggherrer bruker BIM for å ha oversikt og kontroll gjennom hele byggefasen (Nordic BIM Group, u.å.).

2.6.2 BIM-standard

NS-EN ISO 19650 er en internasjonal standard og gir en beskrivelse av prinsippene for informasjonshåndtering ved bruk av BIM. Det er et rammeverk for administrasjon og informasjonsutveksling, inkludert versjonskontroll og organisering, for alle interessenter som er involvert i et byggeprosjekt (Standard Norge, 2022).

2.6.3 Revit

Revit er en BIM-programvare som brukes av arkitekter og ingeniører til å skape bygninger og infrastruktur av høy kvalitet. Revit har flere ulike bruksområder, men det kan brukes til å modellere former, strukturer og systemer i 3D med parametriske nøyaktighet, presisjon og enkelhet (Autodesk, u.å.).

2.6.4 Fordeler

Noen av fordelene ved å bruke BIM-modeller i byggebransjen er (McKenna Group, u.å.):

- Bedre kommunikasjon og samarbeid.
- Visualisering av resultatet i designfasen.
- Konflikter mellom fagområder oppdages mer effektivt og enklere.
- Kan minimere helse- og sikkerhetshendelser. Ved å flagge høyrisikoområder og byggefaser.
- Bedre og mer pålitelig budsjettkontroll.
- Grønnere konstruksjoner gjennom mer nøyaktig materialkontroll.

2.7 LCA

Livsløpsvurdering, LCA, er en systematisk metode for å vurdere miljø- og ressurspåvirkning gjennom hele livsløpet til et produkt eller system. LCA brukes også som grunnlag for å utvikle miljødeklarasjoner, EPD-er (LCA Norge, u.å.).

LCA deles inn i to hovedkategorier: "Vugge-til-grav" og "Vugge-til-vugge", der sistnevnte er å foretrekke. LCA-metodikken undersøker alle faser som er involvert i et produkt, fra råvareutvinning, transport, bruksfase til avhending eller resirkulering (LCA Norge, u.å.).



Figur 14: Produktets livssyklusfaser (Livsløpsvurdering, 2020)

En EPD beskriver miljøpåvirkningen fra et produkt eller system, og dokumenteres i en

kortfattet rapport. EPD-er skal gi et bedre grunnlag for å vurdere miljøpåvirkning, fremme miljøutvikling og være et viktig verktøy for innovativ produktutvikling. De skal være offentlig tilgjengelige, godkjent av en tredjepart, sammenlignbare og additive for bruk i større prosjekter (LCA Norge, u.å.).

2.7.1 Brukere av LCA

LCA kan brukes i byggebransjen for å gjøre rede for miljøpåvirkningen fra ulike designvalg eller tekniske alternativer, og for å sammenligne miljøpåvirkningen fra disse. Dette gjøres for å finne de mest miljøvennlige løsningene underveis i et prosjekt eller for å dokumentere eventuelle miljøkonsekvenser ved levering av sluttproduktet (Multiconsult, u.å.).

2.7.2 LCA-standard

Rammeverket og standarden som brukes for å gjennomføre en fullstendig LCA, er *NS-EN ISO 14040*, og metodikken for selve analysen er hovedsakelig delt inn i fire komponenter:

- Inventar - beregning av utslipp
 - Klassifisering - kategorisering av utslipp
 - Karakterisering - beregning av miljøkonsekvenser
 - Forbedring - analyse av hvordan produktets livssyklus kan forbedres
- forbedret/optimalisert (LCA Norge, u.å.).

Den europeiske standarden for utvikling av EPD-er for bygg og anlegg, *NS-EN 15804*, definerer hvordan et selskap skal utarbeide miljødeklarasjoner. Standarden gir klare retningslinjer for hvordan bedrifter i byggebransjen skal utføre LCA i EPD-er. Standarden sikrer at alle produktgrupper bruker de samme LCA-metodene for å sammenligne EPD-er (LCA Norge, u.å.).

Produktkategoriregler, PCR, er utviklet som et tillegg til *NS-EN 15804* og inneholder tilleggsregler og betingelser for spesifikke produktkategorier. Hovedprinsippet med en PCR er å bestemme hvilke prosesser og materialer analysen skal omfatte, og hva som skal defineres som deklart enhet for produktet. Dette gjøres for at produsentene skal opplyse om innholdet av stoffer med betydelig miljøpåvirkning i relevante produkter - for å gjøre det enklere å sammenligne miljøfotavtrykket til flere produkter innenfor samme kategori (LCA Norge, u.å.).

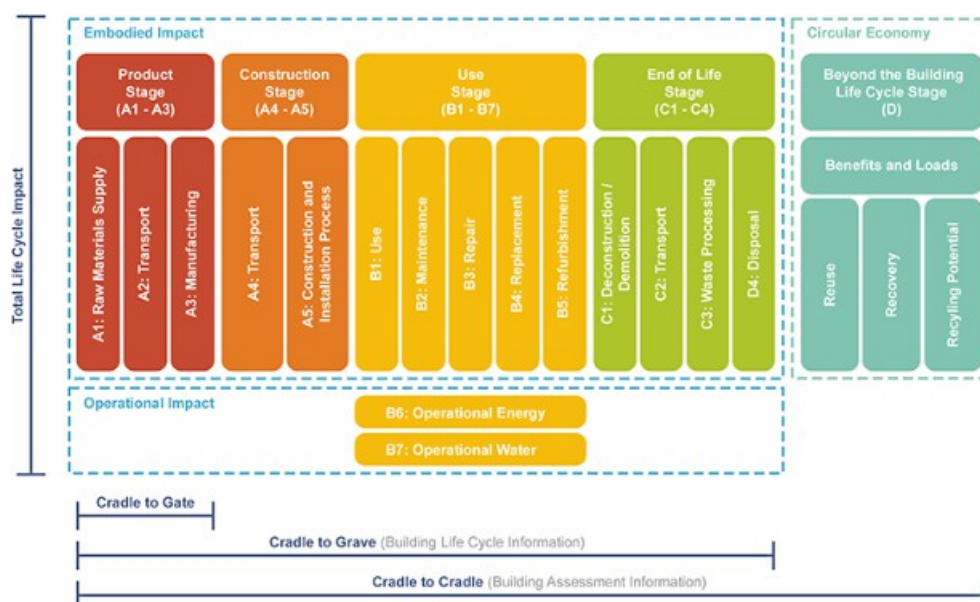
2.7.3 SimaPro

SimaPro er et innovativt programvareverktøy som brukes til å utføre LCA for produkter og tjenester. SimaPro er en av de ledende LCA-programvareløsningene i verden og brukes av bedrifter, konsulenter og universiteter i over 80 land (SimaPro, u.å.). Programmet har et stort bibliotek med data og vitenskapsbasert informasjon som er nødvendig for å samle inn, analysere og overvåke bærekraftsdata for produkter og tjenester. Dette gjør det enkelt å modellere livssykluser på en systematisk måte, samtidig som det er mulig å redigere og tilpasse de ulike produktene som allerede finnes i databasen.

Programvaren inneholder et bredt spekter av funksjoner som hjelper brukerne med å identifisere og estimere miljøpåvirkningen av et produkt, fra råvareutvinning til avfallshåndtering. Dette gjør det til et nyttig verktøy i bygg- og anleggsbransjen, ettersom det kan hjelpe bedrifter med å forstå og forbedre sin bærekraftige utvikling (SimaPro, u.å.).

2.7.4 Fordeler

Ved bruk av LCA i de tidlige stadiene av konseptutviklingen for systemer eller produkter kan man vurdere miljøkonsekvensene av ulike alternativer. Dette gir en systematisk måte å dokumentere og identifisere de mest miljøvennlige og kostnadseffektive løsningene for det gitte konseptet. Nedenfor illustreres prinsippet for en LCA.



Figur 15: Prinsipp for oppbygging av LCA (BNP Media, 2021)

2.7.5 GWP - potensial for global oppvarming

Ved gjennomføring av LCA-studien i SimaPro brukes verdien for GWP100. Dette refererer til den akkumulerte oppvarmingseffekten i forhold til CO₂-utslipp over en periode på 100 år.

GWP deles vanligvis inn i fire ulike indikatorer:

GWP Total: summen av fossile, biogene og landbaserte utslipp.

GWP Fossil: GWP-indikatoren for fossilt tar hensyn til GWP for klimagassutslipp og -binding i alle medier som følge av oksidasjon eller reduksjon av fossilt brensel eller

fossile karbonholdige stoffer. Det omfatter også binding eller utslipp av klimagasser fra uorganiske materialer, for eksempel karbonatisering av sement.

GWP Biogen: Kort fortalt refererer dette til CO_2 som er lagret i materialet/produktet, og angir mengden CO_2 som er absorbert fra atmosfæren under veksten av biomasse og biogene utslipp til luft gjennom oksidasjon eller nedbrytning av biomassen, for eksempel ved forbrenning av biomasse.

GWP Landtransformasjon: Dette er indikatoren for klimagassutslipp og -binding av CO_2 , karbonmonoksid (CO) og karbontetrahydrid (CH_4) som oppstår som følge av endringer i spesifiserte karbonlagre som følge av arealbruk og arealbruksendringer.

(LCA, u.å.)

3 Rammeverk

Følgende håndbøker og standarder har blitt brukt i arbeidet med denne avhandlingen:

Standarder	Beskrivelse
HB R210 (Vegdirektoratet, 2014)	Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser består av metodebeskrivelser for laboratorieanalyser som utføres i Statens vegvesen. HB R210 er basert på gjeldende standarder.
NS-EN 206 (Standard Norge, 2013)	NS-EN 206 spesifiserer krav til sammensetning av betong og regler for verifisering av forventede egenskaper.
NS-EN 1992-1-1, EC 2 (Standard Norge, 2004)	Eurokode 2 danner grunnlaget for prosjektering av betongkonstruksjoner, og stiller krav til kapasitet, brukbarhet, bestandighet og brannmotstand.
NS-EN ISO 14040 (Standard Norge, 2006)	NS-EN ISO 14040 beskriver prinsippene og rammeverket for livssyklusvurdering (LCA), formålet og omfanget.
NS-EN 12350 (Standard Norge, 2019)	Testing av egenskapene til fersk betong
ASTM C 1679 - 09 (Standard Norge, 2022)	Måling av hydratiseringskinetikken til hydrauliske sementblandinger ved hjelp av isotermisk kalorimetri

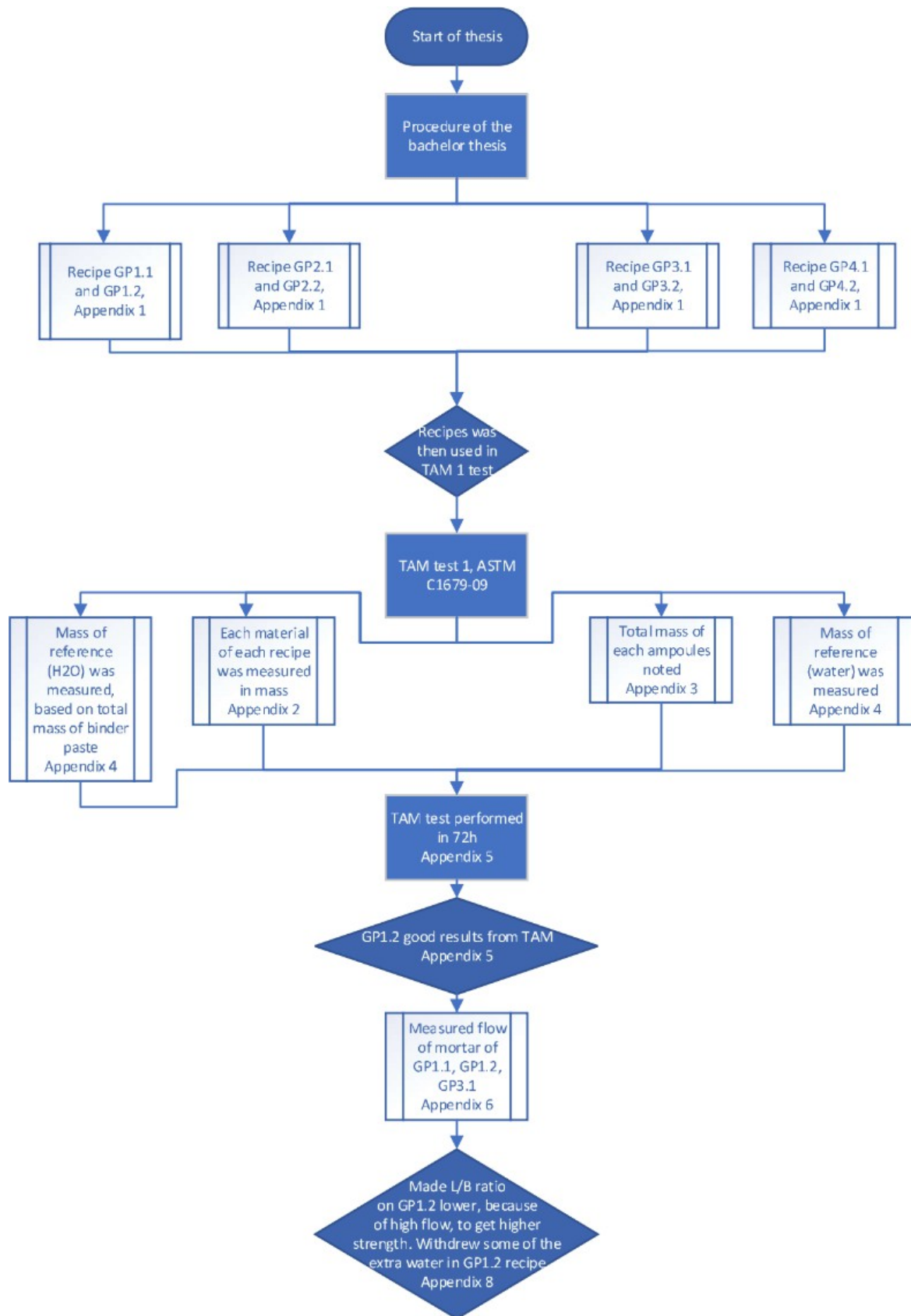
<p>NS-EN 196-3:2016 (Standard Norge, 2016)</p>	<p>Prøvningsmetoder for sement - Del 3: Bestemmelse av herdetid og soliditet</p>
<p>NT Build 492 (Nordtest, 1999)</p>	<p>Betong, mørtel og sementbaserte reparasjonsmaterialer: Kloridmigrasjonskoeffisient fra ikke-stasjonære migrasjonseksperimenter</p>

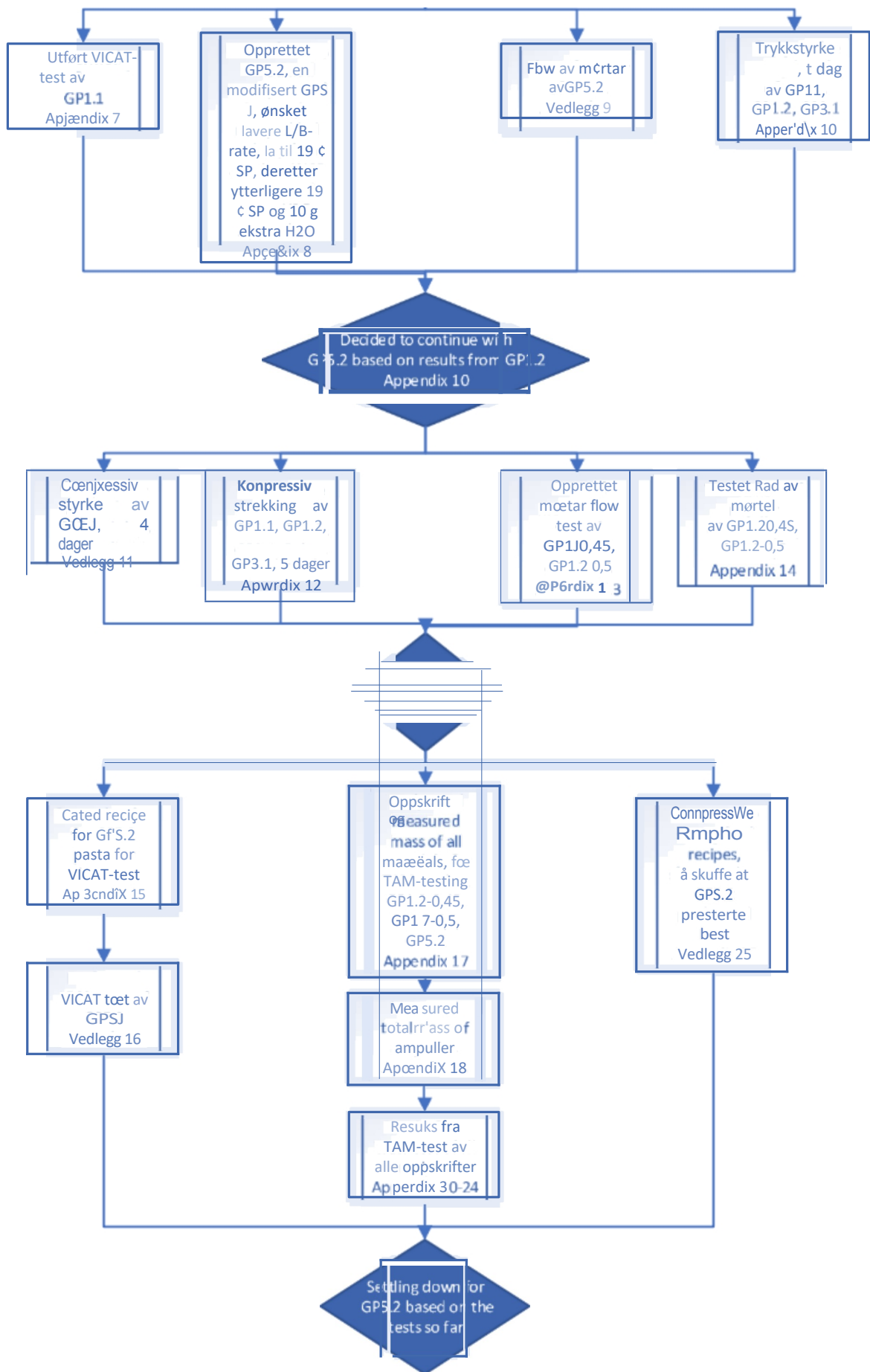
Tabell 8: Brukte standarder

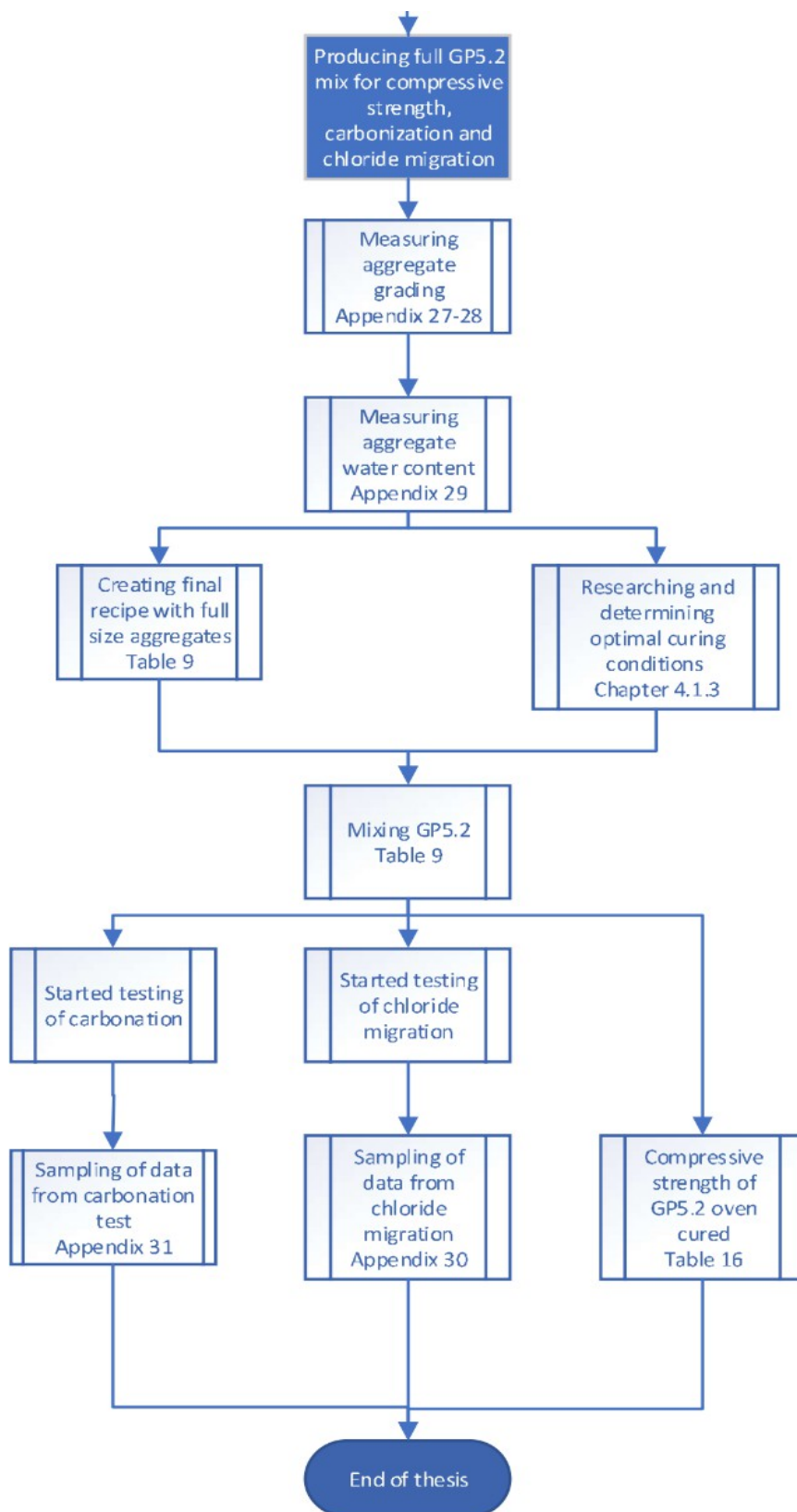
4 Metode

For å få resultater som er sammenlignbare og reproducerbare, har gruppen brukt standardiserte tester og metoder som er basert på offisielle internasjonale standarder. Disse vil vise kvaliteten og egenskapene til GPC-oppskriften som gruppen har utviklet. I dette kapitlet beskrives metodene og prosedyrene som er brukt, og det legges ved bilder av selve testprosedyrene. Flytdiagrammet nedenfor illustrerer prosessen med å utvikle den endelige oppskriften og utvinning av resultatene:

Flytskjema for utvikling av oppskrifter







Figur 16: Flytskjema over utviklingen av GPC

4.1 Utvikling av oppskrift

Det er langt mellom tilgjengelige standarder for oppskrifter på geopolymertbetong. Rådgiveren i denne gruppen hadde en ferdig oppskrift, blandet mellom to eksisterende oppskrifter, som kunne testes med forskjellige molariteter av alkaliløsningene, samt bearbeidbarhet av blandingsdesignene, og deretter til slutt styrke.

I løpet av en måneds tid arbeidet gruppen med å utvikle en geopolymeroppskrift. Denne prosessen resulterte i 11 ulike oppskrifter som gruppen brukte til videre eksperimenter. Gruppen brukte resultatene fra de kalorimetriske testene til å eliminere 8 av de 11 oppskriftene. Av de tre gjenværende reseptene ble det klart for gruppen at den betongresepten som hadde høyest tidlig trykkfasthet og best bearbeidbarhet, var den som prosjektet vil fokusere på, GP5.2.

GP5.2, L/GB = 0,55				
Material	Recipe weight	Actual weight, batch 1	Actual weight, Batch 2	$\frac{kg}{m^3}$
FA	5,472kg	5,472kg	5,472kg	243,2kg
GGBFS	3,648kg	3,646kg	3,648kg	162,1kg
Na ₂ SiO ₃	2,736kg	2,736kg	2,736kg	121,6kg
KOH	1,824kg	1,824kg	1,824kg	81,1kg
Free water	0,3045kg	0,3045kg	0,3045kg	13,5kg
SP	0,177kg	0,177kg	0,177kg	7,9kg
Aggregate 0/8	21,703kg	21,702kg	21,702kg	964,5kg
Aggregate 8/16	17,001kg	17,002kg	17,002kg	755,7kg
L/GB ratio	$\frac{121,6 + 81,1 + 13,5 + 7,9[kg]}{243,2 + 162,1[kg]} = 0,55$			

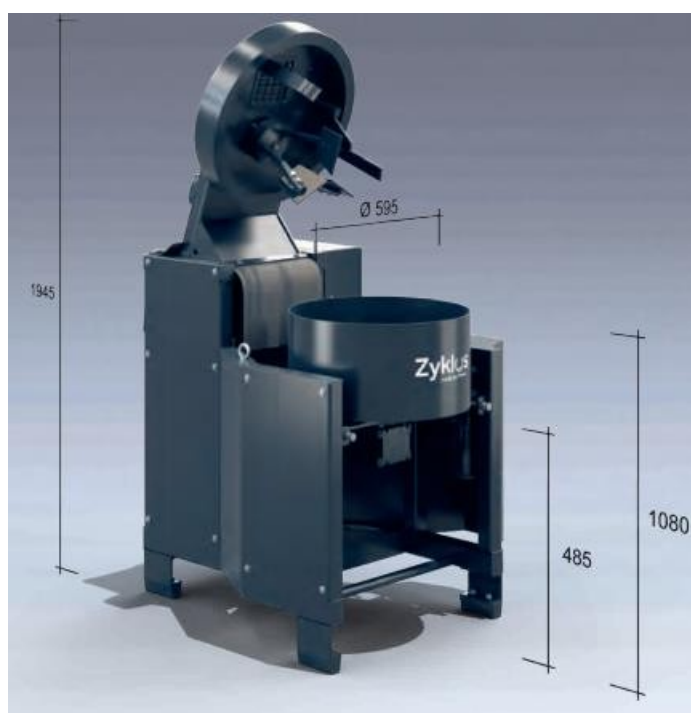
Tabell 9: Oppskrift og faktisk vekt på GP5.2

4.1.2 Aggregert størrelse

Gruppen eliminerte fraksjonen 16-22 mm og nøyde seg med 0-8 mm og 8-16 mm, som angitt i teorien, 2.3.2 Aggregatstørrelse. Ettersom en av standardfraksjonene er 8-16 mm, valgte gruppen denne i stedet for å lage en egen fraksjonsserie. Reduksjonen på 25 % fra 8-16 mm til 0-8 mm ble også valgt for å komme nærmere den foreslåtte tilslagsstørrelsen på 10-14 mm.

4.1.3 Blanding og herding av betong

Under produksjonen av betong valgte gruppen å følge fremgangsmåten beskrevet i *HB R210 411, "Produsering av betong i laboratorium"*. Det ble benyttet en tvangsblander av typen (ZK 50 HE), og gruppen valgte å dele den ønskede blandingen i to batcher. Disse batchene ble blandet på samme dag, og avvikene antas å være små. Etter blanding ble batchtemperaturen målt, og følgende tester, 4.2 Testprosedyrer, og støping av prøveemner ble utført.



Figur 17: Betongtvangsblander av typen ZK 50 HE (Pemat)

Støping av prøvestykker ble utført i henhold til *HB R210 416, "Støping av Prøvestykker"*, med et lite avvik. Som tidligere nevnt er de optimale herdebetingelsene for GPC mellom 40-100 °C i 20 timer. Gruppen valgte derfor å fravike lagring med plast i 16 timer og i stedet utsette den ferske betongen for 80 °C og 20 timer, og deretter i omgivelsesbetingelser ved 20 °C i et strengt temperaturkontrollert rom. Ved utstøping

den ønskede GP5.2-blandingen, ble det støpt totalt 4 kuber for karbonatiseringstesting, 4 sylindere for testing av kloridinntrengning og 12 kuber for testing av trykkfasthet etter 1, 7 og 28 dager, hvorav halvparten ble herdet i ovn og resten ved romtemperatur, 20 °C. Etter 24 timer ble kubene avstøpt, og prøvene ble forseglet i en lufttett beholder.

4.2 Testprosedyrer

Følgende tester er valgt for å bestemme oppførselen til GPC i fersk og herdet tilstand. Det må påpekes at det er begrenset med tid til å utføre alle testene som er nødvendige for å kunne si noe sikkert om ytelsen til det endelige betongproduktet.

4.2.1 Vanninnhold i tilslaget

Ved bestemmelse av *vanninnholdet i tilslagene* følger gruppen *HB R210, 121 "Vanninnhold i tilslag"*.

Dette gjøres ved å måle opp en skål med fuktig tilslag som skal testes, etter at en viss minimumsmengde som vist i tabell 10 er veid.

Øvre kornstørrelse (D) (mm)	Minimum antall prøver (kg)
< 1	0,2
4	0,8
8	1,6
16	3,2
22	4,4

Tabell 10: Minimum prøvemengde av den øvre kornstørrelsen

Den fuktige prøven veies og plasseres i en tørkeovn til man oppnår en konstant masse. Etter at prøven er tørr, måles massen på nytt.

Formel for fuktighetsinnhold:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M_3)} * 100$$

Hvor?

w- vanninnhold i %.

M1 - masse av fuktig prøve i gram + skål

M2 - masse av tørr prøve i gram + skål M3

- masse av skål i gram

4.2.2 Partikkelstørrelsesfordeling av aggregater

Ved bestemmelse av partikkelstørrelsesfordelingen av aggregater fulgte gruppen metoden i *HB R210, 131 "Sikteanalyse (tørresikting av vasket materiale)"* fra Statens vegvesen.

Dette gjøres ved å måle en mengde tilslag som vist i tabell 11.

Øvre kornstørrelse (D) (mm)	Eksempel på antall (kg)
90	80
63	40
45	20
32	10
22	5

16	2,6
11	1,4
8	0,6
≤4	0,2

Tabell 11: Målt mengde tilslag

Tilslaget siktes gjennom sikter med kvadratiske åpninger i 10 minutter. Siktene veies før og etter testen.

Resultatene registreres ved å beregne restmengden for hver siktprøve, R_1, R_2, \dots, R_n , basert på den totale prøvemengden (M_1), og deretter summere dem.

Prosentverdien for hver partikkelstørrelse oppnås ved hjelp av følgende formel og gjelder for alt tilslag ned til 0,063 mm:

$$X_i = \frac{R_i}{M_1} * 100$$

Hvor?

- R_i - masse i gram av hver fraksjon
- M_1 - den totale tørrmassen av prøven

Partikkelstørrelse mindre enn 0,063 mm (fint tilslag) bestemmes ved hjelp av følgende formel:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100$$

Hvor?

- M_1 - den totale tørrmassen til prøven
- M_2 - partikkelstørrelse større enn 0,063 mm etter vask
- P- siktet materiale som er igjen i bunnpotten

4.2.3 TAM kalorimetrisk test

Matrisens oppførsel, hovedsakelig herdetid og herdetid, og hydratiseringsnivået, bestemmes ved hjelp av en kalorimetrisk test. Målet med kalorimetri-maskinen er å utjevne temperaturen på varmen som avgis fra prøvene, og beregne energien som produseres. Prøvene matches med en individuell referansemasse, m_{ref} , med en fast spesifikk varmekapasitet, c . Deretter registreres det når energien frigjøres og hvor mye energi det er snakk om (Wadsö, 2005).



Figur 18: TAM-apparat

Ved utførelsen av den kalorimetriske testen beregnet gruppen den nøyaktige massen til hver prøve ved hjelp av formelen for spesifikk varmekapasitet.

Formelen for spesifikk varmekapasitet er (The Engineering Toolbox, u.å.):

$$c = \frac{Q}{m * \Delta T}$$

Hvor?

c - spesifikk varmekapasitet,
J/(kgK) m - massevekt, kg
 ΔT -
temperaturrendringshastighet, K Q -

energi, J

Følgende verdier for varmekapasitet, som ble oppgitt av en av rådgiverne, ble brukt til å beregne referansemassen for ampullene:

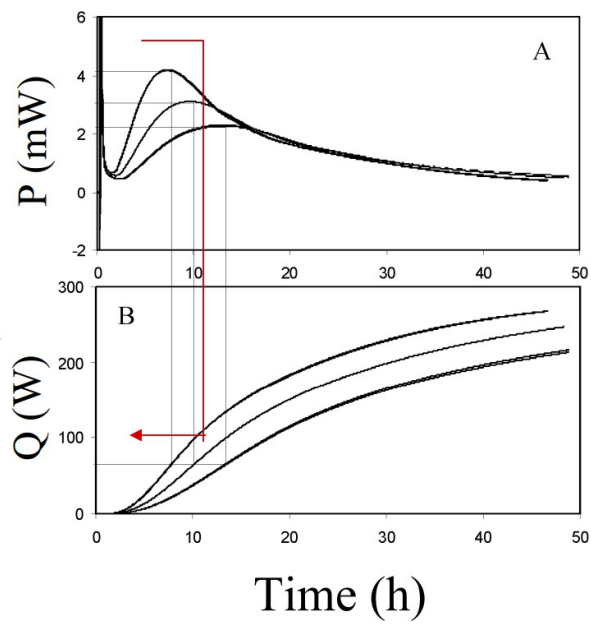
Varmekapasitet	Verdi (J/Kg*K)
Cslag	1,05
CFA	0,72
Cpw	4,18
CNa ₂ SiO ₃	0,92
CNaOH	0,7
CKOH	1,174

Tabell 12: Verdier for varmekapasitet

Deretter målte gruppen vannet i referanseampullene, blandet sementpastaen for geopolymeren i prøveampullene, forseglet dem og startet TAM-testen. For å forenkle testrutinen ble massen inkludert ampullene beregnet til å være ca. 6 g av den totale massen for hver ampulle.

TAM-prosessen omfattet til sammen 11 ulike geopolymermodifikasjoner, og informasjonen ble behandlet i 72 timer. Deretter fikk gruppen resultatene fra datamaskinen som var koblet til kammeret, i diagramform. Diagrammene illustrerte varmeproduksjonen over tid.

Som figuren nedenfor viser, gjenspeiler **P hastigheten** i prosessen, mens **Q** gjenspeiler **omfanget** av prosessen.



Figur 19: Hastighet vs. omfang av prosessen (Wadsö, 2005)

4.2.4 Innledende og endelig herdetid for sementpasta, VICAT

Ved bruk av den automatiske Vicat-maskinen, "Vicatron Automatic Vicat Recording Apparatus", blir den innledende og endelige herdetiden for geopolymerpastaen bestemt.



Figur 20: Vicatronisk automatisk Vicat-opptaksapparat (MATEST, u.å.)

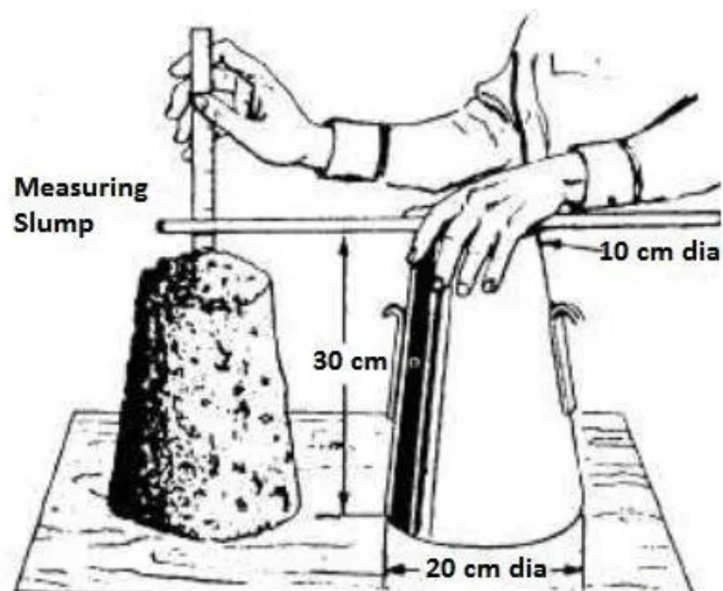
Ved å følge testprosedyren beskrevet i *NS-EN 196-3*, er kravet til rommet på ($20\text{ °C} \pm 2$), og ikke mindre enn 90 % relativ luftfuktighet. Sonden ble satt til fritt fall, og følgende parametere ble målt under testen (MATEST, n.d.):

- Intervalltid: 5 min
- Total tid: 420 min
- Kalibrering: 0 mm og 40 mm

4.2.5 Slump-test

Ved å følge prosedyren beskrevet i *HB R210, 412 Konsistens; synkmål*, bestemte gruppen konsistensen til den ferske geopolymertbetongen. Konsistenstesten måler avstanden mellom toppen av konsistenskjegele og det høyeste punktet i betongen etter at kjegele har blitt løftet og flyttet til side, som vist i figur 21.

Underlaget fuktes, og kjegele fylles med tre omtrent like tykke lag mens den holdes mot underlaget. Hvert lag komprimeres med 25 slag med en stålstang før neste lag fylles på. Etter at det tredje laget er komprimert, fylles betongen på nytt slik at den er i nivå med kjegeles overflate.



Figur 21: Tabell for setningstest (Mishra, u.å.)

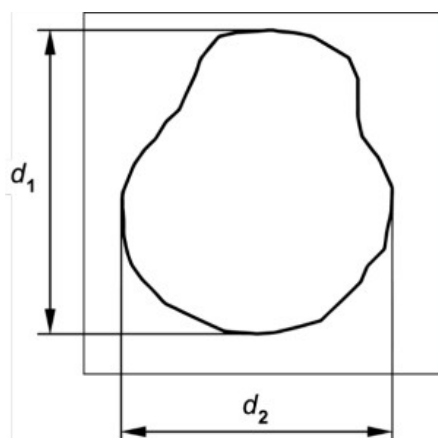
Gruppen har utført en slump-test, og målingene ble utledet. Setningstesten er vist i figur 22 nedenfor.



Figur 22: Flyt av masser i skapelsen

4.2.6 Test av flyteevne

Samtidig som slumpetesten ble utført, målte gruppen også spredningen av geopolymerblandingen. Dette ble gjort i henhold til prosedyren beskrevet i *NS-EN 12350-8: Testing av fersk betong, Del 8: Selvkompakterende betong - Flyte-synk-test*. GPC-en som gruppen har utviklet, er klassifisert som selvkompakterende betong, SCC, på grunn av tilsetningen av superplastikator.



Figur 23: Flytspredning (Standard Norge, 2019)

Figur 4 Komprimeringsstøter fra NS-EN 12350-5:2019 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller innteståelser for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

Flyteevnen er gjennomsnittet av d_1 og d_2 , uttrykt til nærmeste 10 mm, gitt ved formelen (Standard Norge, 2019):

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Hvor?

SF- er nedbøyningsstrømmen; mm

d_1 - er den største diameteren på

strømningsutbredelsen; mm d_2 - er

strømningsutbredelsen ved 90° i forhold til d_1 ; mm

Kapittel 8 Prøvningsresultat formel og tekst fra NS-EN 12350-5:2019 er gjengitt av B23B02 i avhandlingen "Geopolymer Betong: En fremtidsrettet betong" under lisens fra Standard Online AS mai 2023. Standard Online gir ingen garantier eller innteståelser for riktigheten av gjengivelsen. Se www.standard.no

4.2.7 Innhold av luft

Ved bestemmelse av luftinnholdet i GPC'en følges metode 415 "Luftinnhold, trykkmetoden", beskrevet i *HB R210* fra Statens vegvesen. Dette utføres ved hjelp av en kalibrert luftmåler som vist i figur 24.



Figur 24: Verktøy for måling av luftinnhold, kontroll av luftinnhold i fersk betong (Vegdirektoratet, 2014)

Under prosedyren legges tre lag med betong i beholderen, og hvert lag bearbeides med 25 slag fra en stålstang. Overflødig materiale fjernes fra beholderen, og når den øverste delen er satt sammen, åpnes kuleventilene. Vann tilsettes i en av kuleventilene til det strømmer ut av den motsatte ventilen, uten luftbobler. Måleren holdes litt på skrå slik at luften under lokket kan slippe ut, og vann tilsettes etter behov.

Justeringsventilen lukkes før trykket pumpes opp, og måleren justeres til null. Deretter lukkes kuleventilene, og luftinnholdet i GPC-en leses av når måleren har stabilisert seg. Luftinnholdet uttrykkes i prosent med én desimal (Vegdirektoratet, 2014).

4.2.8 Tetthet

I prøvingsmetode *HB 210, 422 Densitet* bestemmes tettheten til herdet betong etter nedsenking i vann. På grunn av herding i omgivelsene og varmeherding av geopolymerbetong har gruppen valgt å bestemme tørrdensiteten ved å måle masse og volum. Tetthet, ρ , er definert som forholdet mellom massen av en gitt betongprøve og dens volum og er uttrykt i henhold til Statens vegvesen (Vegdirektoratet, 2014):

$$\rho = \frac{m1}{V}, \text{ avrundet til nærmeste } 10 \text{ kg/m}^3$$

ρ - tetthet, (kg/m)³
m1- vekt, (kg)
V- volum, (m)³

4.2.9 Test av trykkfasthet

Prøvingsmetode 1, fra 14.631 i *HB-R210 Laboratorieundersøkelser*, beskriver den prosedyren gruppen utfører for trykkfasthetsprøving av støpte prøvelegemer. Formålet med denne prøvingsmetoden er å bestemme trykkfastheten (f_c) til de aktuelle prøvene.

Følgende retningslinjer og standarder følges under utførelsen av trykkfasthetstester:

- *NS-EN 12390-3: Prøving av herdet betong - Del 3: Trykkfasthet for prøvelegemer.*
- *NS-EN 12390-1: Prøving av herdet betong - Del 1: Form, dimensjoner og andre krav til prøvelegemer og støpeformer.*

Trykkfasthet beskriver betongens evne til å motstå påkjenninger som fører til sprekkdannelser og/eller deformasjoner.

I testprosedyren tas de aktuelle testprøvene ut av vannbadet/formbeholderen minst en halv time før testingen og tørkes for fritt overflatevann. Deretter måles tørrdensiteten og dimensjonene til testprøvene ved hjelp av en

skyvelære.

Det er viktig å verifisere vinkelen mellom sidekantene på trykkflaten ved hjelp av en firkant. Kompresjonstesten utføres mens prøvene er overflatefuktige og plasseres sentralt i kompresjonstestapparatet.

Prøven utsettes kontinuerlig for en sentralt påført last med en trykkøkning på $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa}$, i henhold til ~~NS-EN 3668~~ ^{NS-EN 3668}. Trykkstyrken per prøve er da registreres. Denne prosedyren gjentas etter 1, 7 og 28 dager for å dokumentere utviklingen i trykkfasthet for den aktuelle betongen.

For støpte prøvelegemer beregnes trykkoverflaten basert på de nominelle dimensjonene til støpeformen hvis de målte dimensjonene til prøvelegemet ikke avviker med mer enn $\pm 1,0 \%$. Trykkfastheten rapporteres i MPa med én desimal.

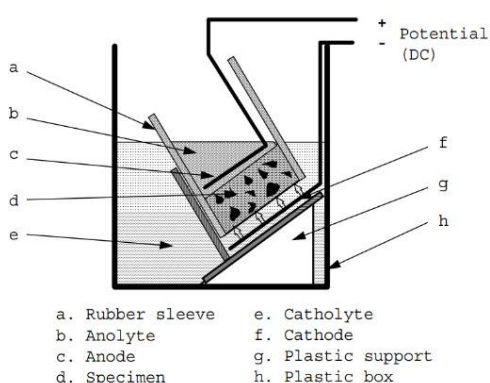
Betongens trykkfasthet (f_c) uttrykkes i MPa, med én desimal, og beregnes ved hjelp av formelen (Vegdirektoratet, 2014):

$$f_c = \frac{F}{a}$$

Hvor?

a- prøvens trykkoverflate, mm^2 F-
påført sentrisk kraft, N

4.2.10 Hurtig test av kloridpermeabilitet



Figur 25: Oppsett av den faktiske testen, RCPT

Figur 26: Oppsett av testen, RCPT (Nordtest, 1999)

I henhold til *NT Build 492* utføres *Rapid Chloride Permeability Test (RCPT)* for å teste motstanden mot kloridinntrengning, og dermed angi en forventet levetid for en betongprøve. Betongprøven støpes enten i sylindrisk form eller kjernebores med en diameter på 100 mm og en tykkelse på minst 160 mm ved støping og 100 mm ved boring. Sylindere skjæres deretter til 50 mm tykkelse, og epoksy påføres på sylindere sine sidevegger. Dette for at væskene kun skal trenge inn i endene av sylindere. Deretter monteres en gummihylse i sylindere, slik at kanten flukter med overflaten på prøven.

Katolytt og anolytt:

- Katolytten består av en 10 % natriumklorid (NaCl)-løsning (100 g NaCl i 900 g destillert vann).
- Anolyten består av 0,3 N NaOH-løsning (12 g NaOH i 1 l destillert vann), vedlegg 30.

Løsningene oppbevares deretter i en temperatur på 20-25°C.

Katoden plasseres på en plaststøtte inne i en plastboks. Prøven med hylsen senkes deretter ned i katolyten og plasseres på den 3D-printede plaststøtten. Anolyten helles deretter inni gummihylsen, med et sylindrisk foringsrør i PVC. Katoden og anoden kobles deretter til en likespenning, med en konstant spenning på 10 V og en strømstyrke på

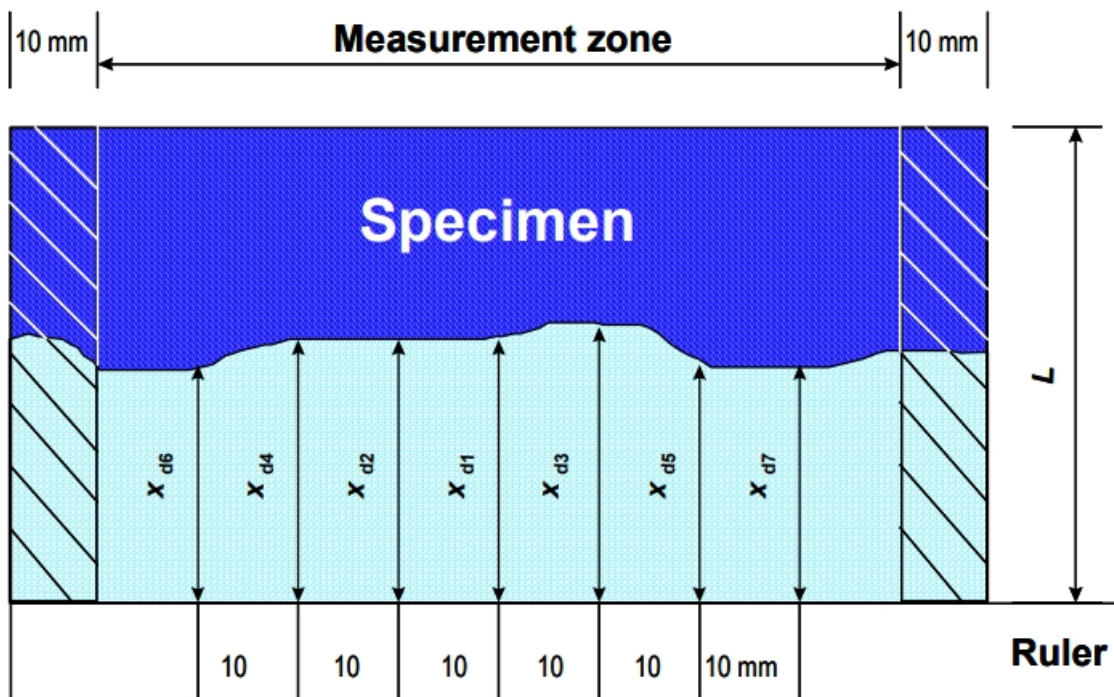
på 0,22 Ah i 24 timer, som vist i tabellen nedenfor.

Table 1. Test voltage and duration for concrete specimen with normal binder content.

Initial current I_{30V} (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Tabell 13: Testspenning og varighet (Nordtest, 1999)

Prøvene utsettes deretter for to væsker, anolytten og katolytten, nemlig NaCl og NaOH i løpet av 24 timer. Etter 24 timer skjærer gruppen ut, renser og overflatetørker prøven, og venter i 15 minutter før sølvnitratet sprøytes på det ferske midtsnittet av sylindere. Sølvnitratet ($AgNO_3$) vil etterlate en lys, hvit linje i geopolymere, som angir hvor kloridet har trengt inn i prøven. Dette angir penetrasjonsnivået, og hvilket nivå betongoverdekningen bør ligge på for å beskytte metallarmeringen tilstrekkelig. Figuren nedenfor viser fremgangsmåten for måling av kloridinntrengning. Gruppen måler dybdene fra x_{d1} til x_{d7} .



Figur 27: Illustrasjon av måling av kloridinntrengningsdybde (Nordtest, 1999)

På bildet nedenfor ser vi at prøven som ble brukt i testen, begynner å vise den hvite linjen som angir kloridinntrengningsdybden:



Figur 28: Kloridinntrengningsdybden begynner å bli synlig etter bruk av $AgNO_3$

Den ikke-stasjonære migrasjonskoeffisienten, D_{nssm} , bestemmes deretter ut fra følgende formel:

$$D_{nssm} = 0,0239 \frac{(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(\sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right)$$

Hvor?

D_{nssm} - Koeffisient for ikke-stabil tilstandsmigrasjon, $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^2$

U - Absolutt verdi av det eksterne potensialet mellom de to elektrodene, V

T - Gjennomsnittsverdi av start- og sluttemperatur i anolytten, $^{\circ}\text{C}$

L - Tykkelse på prøven, mm

x_d - Gjennomsnittsverdi for

inntrengningsdybde, mm

t - Testens varighet, timer

Ettersom det fortsatt ikke finnes noen akseptkriterier for kloriddiffusjonskoeffisienten, er det utviklet et forslag til verdier som en retningslinje for kloridmigrasjonskoeffisienten, D_{nssm} , målt ved RCM-testen. Disse verdiene er basert på Tang og Nilssons utvikling i 1992, som ble standardisert av NORDEs NT Build 492 i 1999. De følgende verdiene er et forslag basert på de to sistnevnte utviklingene, utviklet i 2013 (Dhanya, Santhanam, Pillai, & Gettu, 2014, s. 7).

Category	Wenner Resistivity (k Ω cm)	Total charge passed (Coulombs)	Non-steady state migration coefficient $\times 10^{-12}$ (m^2/s)
Excellent	> 50	<1000	<8
Good	10-50	1000-2000	8-16
Moderate	10-50	2000-4000	16-24
Poor	<10	>4000	>24

Tabell 14: Klassifiseringskriterier for kloridbestandighet for betong (Dhanya, Santhanam, Pillai, & Gettu, 2014, s. 13)

4.2.11 Karbonatiseringsdybden

Før karbonatiseringsdybden testes eller karbonatiseringsfronten bestemmes, skal betongprøven lagres i et konsentrert CO_2 -nivå ved hjelp av *Sanyos laboratorieinkubator modell MCO-17A1C*. Lagringsperioden i CO_2 ble satt til 14 dager, med et CO_2 -nivå på ca. 5 % ved en temperatur på 30°C . Dette gjøres for å akselerere karbonatiseringen av

betongprøven for å oppnå et brukbart resultat.

På grunn av en lekkasje i den nevnte inkubatoren var tiden i ferd med å renne ut, og gruppen bestemte seg for en reserveløsning: å beregne mengden tørris, CO₂ i fast form, som kunne erstatte det manuelt kontrollerte CO₂-nivået som ble tilført gjennom ventilasjonen ved hjelp av idealgassloven, og lagre prøvene i en ny inkubator uten ventilasjon, *Votsch VCL 4003*.

Nye parametere for lagring av betongprøven er 14 dager, ca. 5 % CO₂-nivå, 20 % luftfuktighet og en temperatur på 20 °C.

Beregning av mengden CO₂ tilsvarende 5 % i den nye inkubatoren uten CO₂-gasstilførsel ved hjelp av idealgassloven:

$$pV = nRT$$

Hvor?

p- trykk, 101 kPa

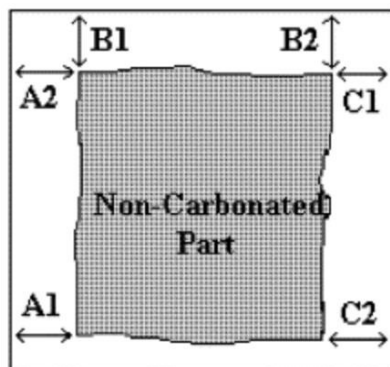
V - Volum, liter/m³

n- mengde stoff, mol

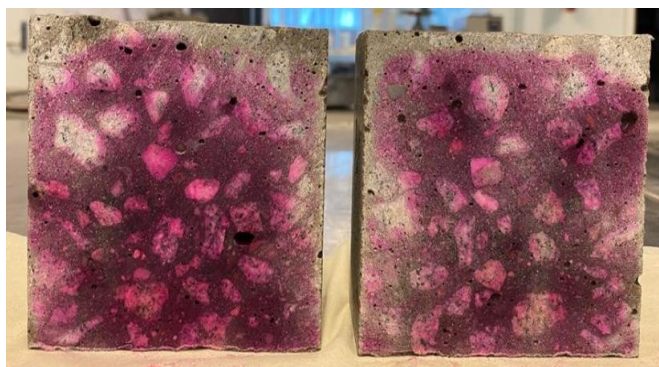
R- gasskonstant, R=0,082058

(L*atm)/(K*mol) T- temperatur, K

Når de 14 dagene med karbonatisering var fullført, ble prøvene fjernet fra utstyret. Etter at kubene var delt, ble de utsatt for en pH-indikator, fenolftalein. pH-indikatoren besto av 1 % fenolftalein (C₂₀H₁₄O₄) i vann. Deretter ble indikatoren sprayet på den delte overflaten av prøven - noe som genererte et sterkt lilla farget område for å trekke en linje mellom karbonatisert og ikke-karbonatisert GPC. Deretter målte gruppen dybden på følgende måte (Atiş, 2003):



Figur 30: Prinsipp for måling av akselerert karbonisering, (Atiş, 2003)



Figur 29: Den karbonatiserte overflaten

Karbonatiseringsdybde D beregnes ved hjelp av:

$$D = \frac{A1 + A2 + B1 + B2 + C1 + C2}{6}$$

Hvor?

D- gjennomsnittet av de 6 målte sonene.

Det finnes svært få standardiserte tester som omhandler akselerert karbonatiseringstesting og hvordan resultatene skal dokumenteres. Gruppen velger derfor å sammenligne resultater fra egen utførte test med dokumenterte testresultater i (Atiş, 2003), med fokus på CEM-II/A- S 42.5N på grunn av likheter med den egenutviklede geopolymeroppskriften (Atiş, 2003).

5 Resultater

Ved gjennomgangen av egenskapene til GP5.2 fokuserte gruppen først og fremst på det ovnsberedte partiet, på grunn av den betydelige forskjellen i herdeegenskaper basert på litteraturstudier.

Resultatene diskuteres i de følgende avsnittene.

5.1 Geopolymer

Gruppen har utviklet i alt 11 oppskrifter, men det var én oppskrift som ble brukt i resten av undersøkelsen, tabell 9. Denne oppskriften har blitt testet ut fra ulike aspekter, både i fersk og herdet tilstand. Holdbarheten har også blitt testet med klorid- og karbonatiseringstester. Tabellen nedenfor, tabell 15, viser resultatene av oppskriften gruppen valgte. GP5.2 ble laget i to batcher, 22.03.23.

GP5.2-resultater (herdet i ovn, 80 °C, 20 timer)		
Ferske egenskaper		
Testprosedyre	Verdi	Nummer på vedlegg/tabell
L/GB-forhold		0,55
Nedgang		260mm
Flyt		555mm
Temperatur		34,3°C
TAM		Vedlegg 20-24

Vicat	Innledende innstillingstid: 2 timer Endelig innstillingstid: 3h	<i>Vedlegg 16</i>
Innhold av luft	2,9%	
Aggregert størrelse	0-8 mm og 8-16 mm	<i>Teorikapittel 2.3.2 Aggregatstørrelse</i>
Aggregert vanninnhold	Sand = 0,25 prosent Grus = 0	<i>Vedlegg 29</i>
Sortering av tilslagskorn	<p>Grusfraksjon:</p> <p><8 mm = 6 prosent <10 mm = 18 prosent <12,5 mm = 26 prosent <16 mm = 33 %. <20 mm = 16 prosent <25 mm = 0 <25 mm = 0</p> <p>Sandfraksjon:</p> <p><0,125 mm = 5 <0,25 mm = 12 <0,5 mm = 25 <1 mm = 23 prosent <2 mm = 15 prosent <4 mm = 8 <8 mm = 8 prosent >8 mm = 3 %.</p>	<i>Siktekurver er presentert i: Vedlegg 28 for grus Vedlegg 27 for sand</i>

Tabell 15: GP5.2-resultater

Ved undersøkelsen av geopolymertbetongens ferske egenskaper brukte gruppen standardiserte testmetoder basert på de som brukes for tradisjonell betong. Denne

tilnærmingen kan føre til ukjente avvik, ettersom det foreløpig ikke finnes noen standardiserte metoder for testing av geopolymertbetong. Det antas imidlertid at eventuelle avvik ikke er vesentlige.

Ved kun å se på masseforholdet til GP5.2 tilsvarer egenskapene til en betong klassifisert som B30, M60 (Maage, 2015, s. 156). Den karakteristiske styrken til denne betongen er 30 MPa, noe som er betydelig lavere enn styrken som oppnås med GP5.2.

Bearbeidbarhetsegenskapene er avgjørende når man undersøker betongens ferske egenskaper, inkludert dens evne til å flyte og fylle former og støpeformer. I testingen av GP5.2 er resultatet av synketesten S5, som vist i tabell 4, og flytetestresultatet SF1, som vist i tabell 5.

Disse resultatene tyder på at GP5.2 oppnår gode bearbeidingsegenskaper.

Som det fremgår av Vicat-testresultatene i vedlegg 16, er den innledende herdetiden for GP5.2 2 timer, og den endelige herdetiden er 3 timer. Dette skyldes den høye temperaturen på GP5.2 under støpingen. Ved herding av GP5.2 i ovn er det en betydelig forskjell i utviklingen av tidlig høyfasthet sammenlignet med GP5.2 herdet i omgivelsene.

Ved evaluering av isotermiske kalorimetri-resultater undersøker gruppen forholdet mellom prosessens hastighet (P) og omfang (Q). Under den første runden med TAM-testing valgte gruppen GP1.2 basert på det beste resultatet med den høyeste Q-verdien og en samtidig høy, men forsinket P-verdi, som referert til i 4.2.3 TAM-kalorimetrisk test, vist i vedlegg 5. Gjennom en modifisert oppskrift basert på GP1.2, for å oppnå høyere tidligfasthet, falt gruppen ned på oppskriften GP5.2 - med et lavere L/GB-forhold og inkludert SP, som tilfredsstillende de ønskede egenskapene, vedlegg 8.

I vanlig betong er luftinnholdet uten L-materiale vanligvis rundt 2 %. Det er imidlertid vanlig praksis å øke luftinnholdet til $5 \pm 1,5$ % for å beskytte betongen mot nedbrytning på grunn av frosteksposering (Maage, 2015, s. 111). Basert på dette konkluderte gruppen med at GP5.2 med et luftinnhold på 2,4 % tilfredsstillende det typiske luftinnholdet, men at det kan være nødvendig med luftinnblandingsmidler for å øke betongens frostbestandighet.

Ved utvikling av geopolymere er herdeegenskaper også en viktig faktor som påvirker bruksområdene, og resultatene av tester av disse egenskapene vil bli diskutert i neste avsnitt.

Herdede egenskaper, (herdet i ovn 80 °C, 20 timer)		
Kubespesifikasjon	Tørr tetthet	Verdi
1 dag, kube 1 23.03.23	$2365,3 \frac{kg}{m^3}$	$81,4 \frac{N}{mm^2}$
1 dag, kube 2 23.03.23	$2393,1 \frac{kg}{m^3}$	$84,5 \frac{N}{mm^2}$
7 dager, kube 1 29.03.23	$2371,0 \frac{kg}{m^3}$	$91,3 \frac{N}{mm^2}$
7 dager, kube 2 29.03.23	$2388,2 \frac{kg}{m^3}$	$88,3 \frac{N}{mm^2}$
28 dager, kube 1 19.04.23	$2325,6 \frac{kg}{m^3}$	$90,2 \frac{N}{mm^2}$
28 dager, kube 2 19.04.23	$2382,4 \frac{kg}{m^3}$	$90,3 \frac{N}{mm^2}$
Hurtig kloridmigrasjonstest	D_{nssm} , migrasjonskoeffisient for ikke-stasjonær tilstand	Vedleggsnummer
Sylinder 1, 100 mm diameter, 50,6 mm høyde	$15,39 * 10^{-12} \frac{m^2}{s}$	30

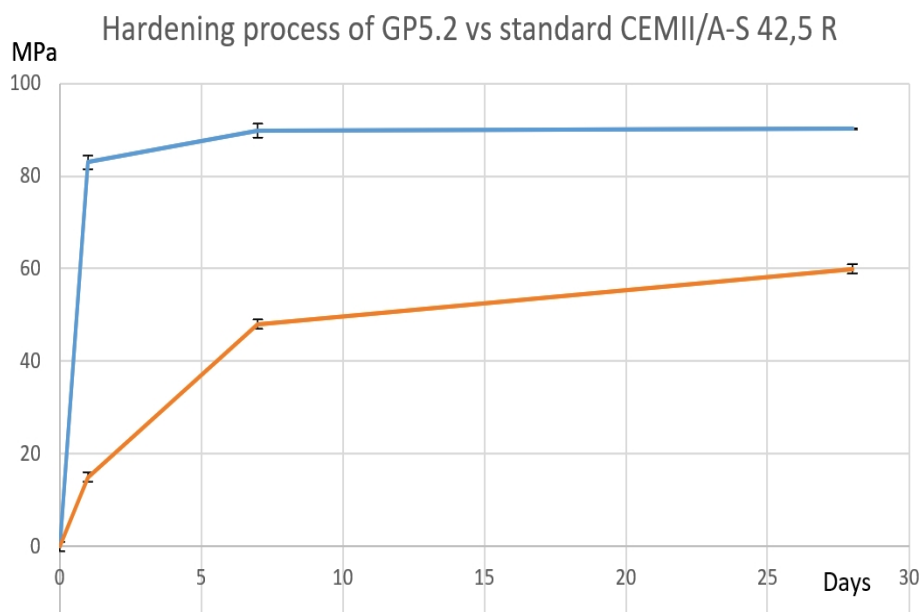
Rask karbonatiserings test	Tørr tetthet	Karbonatiseringsdybde	Vedleggnummer
28 dager, kube 1 (CO ₂)	2375,3 $\frac{kg}{m^3}$	2 946mm	31
28 dager, kube 2 (CO ₂)	2376,5 $\frac{kg}{m^3}$	4,833mm	31

Tabell 16: Herdede egenskaper

Som vist i Figur 31 og Tabell 16, er den tidlige styrken til GP5.2, når den herdes i ovn, relativt høy, men styrkeutviklingen er svært stagnerende. Som vist i vedlegg 26, var styrken til GP5.2-betong etter 1 døgns herding i omgivelsene den laveste, 12,9 MPa, mens GP5.2-betongen herdet i ovn var lavest med 81,4 MPa. Dette skyldes at hydratiseringshastigheten er sterkt avhengig av temperaturnivået, 2.3.3 Betongblanding og herding, og endringen i partikkelstørrelsesfordelingen av FA ved høye temperaturer, 2.2.2 Geopolymer som bindemiddel.

Herdehastigheten til GP5.2 sammenlignet med CEM - II/A-S 42.5R (Cemmac, u.å.):

Figur 31: Herdingsprosess for GP5.2 og CEMII/A-S 42,5 R



GP5.2s evne til å motstå kloridinntrengning er vist som en D_{nssm} -verdi, beregnet til $15,39 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, vedlegg 30, og dens gjennomsnittlige kloridinntrengningsdybde x_d på 12,4 mm. Dette vurderes som et "godt" resultat, noe som indikerer at GP5.2 kan være en egnet betong for krevende eksponeringsklasser, tabell 14. Dette er svært ønskelig da "Modellageret", som modulveggen nevnt i 5.2 var beregnet for, er eksponert for luftbårne klorider fra sjøvann i Glomma.

Under karbonatiseringsdybdetesten på GP5.2 ble karbonatiseringsdybden målt på to prøver. En av prøvene oppnådde en beregnet dybde (D) på 2,95 mm, mens den andre oppnådde en dybde på 4,83 mm, vedlegg 31 og figur 29. Ved å sammenligne disse resultatene fra tabell 17 nedenfor kan gruppen konkludere med at GP5.2s dårligste resultater for karbonatiseringsbestandighet er bedre enn blandingsdesign M0-M4 (Atiş, 2003), RH=65 %, 20 °C, basert på det faktum at testen ble utført under ideelle forhold. Det ble også gjort en sammenligning med samme blandingsutforming, men ved RH=100 %. Her presterer GP5.2 bedre enn M0-M3 med sitt dårligste resultat, men bare dårligere enn M4 med sitt beste resultat. Dette tyder på at høyere relativ fuktighet gir bedre motstand mot karbonatiseringspenetrasjon.

Table 5. Accelerated carbonation depth (mm) of concrete cured at 100% RH with 20 °C

Mix Name	3 days	7 days	28 days	3 months
M0	9.10	7.40	4.50	3.30
M1	13.30	10.90	6.50	4.60
M2	13.80	11.70	7.30	5.00
M3	8.70	8.40	3.20	1.80
M4	9.60	7.50	2.10	1.60

Table 4. Accelerated carbonation depth (mm) of concrete cured at 65% RH with 20 °C

Mix name	3 days	7 days	28 days	3 months
M0	9.60	8.50	6.50	5.00
M1	14.10	12.80	10.40	8.40
M2	14.90	13.40	11.30	8.90
M3	10.30	9.80	6.30	4.50
M4	9.80	9.30	5.70	3.80

Tabell 17: Akselerert karbonatiseringsdybde (mm) for sammenlignbar betong (Atiş, 2003)

Det ble lagt merke til at geopolymertbetongen hadde en sterk grønn farge ved avforming av de herdete prøvene i det omgivende miljøet. Betongen så ut til å være noe mørkere enn tradisjonell betong noen dager etter avforming, og det var en betydelig forskjell i hvor lett betongen slapp fra plast- og stålformene. Basert på observasjonene i figur 32 og figur 33 forble en betydelig mengde betong godt festet til stålformen. Dette kan tyde på at vedheftegenskapene til GPC til stål er positivt påvirket.



Figur 32: Foto av standard stålstøp, som viser hvordan GPC-en fester seg til stålet



Figur 33: Foto av plaststøpingen som ble brukt til kloridmigrasjonstestsylindrene



Figur 34: Feilmodus for GP5.2



Figur 35: Foto etter avforming av GP5.2

5.2 Potensiell bruk av geopolymertbetong, BIM-gjennomgang

Formålet med dette kapittelet er å diskutere de potensielle bruksområdene for GPC som gruppen har identifisert.

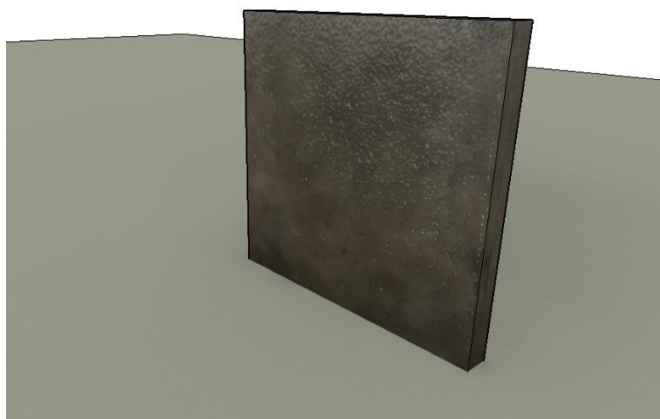
Tabell 16 viser trykkfasthetsresultatene for GP5.2 herdet i ovn, 1 dag etter blanding, som indikerte 81,4 MPa og 84,5 MPa. Når man undersøker herdeprosessen til GP5.2 fra vedlegg 16, som beskriver den innledende og endelige herdetiden, kan det konkluderes med at betongen herder relativt raskt. Med utgangspunkt i disse to parameterne har gruppen vurdert at geopolymertresepten kan være egnet til å produsere prefabrikerte elementer.

I denne sammenheng har gruppen et forslag til en potensiell ikke-strukturell yttervegg som er tiltenkt FMV-Vests "Modellageret". Gruppens forslag er at en forsterket demonterbar modulvegg kan på grunn av bygningens usikre fremtid etter de neste 10 årene - som følge av en ny reguleringsplan. Konseptet bak modulveggen er at den etter at den har tjent sitt opprinnelige formål, kan gjenbrukes til en helt annet formål *eller* som en ny vegg i en ny bygning - for å redusere CO₂-utslippene i forbindelse med rehabiliteringen av Modellageret.



Figur 36: "Modellageret" i dag

Etter å ha vurdert det opprinnelige formålet med modulveggen, har gruppen diskutert ulike måter den kan gjenbrukes på. I første omgang har gruppen vurdert ulike muligheter der landskapsarkitekter potensielt kan gjenbruke muren til blomsterbed, skillefunksjoner i landskapet eller andre



detalj funksjoner. The idea is that the *Figur 37: Realistisk avtrykksbilde av modulveggen*

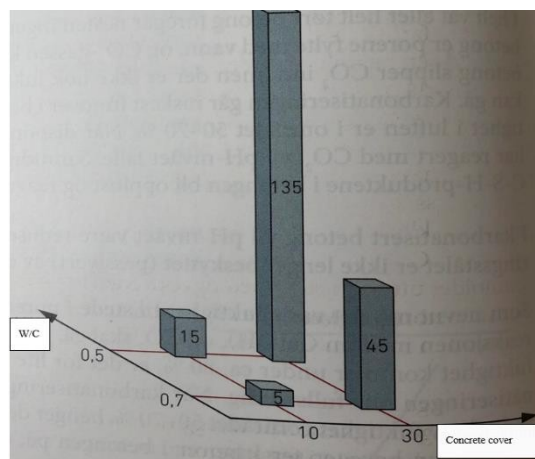
modulen bør ikke rives, men heller brukes i sin opprinnelige form eller tilpasses. Hovedmålet for gjenbruk er å få et estetisk tiltalende utseende, der de mekaniske egenskapene er mindre relevante.

Gjennom anbefalt videre forskning og utvikling av modulveggen ser gruppen muligheter for slike gjenbrukbare elementer. Dette vil bety at murens levetid bør økes fra dagens krav på 50 år for prefabrikerte elementer (Arkin, 2023).

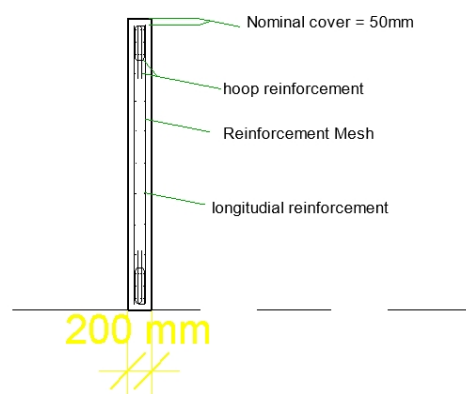
For å nå dette målet bør fokuset være på bestandighet. Som nevnt i teori 2.5 Holdbarhet og armering, er overdekningstykkelser avgjørende for armeringskorrosjon, som igjen er den vanligste skademekanismen for betongkonstruksjoner.

Betongoverdekning og armering må derfor beregnes og begrunnes i henhold til modulveggens tiltenkte formål.

Etter å ha evaluert tilstanden til veggen, kan den gjenbrukes på et annet sted der kravene er like høye eller lavere. Ettersom modulveggen i dette tilfellet er en ikke-bærende yttervegg som vil bli eksponert for luftbårne klorider og er plassert nær kysten, antar gruppen at betongdekket i konstruksjonen kan dimensjoneres i henhold til eksponeringsklasse XS1. I henhold til *NS-EN 1992-1-1*, innebærer dette en overdekning på 50 mm. Siden veggen ikke er bærende, anbefaler vi et minimum av armering, som beskrevet i *NS-EN 1992-1-1*, for å minimere oppsprekking og forhindre sprøbrudd. 2.5.2 Minimumsarmering. På grunn av mangelen på standarder for geopolymertbetong, er beregning av armering og betongoverdekning er vanskelig og anbefales for videre arbeid. Dimensjonene (lengde x høyde x tykkelse) er noe som må spesifiseres i en bestilling med hensyn til det primære formålet med veggen. Vårt forslag til modulveggen som



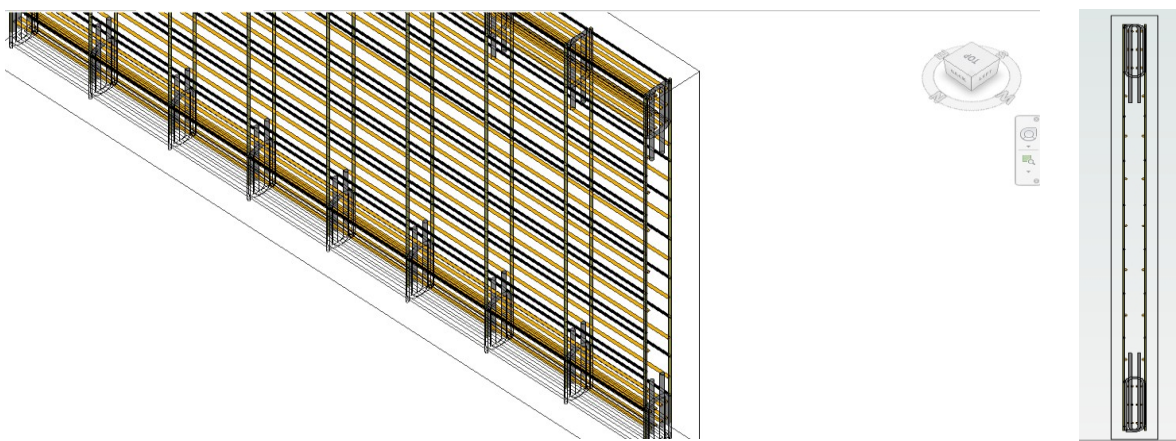
(Maage, 2015, s. 220)



Figur 39: Tverrsnitt av modulveggen

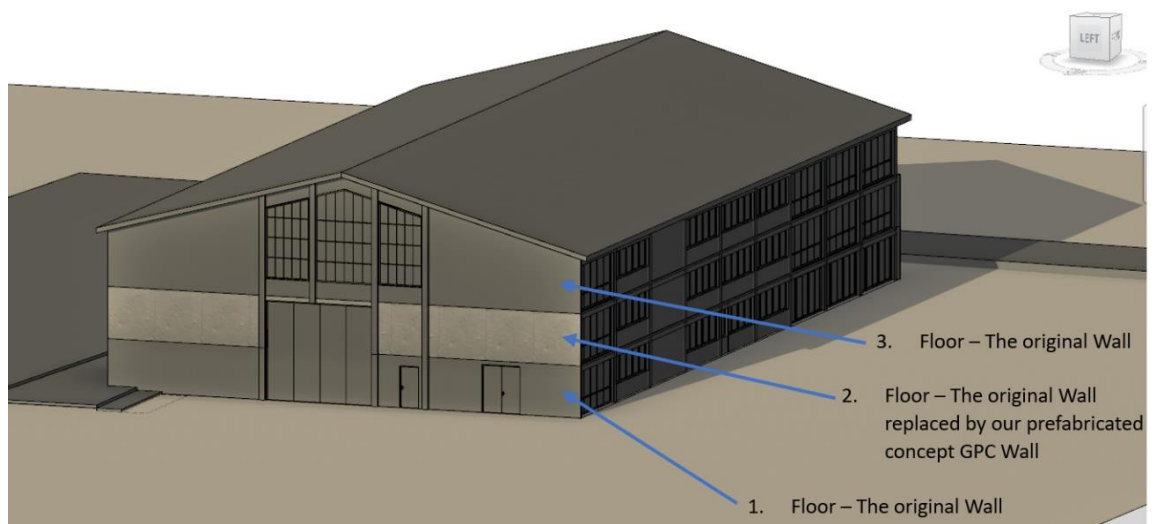
som skal benyttes i Modellageret, er en tykkelse på minimum 200 mm på grunn av betongdekket. Lengden og høyden må spesifiseres *etter* arkitektoniske målinger av "Modellageret", og før rehabiliteringen igangsettes. Se figur 39 for et forslag til tverrsnitt av modulveggen.

Figur 40 er en eksklusiv forslagstegning for den armerte demonterbare modulveggen. Denne armeringsplasseringen er basert på et bilde av en prefabrikkert vegg laget av Heidelberg Materials Prefab Norge, vedlegg 35. Figur 40 viser et forslag til utforming av armeringsplasseringen, men plasseringen må utformes i henhold til veggens tiltenkte formål, forankring og de kreftene som vil bli påført veggen.



Figur 40: Konseptuell tegning av armering

Under utformingen av et slikt element må det tas hensyn til forankring og strukturell utforming, dimensjonering, produksjon, transport, installasjon, bygningsfysikk som isolasjon med mer. Gruppen har vurdert at modulveggen kan forankres med en boltet løsning, men dette er et forslag til videre arbeid. Faktorene som er nevnt ovenfor må tas i betraktning ved dimensjonering av en prefabrikkert vegg, så dette er bare et *konsept*, og punktene ovenfor anbefales for videre utvikling og forskning. Til slutt har en eksisterende IFC-fil, figur 41, blitt modifisert for å vise konseptet med modulveggen integrert i "Modellageret".



Figur 41: "Modellageret" med en vegg erstattet med en GPC-modulvegg

5.3 LCA-studie

På grunn av gruppens ønske om å redusere CO₂-utslippene fra byggebransjen, gjennomførte gruppen en LCA-studie av en egenutviklet geopolymertbetong og sammenlignet den med en betongtype med tilsvarende masseforhold. Oppgaven var å gjennomføre en LCA-studie av prosessene og dataene som inngår i A1 og A3:

A1: Utvinning av råmaterialer

A3: Produkt

Dette omfatter i hovedsak hele produksjonsprosessen av et produkt, og det er nettopp her konsernet ønsker å redusere miljøpåvirkningen. Transport i fase A2 ble ikke tatt med i betraktningen, ettersom det er stor variasjon i hvor råvarene produseres. Transport er en stor miljøbelastning, noe som ville gi et feilaktig inntrykk av både GP5.2 og CEM-II basert på råvareuttak og produksjon (Statistisk sentralbyrå, 2019).

Gruppen bestemte seg for å sammenligne GP5.2 med en tradisjonell betongblanding: CEM-II/A-S 42,5N basert på det relativt like masseforholdet og innholdet av GGBFS. Tabell 18 nedenfor beskriver sement-slagg-kombinasjonen, og tabell 19 viser resepten som vi sammenlignet med:

TABLE 4: Standard composition of the tested cements according to EN 197-1:2000, m%.

Cement types	Constituents in standard composition of the tested cements, m%			
	Clinkers	Main GGBS	Fly ash	Minor Gypsum
CEM I 42,5 N	95–100	0	0	5
CEM II/A-S 42,5 N	85–94	15 (6–20)	0	5
CEM II/B-S 42,5 R	65–79	20 (21–35)	0	5
CEM III/A 32,5 N	35–64	60 (36–65)	0	5
CEM III/B 32,5 N-S	20–34	75 (66–80)	0	5
CEM V/A (S-V) 32,5 N	40–64	30 (18–30)	30 (18–30)	5

Tabell 18: Sement-slagg-forholdet i den sammenlignede oppskriften (Kopeckó & Balázs, 2017)

Mixture	w/c = 0.35		w/c = 0.45		w/c = 0.55	
	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)	NAE (kg/m ³)	AE (kg/m ³)
Cement	440	440	440	440	440	440
water (w/c = 0.35)	154	154	198	198	242	242
River sand 0-1 mm (25 m%)	451	451	425	424	408	396
River sand 0-4 mm (20 m%)	361	361	340	339	327	317
River gravel 4-8 mm (55 m%)	993	993	934	932	898	871
Superplasticizer (1.15 m%)	5.06	5.06	1.76	1.76	0	0
AE (0.35 m%)	—	1.54	—	1.54	—	1.54
Sum	2404.06	2405.60	2338.76	2336.30	2315.00	2267.54

Tabell 19: Oppskriften som ble brukt i LCA-studien (Kočesková & Balázs, 2017)

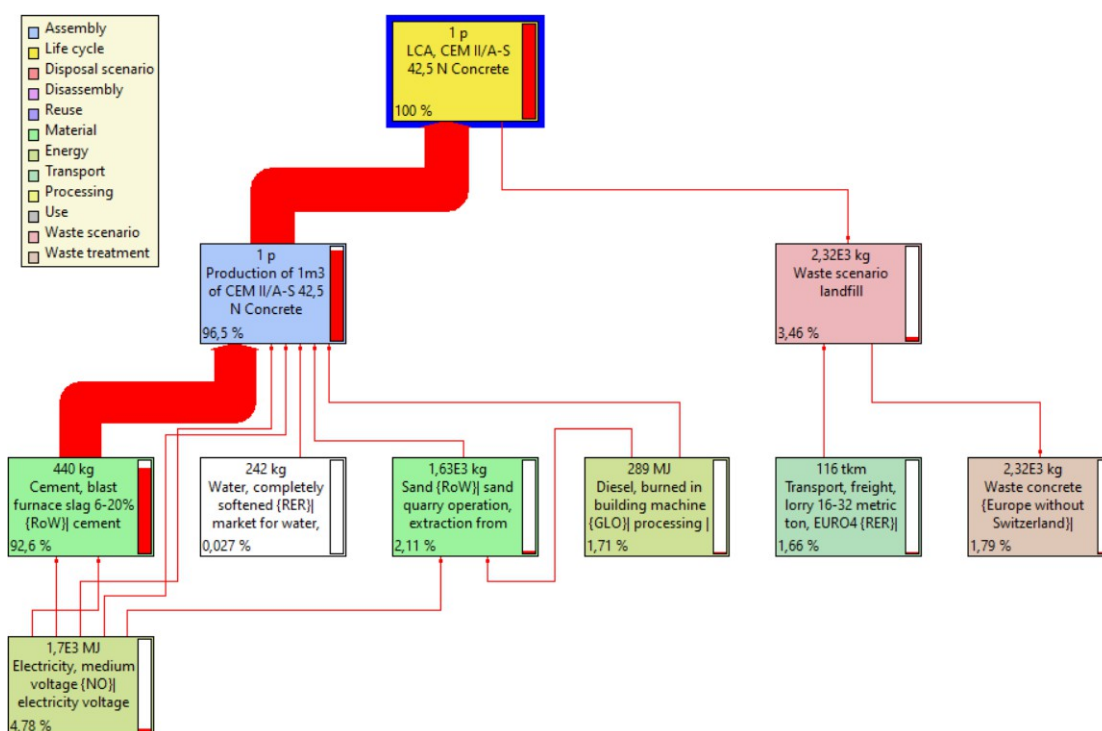
Denne LCA-studien er en forenklet tilnærming til GP5.2-oppskriften som gruppen har utviklet, tabell 9, og databasen fra SimaPro har blitt brukt som referanse i analysen. Prosessene som er ekskludert fra SimaPro-databasen, er valgt ut etter gjennomgang av EPD-er og informasjon hentet fra nettet. De brukte energiforbruksegenskapene finnes i tabellen nedenfor.

Materialer	Energi brukt i produksjonen	Kilder
CEM II/A-S 42,5 N med 15 % malt granulert masovnslagg	0,85 kWh for sement og 0,00705 kWh slagg for totalt 1 kg blandet CEM II/A-S	(Cyr & Patapy, 2016, s. 5) (The International EPD System, 2019, s. 10)
GGBS	0,047 kWh/kg	(The International EPD System, 2019, s. 10)
Natriumsilikat i fast form	1,5 kWh/kg	(Ramagiri, Chintla, Bandlamudi, Maeijer & Kar, 2021)
Kaliumhydroksid	4,81 kWh/kg	(Jiang, et al., 2021)

Sika Viscocrete	4,54 kWh/kg	(European Federation of Concrete Admixtures Associations , 2021)
FA	0 kWh/kg	Avfallsprodukt
Vann	0 kWh/kg	
Aggregat 0-8	0,00226 kWh/kg og 0,0836 MJ/kg (diesel)	(Statens vegvesen, 2009)
Aggregat 0-16	0,00226 kWh/kg og 0,0836 MJ/kg (diesel)	(Statens vegvesen, 2009)
Elektrisitet fra blanding	62,4 kWh/m ³	Informasjon fra Heidelberg Materials
Elektrisitet fra varmekammer (80 °C)	15,55 kWh/m ³	Varmekammer, Høgskolen i Østfold
Dieselens energi ved blanding	152,3 MJ/kg	Informasjon fra Heidelberg Materials

Tabell 20: Nøkkelverdier brukt i LCA-studien

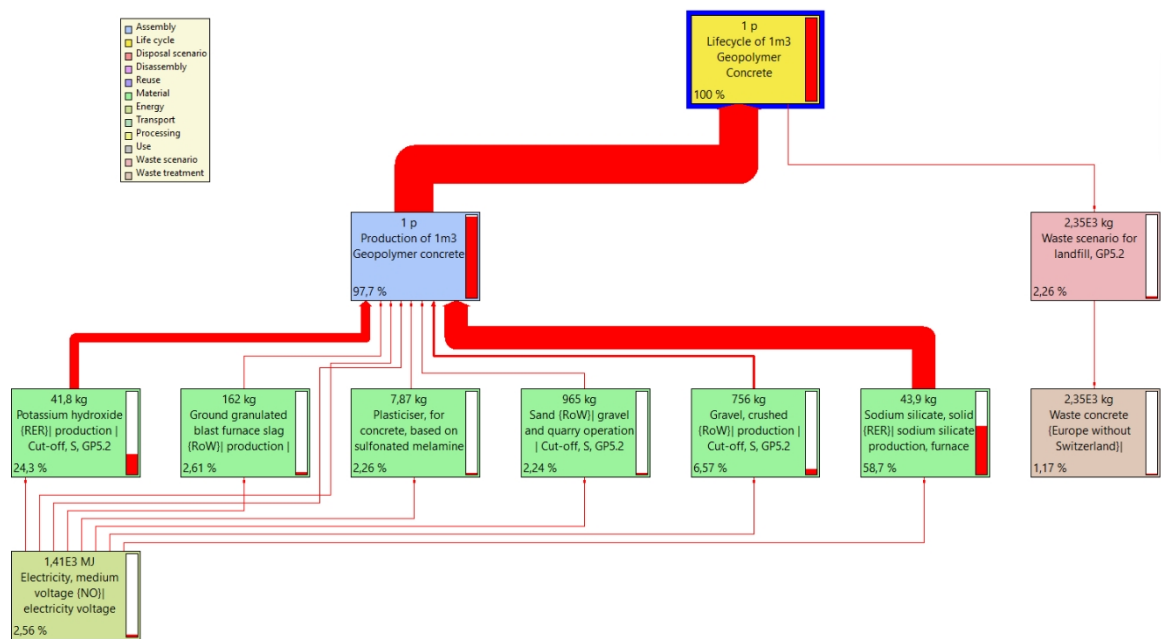
CEM-II /A-S 42,5N Betong:



Figur 42: CEM-II /A-S 42.5N Livssyklusnettverk for betong

Som LCA-kjeden i figur 42 viser, utgjør selve produksjonen av OPC størstedelen av CO₂-utslippene som genereres ved produksjon av tradisjonell betong - hele 92,6 % av klimapåvirkningen ligger i denne kategorien. Gruppen forutså at miljøpåvirkningen fra OPC ville være høy, og det er nettopp denne kategorien man ønsker å redusere. Som vist i vedlegg 33 står produksjonen av 1 m³ OPC alene for 386 kg CO₂-ekvivalenter, utelukkende fra GWP100 Fossil.

GP5.2 - geopolymertong:

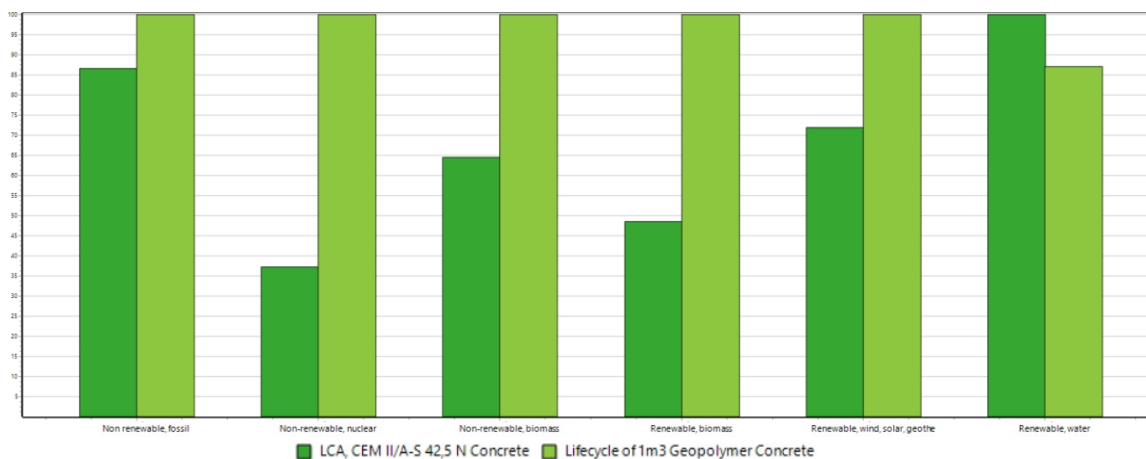


Figur 43: GP5.2 Livssyklusnettverk

Da vi gjennomførte en LCA på den egenutviklede GP5.2, fant vi at produksjonen av bindemidlene, natriumsilikat og kaliumhydroksid, står for 72,9 % av klimapåvirkningen fra 1 m³ produsert geopolymertong. Dette skyldes det høye energibehovet som kreves for å produsere disse kjemiske komponentene.

Sammenligning

Ved direkte sammenligning av produksjonen av GP5.2 og CEM-II/A-S 42,5N fokuserer gruppen på to kategorier, med hovedvekt på CO₂-utslipp. CO₂-ekvivalenter og MJ energiforbruk.



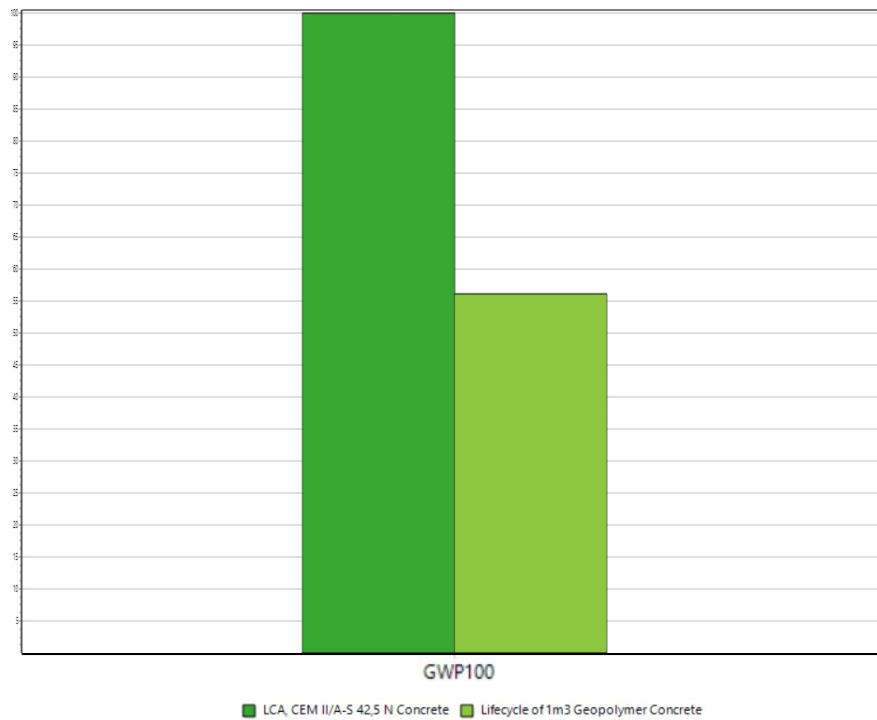
Figur 44: Energiforbruk

Som det tydelig fremgår av Figur 44 og Figur 45, er det ubalanse i sammenligningen av CO₂-ekvivalenter og MJ energiforbruk ved produksjon av 1 m³ av GP5.2 og CEM- II/A-S 42.5N.

LCA-studien viser at produksjonen av GP5.2 er betydelig mer energikrevende, med et forbruk på 5349,401 MJ, sammenlignet med produksjonen av CEM-II/A-S 42.5N, som bruker 4742,359 MJ, med en forskjell på 12,8 % mer enn CEM-II/A-S 42.5N basert på verdiene som er beregnet i vedlegg 32.

Det er imidlertid en betydelig forskjell i mengden CO₂-ekvivalenter mellom produksjonen av GP5.2 og CEM-II/A-S 42.5N.

Som vist i figur 45, er det totale GWP100-nivået for GP5.2 beregnet til å være omtrent 56 % av produksjonen av CEM-II/A-S 42.5N. Dette utgjør en reduksjon på 44 %, noe som er en betydelig forskjell hvis produksjonsmengden skaleres opp. Den totale mengden CO₂-ekvivalenter i produksjonen av CEM-II/A-S 42.5N er 386,811 kg/m³ sammenlignet med GP5.2s betydelig lavere totale mengde på 216,890 kg/m³.



Figur 45: LCA CO2-utslipp

Ved produksjon av disse betongtypene har man oppnådd målet om å redusere CO₂-nivået med GP5.2. Det er imidlertid et svært høyt energiforbruk i produksjonen av de kjemisk sammensatte alkaliske aktivatorene som erstatter vann i tradisjonell betong.

5.4 Feilkilder og diskusjon

Testmetoder og resultater

- Formålet med avhandlingen er å sammenligne tradisjonell betong og GPC, og metodene er basert på tradisjonelle standarder, og ikke GPC-spesifikke. Den er derfor basert på det faktum at det finnes få tilgjengelige standarder for GPC.
- På grunn av endringen av karboniseringskap og usikkerheter med hensyn til CO₂-konsentrasjonen beregnet basert på den ideelle gassloven, kan ikke gruppen legitimere karboniseringshastigheten fra denne testen. Gruppen erkjenner at den ideelle gassloven representerer en idealisert modell og kanskje ikke gjenspeiler oppførselen til gasser i den virkelige verden på en nøyaktig måte. Likevel er det rimelig å anta at hurtigkarboniseringstesten gir reelle resultater, gitt at kammeret er hermetisk lukket, og at den ideelle gassloven er beregnet nøyaktig.
- Sammenligning av egenskaper mellom GPC og tradisjonell betong er utelukkende basert på litteratur og standarder. Dette krever omfattende testing og empirisk forskning for å utvikle karakteristiske egenskaper. Til tross for mangel på tid og omfanget av testingen som er utført i denne avhandlingen, kan de nevnte resultatene være en indikasjon.
- Menneskelige faktorer er uunngåelige og bør alltid tas i betraktning.

Potensiell bruk av geopolymerbetong, BIM-gjennomgang

- Armeringen og forankringen av modulveggen ble ikke dimensjonert eller prosjektert, siden det finnes få tilgjengelige standarder for GPC. Siden denne avhandlingen var begrenset til å undersøke GPC-egenskaper, ble det ansett som forsvarlig å anbefale en egen problemstilling for dimensjonering.

LCA-studie

- Gruppen har basert LCA-studien på det begrensede programvarebiblioteket som tilbys av SimaPro. Dette kan føre til positive eller negative svingninger i resultatene.
- Energiforbruket er et annet aspekt som varierer betydelig, og som er basert på informasjon hentet fra nettet. Gjennom LCA-studien la gruppen merke til at alkaliløsningene hadde et betydelig høyt energiforbruk på grunn av elektrolyse. Basert på teorien om GPC var det overraskende at energiforbruket ble vurdert til

slike nivåer.

6 Konklusjon

Oppgaven startet med følgende problemstilling:

Formålet med denne avhandlingen er å undersøke holdbarheten og egenskapene til en egenutviklet geopolymerebetong, samt å sammenligne CO₂-utslippene fra produksjonsfasen med tradisjonell betong - med mål om å fremme utslippsbevissthet i bygg- og anleggsbransjen ved hjelp av BIM og LCA.

Konklusjonen er at den egenutviklede GPC-en viste gode egenskaper i fersk og herdet tilstand gjennom testprosedyrene. Resultatene bidrar til å konkludere med at bestandighetsegenskapene er minst like gode som tradisjonell betong, og til og med overgår enkelte egenskaper - gitt optimal herdetemperatur. Gjennom hurtigkarbonatiserings- og kloridmigrasjonstesten, og med riktig armeringsjærndekning, vil GPC overgå den dimensjonerende levetiden på 50 år. Gjennom både egenskapstesting og BIM-gjennomgang konkluderte gruppen i tillegg med at den egenutviklede betongen er egnet til å bli brukt som en gjenbrukbar og avtakbar modulvegg.

LCA-studien begrunnet målet om å redusere CO₂-utslippene i produksjonsfasen av GPC, sammenlignet med tradisjonell betong, med nesten femti prosent, og dermed høyere energiforbruk. Ved å bruke BIM og innlemme LCA-resultater kan prosjekteieren differensiere mellom flere byggematerialer, og dermed bestemme seg for hvilke - basert på utslipp. "Modellageret" er et slikt prosjekt som kan dra nytte av dette.

Alt i alt viser GPC utsøkte egenskaper, spesielt når det gjelder herdeegenskaper, og lover å overgå tradisjonell betong samtidig som CO₂-utslippene reduseres betydelig, noe som gjør den til et ideelt valg for fremtidsrettede konstruksjoner.

7. Forslag til videre arbeid

I løpet av arbeidet med denne oppgaven oppdaget vi flere utfordringer og usikkerhetsmomenter knyttet til utviklingen av produktet. Følgende problemstillinger kan være interessante å se nærmere på for å optimalisere potensialet til den fremtidsrettede GPC-en.

Geopolymerbetong

- Det er et stort behov for å forske på standardisering av egenskaper på GPC, da det vil være interessant å utvikle en omfattende sammenligning med tradisjonell betong.
- Det anbefales å undersøke tilgjengelige bindemidler på grunn av usikkerheten rundt bruken av FA fra kullkraftverk som antas å bli lagt ned i fremtiden. Kan en overgang til aske fra vulkaner, gruveavgang, aske fra risskall eller andre bindemidler vise seg å ha tilsvarende eller bedre egenskaper enn FA?
- Ved undersøkelse av ytterpunktene for karbonatisering og kloridmotstand ble det observert at de kunne ha sammenheng med tilslagene. Derfor ville det vært interessant å teste andre og forskjellige tilslagsstørrelser. Vil dette variere på grunn av bruk av SF, ettersom det kan redusere overgangssonen i grensesnittet?

Potensiell bruk av geopolymerbetong, BIM-gjennomgang

- Dimensjonering og prosjektering av GPC-konstruksjoner i Europa er i dag praktisk talt umulig på grunn av manglende standarder. Dette utfordrer bruken av GPC i faktiske prosjekter, ettersom gruppen opplevde akkurat dette problemet da de prøvde å beregne minimumsarmeringen - fordi dette utelukkende er knyttet til tradisjonell betong.
- For å fremme gjenbruk er det viktig å forlenge levetiden til betongkonstruksjoner. For å oppnå målet om gjenbrukbarhet er det dessuten viktig å utforske ulike forankringsalternativer og armeringsplasseringer for prefabrikkerte betongelementer. Bolteforankring har blitt foreslått som en måte å gjøre betongelementene demonterbare på, noe som er en forutsetning for at de skal kunne gjenbrukes i sin helhet. Utformingen av disse alternativene er et svært interessant forskningsproblem.

LCA-studie

- Etter LCA-studien ble det lagt merke til at alkaliløsningene hadde et betydelig høyt energiforbruk på grunn av elektrolyse. Er det mulig å erstatte de nåværende alkaliske løsningene med et mindre energiintensivt produkt, eller redusere L/GB-forholdet for å redusere mengden alkaliske løsninger, med lignende eller bedre egenskaper?
- Basert på erfaringene med bruk av LCA-programvaren ville det vært ønskelig med mer omfattende og utfyllende informasjon, noe som kunne øke troverdigheten til resultatene fra LCA-studien ytterligere. For å få tak i disse detaljene ville det være interessant og tilrådelig å utvide databasen for å imøtekomme nye brukere av programvaren. Til slutt er dette for å styrke budskapet om miljøbevissthet.

8 Referanse

- Abushad, M., & Sabri, M. D. (2017, 7. juli). Sammenlignende studie av trykkfastheten til betong med flyveaske. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Hentet fra <https://www.irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7534.pdf>
- Ahmed, M., Verma, M., Rahman, I., Mallick, J., Dev, N., & Nigam, M. (2022, 7. april). Geopolymerbetong: Et materiale for bærekraftig utvikling i indisk byggebransje. *Crystals*. doi:<https://doi.org/10.3390/cryst12040514>
- Ali, K. A. (2020, 10. september). Issues, Impacts, and Mitigations of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector. *sustainability*, s. 12. doi:<https://doi.org/10.3390/su12187427>
- Anre, A. (2020, 27. juni). *Hva er betongoverdekning for armering?* Hentet fra Prodyogi: https://www.prodyogi.com/2020/06/what-is-concrete-cover-for-armering.html?utm_content=cmp-true
- Arkin, D. (2023, 9. januar). *Hvor lenge varer betong? Sannheten om prefabrikert betong.* Hentet fra <https://premierprecast.com/concrete-levetid/#:~:text=Prefabrikert%20betong%20har%20streng%20designparametre%20and%20is,the%20reasons%20for%20precast%20concrete%20to%20last%20longer%3F>
- Armentrout, D. L., & Belkowitz, J. S. (2009, januar). EN UNDERSØKELSE AV NANOSILIKA I SEMENTHYDRATISERINGSPROSESSEN. Hentet fra researchgate.net/publication/264882831_An_investigation_of_nano_silica_in_the_cement_hydration_process
- Atiş, C. (2003, april). Akselerert karbonatisering og testing av betong laget med flyveaske. *Konstruksjons- og byggematerialer*, s. 147-152. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00116-2)
- Autodesk (u.å.). *Bygningsinformasjonsmodellering*. Hentet fra <https://www.autodesk.com/industry/aec/bim>

Autodesk (u.å.). *Revit: BIM-programvare for designere, byggere og utførere*. Hentet fra <https://www.autodesk.no/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=abonnement&plc=RVT>

Betongfokus. (2019, 27. mars). *Geopolymerbetong, hva er nå det?* Hentet fra <https://www.betongfokus.no/2019/03/27/geopolymerbetong/#:~:text=Geopolymere r%20baserer%20seg%20p%C3%A5%20mindre%20prosesserte%20mineraler%20med,en%20del%20praktiske%20utfordringer%20med%20%C3%A5%20bruke%20geopolymerbetonger.>

BNP Media. (2021, 29. januar). Hentet fra <https://browningday.com/news/lca-stages-matter-when-tracking-embodied-carbon/>

Byggforskingsinstituttet. (u.å.). *Materialtesting*. Hentet fra <http://www.buildingresearch.com.np/services/mt/mt1.php>

BYJU's Learning. (2023). *Skriv den kjemiske ligningen for å representere den ioniske dissosiasjonen av natriumhydroksid i vandig medium*. Hentet fra <https://byjus.com/question-answer/write-the-chemical-equation-to-represent-the-ionisk-dissosiasjon-av-natriumhydroksid-i-vandig-medium/>

CBI Norge. (u.å.). *Betydningen av varmekapasiteten i isolasjonsmaterialet*. Hentet fra <https://www.cbinorge.no/celluloseisolasjon/hva-er-celluloseisolasjon-/betydningen-av-varmekapasiteten-i-isolasjonsmaterialet?fbclid=IwAR2Li6NroqkGpF1Nnys0EgZLw5tfNFAyeqH2-GJColWVlfGI4hjOFymnUpM>

Cemmac. (n.d.). *CEM II/A-S 42,5 R Portland - slaggsement*. Hentet fra <http://www.cemmac.sk/dev/language/en/cement-cem-ii-a-s-425r/?fbclid=IwAR2bSFjRUtytcqnKSo38GYIKknaqJnaeknJ5HNk1D0Vy6bf6H-Q3YcADSIU>

CEN. (2012, 30. april). *Prøvningsmetoder for geometriske egenskaper for tilslag - Del 1: Bestemmelse av partikkelstørrelsesfordeling - Sigtemetode*. Retrieved from <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/100b983f-85a4-4a80-934c-e93c584dbdb4/en-933-1-2012>

- Cong, P., & Cheng, Y. (2021, 25. mai). Fremskritt innen geopolymermaterialer: En omfattende gjennomgang. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (engelsk utgave)*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021, juni). Fremskritt innen geopolymermaterialer: En omfattende gjennomgang. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (engelsk utgave)*, s. 283-314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Cyr, M., & Patapy, C. (2016). Synergiske effekter av aktiveringsveier for malt granulat. *HAL open science*, s. 5. Hentet fra <https://hal.science/hal-01344929/document>
- Deb, P. og Sarker, P. (2016, 14. september). Effekter av ultrafin flyveaske på herding, styrke og porøsitet av geopolymere herdet ved romtemperatur. *Journal of Materials in Civil Engineering*, s. 1-5.
doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001745)
- Dhanya, B. S., Santhanam, M., Pillai, R., & Gettu, R. (2014, januar). Sammenlignende evaluering av ulike elektriske metoder som brukes til å vurdere kloridtransport i betong. s. 7-13. Hentet fra https://www.researchgate.net/publication/324361434_COMPARATIVE_EVALUATION_OF_VARIOUS_ELECTRICAL_METHODS_USED_TO_ASSESS_CHLORIDE_TRANSPORT_IN_CONCRETE
- Diagne, M., Ibrahima, D., & Gueye, O. (2021, 29. juni). Innflytelse av ulike typer fyllstoffer på bearbeidbarhet, utblødning, trykkfasthet og komprimeringsgrad for hydraulisk betong. *Vitenskapelig forskning*. doi:10.4236/msa.2021.126019
- Duran Atış, C. (2003, april). Konstruksjon og byggematerialer. *Akselerert karbonatisering og testing av betong laget med flyveaske*, s. 147-152.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00116-2)
- EPOXY FLISER PÅ GULV. (2021, 19. mai). *BS 6319-2: Hvordan sjekke trykkfastheten til harpiksgulv*. Hentet fra <https://www.epoxytileflooring.com/2021/05/bs-6319-2-how-to-check-compressive.html>

- Den europeiske sammenslutningen av betongtilsetningsstoffer . (2021).
Betongtilsetningsstoffer Mykgjørere og superplastisatorer. Hentet fra
<http://www.efca.info/download/plasticisers-and-superplasticisers-epd-2015/>
- Fadhil, M. N., Haruna, S., Mohammed, B. S., & Sha'aban, I. G. (2017, 17. november).
Metoder for herding av geopolymertbetong: En gjennomgang. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*.
doi:<https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005>
- FN-Sambandet. (2023, 21. mars). *Klimaendringer*. Hentet fra
<https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>
- Gagg, C. R. (2014, 10. februar). Sement og betong som ingeniørmateriale: En historisk vurdering og casestudieanalyse. *Engineering Failure Analysis*, s. 1.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- GCP. (n.d.). *Malt granulert slagg fra masovnen: Dens kjemi og bruk med kjemiske tilsetningsstoffer*. Hentet fra <https://ca.gcpat.com/en/solutions/products/strux-synthetic-macro-fibers/ground-granulated-blast-furnace-slagg-its-chemistry>
- Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J. (2015). *EFC Geopolymer Betong Flyfortau i Brisbane West*. Hentet fra https://www.wagner.com.au/media/1512/bwwa-efc-pavements_2015.pdf
- Gregory, J., & Logan, A. (2021, 8. januar). *Concrete*. Hentet fra MIT Climate Portal:
<https://climate.mit.edu/explainers/concrete>
- Hardjito, D., & Tsen, M. (2008). Styrke og termisk stabilitet av flyveaskebasert geopolymertmørtel. *Den tredje internasjonale konferansen*. Hentet fra
https://www.researchgate.net/publication/42428614_Strength_and_Thermal_Stability_of_Fly_Ash_Based_Geopolymer_Mortar
- Heidelberg Materials. (u.å.). *Herdeteknologi*. Hentet fra
https://www.sement.heidelbergmaterials.no/sites/default/files/assets/document/bb/11/herdeteknologi_lav.pdf

- Heidelberg Materials. (u.å.). *Sementproduksjon og CO2*. Hentet fra <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/sementproduksjon-co2>
- Helseth, L. E. (2021, 7. november). *Monomer*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/monomer>
- Jahren, P. (2012). *Betong - Mangfold og muligheter*. Trondheim: Akademika forlag.
- Jiang, H., Wang, L., Gao, B., Li, Y., Guo, Y., Zhuo, M., . . . Li, Y. (2021, 15. oktober). Anolyten er viktig: Mot høyeffektiv elektrokjemisk CO2-reduksjon. *Chemical Engineering Journal*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129923>
- Ketana, N. S., Reddy, V. S., Rao, M. S., & Shrihari, S. (2021, 21. oktober). Effekten av ulike parametere på bearbeidbarheten og styrkeegenskapene til geopolymerbetong. *E3S - Web of Conferences*. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901102>
- Kontrollrådet. (2018, 22. mars). *Betongens historie*. Hentet fra <https://kontrollbetong.no/aktuelt/betongens-historie/>
- Kopecskó, K., & Balázs, G. (2017, august). Betong med forbedret kloridbinding og kloridresistivitet ved hjelp av blandede sementer. *Fremskritt innen materialvitenskap og -teknikk*. doi:10.1155/2017/7940247
- LCA. (u.å.). *Miljøpåvirkninger EN 15804 +A2*. Hentet fra <https://lca.no/miljopavirkninger/>
- LCA Norge. (u.å.). *Hva er LCA?* Hentet fra <https://lca.no/hva-er-lca/>
- Livsløpsvurdering. (2020, 17. juli). *Livsløpsvurdering (LCA) forklart*. Hentet fra <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>
- MATEST. (u.å.). *Vicatronic, vicat-apparat i karbonfiber*. Hentet fra <https://www.matest.com/en/product/e044n-vicatronic-automatic-computerized-tropicalized-vicat-recording-apparatus>

Mavračić, J., Mocanu, F. C., Deringer, V. L., Csányi, G., & Elliott, S. R. (2018, 15. mai). *Likhet mellom amorfe og krystallinske faser: The Case of TiO₂*. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b01067>

McKenna Group. (n.d.). *Fordeler og ulemper ved bruk av BIM*. Hentet fra <https://mckenna.group/2021/02/08/advantages-disadvantages-bim/>

Meyer, R. W. (2021). *avbinding (størkning)*. Hentet fra Store Norske Leksikon: https://snl.no/avbinding_-_storkning

Mishra, G. (u.å.). *Betongens setningstest for bearbeidbarhet: Prosedyre og resultater*. Hentet fra <https://theconstructor.org/concrete/concrete-slump-test/1558/>

Multiconsult. (u.å.). *LCA og klimagassregnskap*. Hentet fra <https://www.multiconsult.no/tjenester/lca-og-klimagassregnskap/>

Muwashee, R. S., & Al-Jameel, H. A. (2021). Evaluering av påvirkningen av silikastøv på utvalgte sementmørtelegenskaper. *Journal of Physics Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/1973/1/012172

Maage, M. (2015). *Betong - Regelverk, teknologi og utførelse*. (M. Maage, red.) Bergen: Byggenæringens Forlag AS.

Nasjonalt senter for bioteknologisk informasjon. (2023, 10. februar). *Natriumhydroksid*. Hentet fra <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/14798>

Neville, A., & Aitcin, P.-C. (1998, mars). Høyytelsesbetong - En oversikt. *Materialer og strukturer*. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02486473>

Nitka, M. og Tejchman, J. (2020, 19. september). Sammenlignende DEM-beregninger av bruddprosessen i betong med reelle kantede og kunstige sfæriske tilslag. *Engineering Fracture Mechanics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107309>

Nordic BIM Group. (u.å.). *Bygningsinformasjonsmodellering: BIM i går, i dag og i morgen*. Hentet fra <https://www.nordicbim.com/no/alt-om-bim-bygningsinformasjonsmodellering-fra-vugge-til-grav>

- Nordtest. (1999). *NT Build 492*. Hentet fra <https://salmanco.com/wp-content/uploads/2018/10/NT-Build-492.pdf>
- Parshwanath, R. N., Nataraja, M. C., & Lakshmanan, N. (2011, november). En introduksjon til geopolymerbetong. *ResearchGate*, s. 1. Hentet fra https://www.researchgate.net/publication/285666741_An_introduction_to_geopolymer_concrete
- Patil, S. V., Karikatti, V. B., & Chitawadagi, M. (2018, august). Granulert blåseslagg (GGBS) basert på geopolymerbetong - en gjennomgang. *International Journal of Advanced Science and Engineering*.
doi:<https://doi.org/10.29294/IJASE.5.1.2018.789-885>
- Pavement Interactive. (n.d.). *Fuktighetsinnhold*. Hentet fra <https://pavementinteractive.org/reference-desk/materials/aggregate/moisture-content/>
- Pemat (u.å.). *ZK 50 HE Tekniske detaljer*. Hentet fra https://www.pemat.de/wp-content/uploads/2018/04/zk50he_zyklos_td_e.pdf
- Pilehvar, S., Duy Cao, V., Szczotok, A. M., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., . . . Kjøniksen, A.-L. (2018, 2. april). Fysiske og mekaniske egenskaper til flyveaske og slaggegeopolymer. *Konstruksjons- og byggematerialer*, s. 28-39.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.016>
- Ramagiri, K. K., Chintha, R., Bandlamudi, R. K., Maeijer, P. K., & Kar, A. (2021). Vuggetil-port-livssyklus og økonomisk vurdering av bærekraftige betongblandinger - Alkali-aktivert betong (AAC) og bakteriebetong (BC). *Infrastrukturer*.
Hentet fra <https://www.mdpi.com/2412-3811/6/7/104>
- Rodriguez, J., Ortega, L. M., & Casal, J. (1997, 31. august). Bæreevne for betongkonstruksjoner med korrodert armering. *Construction and Building Materials*. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00043-3)

- Ross, J. H., Genedy, M., Juenger, M. C., & van Oort, E. (2022, 25. oktober). Gjenoppretting av permeabilitet ved selvhelbredelse av klasse F flyveaskebaserte geopolymere. *CEMENT*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100048>
- Saeed, A., Najm, H. M., Hassan, A., Sabri Sabri, M. M., Qaidi, S., Mashaan, N. S., & Ansari, K. (2022, 21. november). Egenskaper og bruksområder for geopolymerekompositter: A review Study of Mechanical and Microstructural Properties. *materials*, s. 5-9. doi:<https://doi.org/10.3390/ma15228250>
- Saha, A. K. (2018, januar). Effekten av flyveaske i klasse F på betongens bestandighetsegenskaper. *Sustainable Environment Research*, 28(1), s. 25-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.setj.2017.09.001>
- Saleh, H. M., & Eskander, S. B. (2020). Innovative sementbaserte materialer for miljøvern og restaurering. *Nye materialer i bygg- og anleggsteknikk*. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00018-1>
- Samferdsel og infrastruktur. (2019, 27. januar). *Geopolymerbetonger, hva er nå det?*
Hentet Mars 9, 2023, fra
<https://www.samferdselinfra.no/geopolymerbetonger-hva-er-na-det/>
- Seehusen, J. (2021, 21. juni). *Vi bruker betong nok til å bygge 32 søyler til månen hvert år*.
Hentet fra Teknisk Ukeblad: <https://www.tu.no/artikler/vi-bruker-betong-nok-til-a-bygge-32-soyler-til-manen-hvert-ar-br/509660>
- Setina, J., Gabrene, A., & Juhnevic, I. (2013). Effekten av puzzolaniske tilsetningsstoffer på struktur og kjemisk holdbarhet av. *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*, s. 1006. Retrieved from
<https://core.ac.uk/download/pdf/82052144.pdf#:~:text=With%20a%20continuing%20supply%20of%20moisture%2C%20the%20lime,SiO2%20%3D%203CaO%20%20%2B%20SiO2%20%2B%203H2O%20%281%29>
- SimaPro. (n.d.). *Om SimaPro*. Hentet fra <https://simapro.com/about/>

- Singh, B. P., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015, 15. juni). Geopolymerbetong: En gjennomgang av noen nyere utviklinger. *Construction and Building Materials*, s. 79. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Singh, M., Siddique, R., & Singh, J. (2022). Flyveaske fra kull. *Sustainable Concrete made with Ashes and Dust from Different Sources*, s. 1-29. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824050-2.00012-7>
- SINTEF. (2010). *Tilsetningsstoffer for betong*. Hentet fra https://www.byggforsk.no/dokument/590/tilsetningsstoffer_for_betong
- Standard Norge. (2004). Eurokode 2 - Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Generelle regler og regler for bygninger. *NS-EN 1992-1-1:2004+AI:2014+NA:2021*. Hentet fra <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1365301>
- Standard Norge. (2006). Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Krav og retningslinjer (ISO 14044:2006). *NS-EN ISO 14044:2006*. Hentet fra <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=195484>
- Standard Norge. (2013). Betong - Spesifikasjon, ytelse, produksjon og samsvar. *NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2022*. Hentet fra <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1447838>
- Standard Norge. (2016). Sementprøving - Del 3: Bestemmelse av størkningstid og volumbestandighet. *NS-EN 196-3:2016*. Hentet fra <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=877507>
- Standard Norge. (2019). Prøving av fersk betong - Del 1: Prøvetaking og vanlig utstyr. *NS-EN 12350-1:2019*. Hentet fra <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1106510>

- Standard Norge. (2019). Prøving av fersk betong - Del 5: Utbredelsesmål. *NS-EN 12350-5:2019*. Hentet fra <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1106514>
- Standard Norge. (2022, 23. desember). *Organisering og digitalisering av informasjon om byggverk - ISO 19650-serien*. Hentet fra Fagområder: bygg, anlegg og eiendom: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/digital-byggeprosess/iso-19650-serien/>
- Standard Norge. (2022). Standard praksis for måling av hydratiseringskinetikk for hydrauliske sementblandinger ved bruk av isotermisk kalorimetri. *ASTM C1679:22*. Hentet fra <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1502984>
- Statens vegvesen. (2009). *Metode for beregning av energiforbruk*. Hentet fra <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/193232?show=full>
- Statistisk sentralbyrå. (2019, 28. august). *Transport står for 30 prosent av klimautslippene i Norge*. Hentet fra <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/transport-star-for-30-prosent-av-klimautslippene-i-norge>
- Taffase, W. Z., & Espinosa-Leal, L. (2023, 9. april). Multitarget regresjonsmodeller for å forutsi trykkfasthet og kloridbestandighet for betong. *Journal of Building Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106523>
- The Engineering Toolbox. (u.å.). *Varmekapasitet*. Hentet fra https://www.engineeringtoolbox.com/heat-capacity-d_338.html?fbclid=IwAR18smygbe5Zyu-_2228KaSyA0VMjThho2u9jTtFyp5rlXaONvYgzQ2uJpQ
- Det internasjonale EPD-systemet. (2019). *EPD for gjennomsnittlig malt granulert masovnslegg*. JSW. Hentet fra <https://www.environdec.com/library/epd1415>

Thue, J. V. (2019, 11. september). *korngradering*. Hentet fra Store Norske Leksikon:
<https://snl.no/korngradering>

FNs miljøprogram. (2021). *2021 Global statusrapport*. Hentet fra
https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf

Vegdirektoratet. (2014, juni). Statens vegvesen, HB-R210 - Laboratorieundersøkelser. Vegdirektoratet. Hentet fra
<https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r210-laboratorieundersokelser-2016.pdf>

Verma, M., & Dev, N. (2021, februar). Effekten av forholdet mellom malt granulert masovns slag og flyveaske og herdeforholdene på de mekaniske egenskapene til geopolymertbetong. *Structural Concrete*. Hentet fra
https://www.researchgate.net/publication/349428153_Effect_of_ground_granulated_blast_furnace_slagg_and_flueaske_forhold_og_herdeforhold_på_geopolymerbetongens_mekaniske_egenskaper

Wadsö, L. (2005). *Isothermal kalorimetri av sement*. Hentet fra
https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/08/09IsothermalCalorimetry_000.pdf

WAGNERS. (n.d.). *GLOBAL CHANGE INSTITUTE (GCI) BUILDING*. Hentet fra
<https://www.wagner.com.au/main/our-projects/global-change-institute-gci-building/>

9 Vedlegg

Vedlegg 1: 14.02 23 - Første oppskrift i oppskriftsutviklingen; GP1.1, GP1.2, GP2.1, GP2.2, GP3.1, GP3.2, GP4.1 og GP4.2

Series 14/2/2023							
GP1.1				GP1.2			
60FA/40GGBFS	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33GGBFS	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	10,0	0,40	10,00	Fly ash	10,0	0,40	10,00
Slag	6,8		6,80	Slag	6,8		6,80
Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10	Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10
NaOH	2,7		2,70	KOH	2,7		2,70
Extra water	1,7	0,50	1,70	Extra water	1,7	0,50	1,70
SUM	23,6		23,6	SUM	23,6		23,6
	mol/liter				mol/liter		
Molarity NaOH	14			Molarity KOH	14		

Series 14/2/2023							
GP2.1				GP2.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Faktisk oppmålt [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Faktisk oppmålt [g]
Fly ash	16,8	0,40	16,79	Fly ash	16,8	0,40	16,80
Slag	8,4		8,40	Slag	8,4		8,40
Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00	Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00
NaOH	4,0		4,00	KOH	4,0		4,00
Extra water			0,00	Extra water			0,00
SUM	35,2		35,2	SUM	35,2		35,2
	mol/liter				mol/liter		
Molarity NaOH	14			Molarity KOH	14		

Series 14/2/2023							
GP3.1				GP3.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	10,0	0,40	10,00	Fly ash	10,0	0,40	10,00
Slag	6,8		6,80	Slag	6,8		6,80
Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10	Na ₂ SiO ₃	4,1		4,10
NaOH	2,7		2,70	KOH	2,7		2,70
Extra water	1,7	0,50	1,70	Extra water	1,7	0,50	1,70
SUM	25,3		25,3	SUM	25,3		25,3
	mol/liter				mol/liter		
Molarity NaOH	10			Molarity KOH	10		

Series 14/2/2023							
GP4.1				GP4.2			
60FA/40SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]	67FA/33SI	Recipe [g]	L/B	Measured [g]
Fly ash	16,8	0,40	16,79	Fly ash	16,8	0,40	16,80
Slag	8,4		8,40	Slag	8,4		8,40
Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00	Na ₂ SiO ₃	6,0		6,00
NaOH	4,0		4,00	KOH	4,0		4,00
Extra water			0,00	Extra water			0,00
SUM	35,2		35,2	SUM	35,2		35,2
	mol/liter				mol/liter		
Molarity NaOH	10			Molarity KOH	10		

Vedlegg 2: 16.02.23 - Beregnet oppskriftsmasse til TAM-test, (Ikke målt= N/M)

	GP1.1		GP1.2		GP2.1		GP2.2	
Recipe (R)/ actual (A)	R	A	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,37g	N/M	2,37g	N/M	2,864g	N/M	2,864g	N/M
m_{GGBFS}	1,613g	N/M	1,613g	N/M	1,432g	N/M	1,432g	N/M
$m_{Na_2SiO_3}$	0,972g	N/M	0,972g	N/M	1,023g	N/M	-	N/M
m_{NaOH}	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M	-	N/M
m_{KOH}	-	-	0,640g	N/M	-	-	0,640g	-
m_{H_2O}	0,403g	N/M	0,403g	N/M	-	N/M	-	N/M
	GP3.1		GP3.2		GP4.1		GP4.2	
Recipe(R)/ actual(A)	R	A	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,37g	N/M	2,37g	N/M	2,8644g	N/M	2,8644g	N/M
m_{GGBFS}	1,613g	N/M	1,613g	N/M	1,4322g	N/M	1,4322g	N/M
$m_{Na_2SiO_3}$	0,972g	N/M	0,972g	N/M	1,023g	N/M	1,023g	N/M
m_{NaOH}	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M	-	-
m_{KOH}	-	-	0,640g	N/M	-	-	0,640g	N/M
m_{H_2O}	0,403g	N/M	0,403g	N/M	-	-	-	-

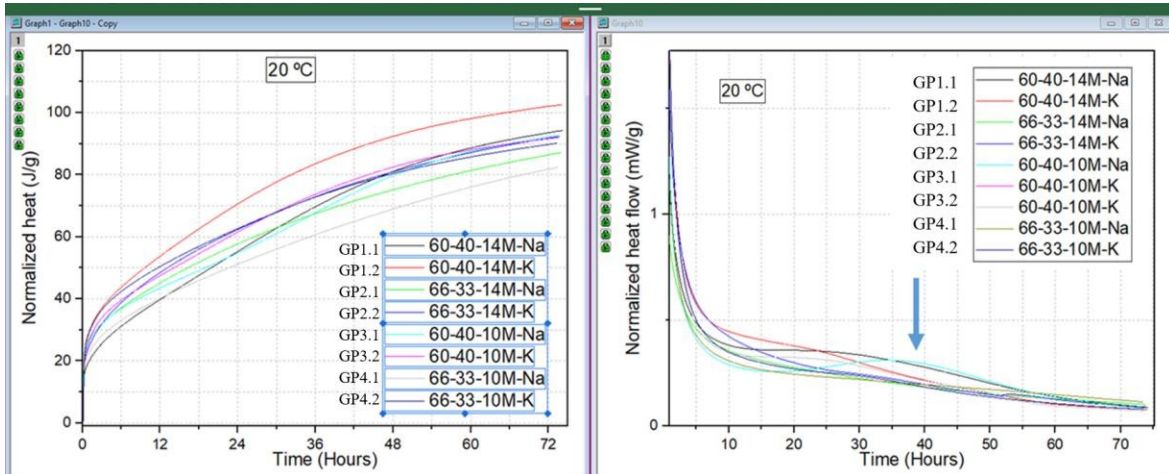
Vedlegg 3: 16.02.23 - Total masse i ampuller

	GP1.1	GP1.2	GP2.1	GP2.2	GP3.1	GP3.2	GP4.1	GP4.2
Ampoule nr.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
m_{Ampoules}	6,120g	6,398g	5,990g	6,492g	6,066g	6,058g	6,410g	6,419g

Vedlegg 4: 16.02.23 - Referansemasse - vann, m_{ref} og målt masse

	m_{ref} (water)	Measured mass
GP1.1 – Ampoule B1	1,538g	1,538g
GP1.2 – Ampoule B2	1,610g	1,611g
GP2.1 – Ampoule B3	1,193g	1,190g
GP2.2 – Ampoule B4	1,270g	1,270g
GP3.1 – Ampoule B5	1,538g	1,539g
GP3.2 – Ampoule B6	1,610g	1,602g
GP4.1 – Ampoule B7	1,193g	1,190g
GP4.2 – Ampoule B8	1,270g	1,275g

Vedlegg 5: 21.02.23 - Innledende TAM-test, GP1.1-GP4.2

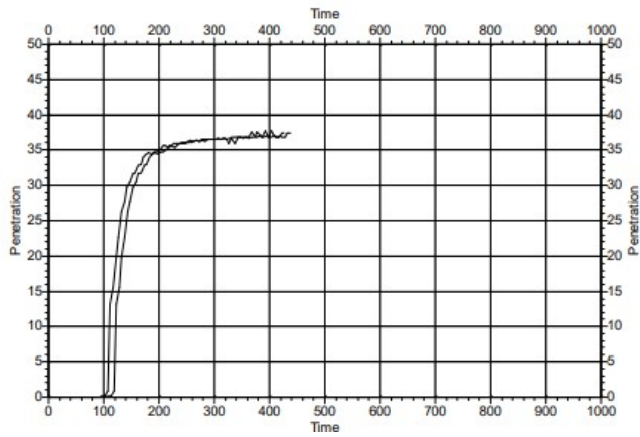


Vedlegg 6: 22.02.23 - Flyt av bombekaster, 15 treff/15 sekunder

Recipe	Values from cross measuring	Final flow
GP1.1	$\frac{21cm + 22,5cm}{2}$	21,75cm
GP1.2	$\frac{22,3cm + 22,5cm}{2}$	22,4cm
GP3.1	$\frac{21cm + 22,5cm}{2}$	22,5cm

CERTIFICATE

TEST NUMBER : 01	DATE OF TEST : 24/02/2023	FINAL SETTING : NO
KIND OF TEST : EN196-3:2005	SPECIMEN TIME : 13:42:00	TIME [m] : 5
POINTS MOVE [mm]	START DELAY[m]: ---	
30 4.00	1ST PEN TIME : 13:55:00	
24 5.25	SPECIMEN TYPE : C2	
18 5.25	WATER CONT.[%]: 50.0	
12 5.25	TEMPERATUR[°C]: 22.7	
2 5.25	HUMIDITY[%] : 24.2	
OPERATOR CODE : CJ	FALL TYPE : FREE	
CUSTOMER CODE : GP11	TIME TYPE : FIXED	



Vedlegg 8: 24.02.23 - Opprettelse av GP5.2, endring av GP1.2

GP5.2	Amount, mass
FA	270g
GGBFS	180g
Na ₂ SiO ₃	135,7g
KOH (14M)	89,3g
Sand	1350g
H ₂ O	10g
SP viscocrete, Sika® (2% of total binder)	9g

Vedlegg 9: 24.02.23 - Flyt av bombekaster, 15 treff/15 sekunder

	Flow	Slump
GP5.2	140mm	33mm

Vedlegg 10: 24.02.23 - Trykkfasthet, 1 døgn, 50 mm x 50 mm x 50 mm kuber, mørtel

Recipe	Applied force	Force per surface area
GP1.1	10,9kN	4,36 $\frac{N}{mm^2}$
GP1.2	29,2kN	11,68 $\frac{N}{mm^2}$
GP3.1	12,2kN	4,88 $\frac{N}{mm^2}$

Vedlegg 11: 28.02.23 - Trykkfasthet, 4 døgn, 50 mm x 50 mm x 50 mm kuber, mørtel

GP5.2 – 4 day test, compressive strength			
Nr.	Density, dry	Applied force	Force per surface area
1	$2357,6 \frac{kg}{m^3}$	107,8kN	$43,04 \frac{N}{mm^2}$
2	$2354,6 \frac{kg}{m^3}$	76,9kN	$30,76 \frac{N}{mm^2}$
3	$2348,8 \frac{kg}{m^3}$	99,8kN	$39,92 \frac{N}{mm^2}$

Kube nr. 2 var ikke plassert i midten av trykkområdet, noe som resulterte i en ikke vinkelrett kraftpåføring. Dette førte sannsynligvis til lavere trykkfasthet.

Vedlegg 12: 28.02.23 - Trykkfasthet, 1 døgn, 50 mm x 50 mm x 50 mm kuber, mørtel

Compressive strength, 5 days			
Nr.	Recipe	Density	Force per surface area
2	GP1.1	$2236,8 \frac{kg}{m^3}$	$27,6 \frac{N}{mm^2}$
3	GP1.1	$2226,4 \frac{kg}{m^3}$	$28,08 \frac{N}{mm^2}$
2	GP1.2	$2199,2 \frac{kg}{m^3}$	$26,08 \frac{N}{mm^2}$
3	GP1.2	$2230,4 \frac{kg}{m^3}$	$31,64 \frac{N}{mm^2}$
2	GP3.1	$2188,8 \frac{kg}{m^3}$	$20,44 \frac{N}{mm^2}$
3	GP3.1	$2226,4 \frac{kg}{m^3}$	$22,68 \frac{N}{mm^2}$

Vedlegg 13: 28.03.25 - Utarbeidelse av miks for flytetest av mørtel og 50 mm x 50 mm kuber

	GP1.2-0,45	GP1.2-0,50
FA	270g	270g
GGBFS	180g	5,974g
Na ₂ SiO ₃	108,56g	108,56g
KOH	71,44g	71,44g
H ₂ O	45g	22,5g
Sand	1350g	1350g
SP - flube	-	9g

Vedlegg 14: 28.02.23 - Flyt av bombekaster, 15 treff/15 sekunder

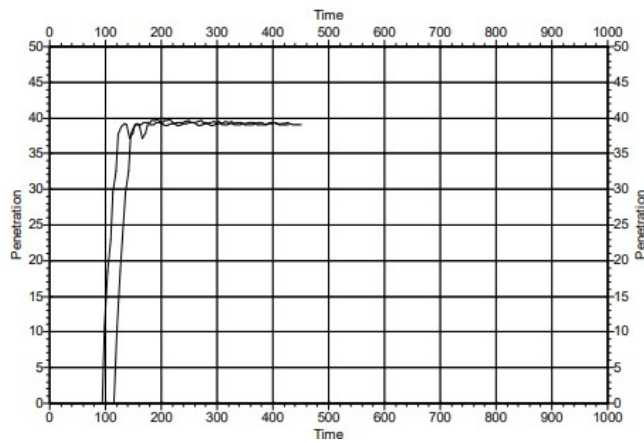
Recipe	Values from cross measuring	Final flow
GP1.2-0,45	$\frac{14,5cm + 14,5cm}{2}$	14,5cm
GP1.2-0,50	$\frac{11,1cm + 11,5cm}{2}$	11,3cm

Vedlegg 15: 01.03.23 - Opprettelse av GP5.2-pastablanding for Vicat-test

GP5.2 paste mix	
FA	270,0g
GGBFS	180,0g
Na ₂ SiO ₃	135,7g
KOH	89,3g
H ₂ O	10,0g
SP - viscocrete	9,0g

CERTIFICATE

TEST NUMBER : 02	DATE OF TEST : 01/03/2023	FINAL SETTING : NO
KIND OF TEST : EN196-3:2005	SPECIMEN TIME : 15:14:00	TIME [m] : 5
POINTS MOVE [mm]	START DELAY[m]: ---	
30 4.00	1ST PEN TIME : 15:40:00	
24 5.25	SPECIMEN TYPE : C2	
18 5.25	WATER CONT.[%]: 52.0	
12 5.25	TEMPERATUR[°C]: 23.3	
2 5.25	HUMIDITY[%] : 22.1	
OPERATOR CODE : CJ	FALL TYPE : FREE	
CUSTOMER CODE : GP52	TIME TYPE : FIXED	



Vedlegg 17: 01.03.23 - Beregnet masse til TAM-test

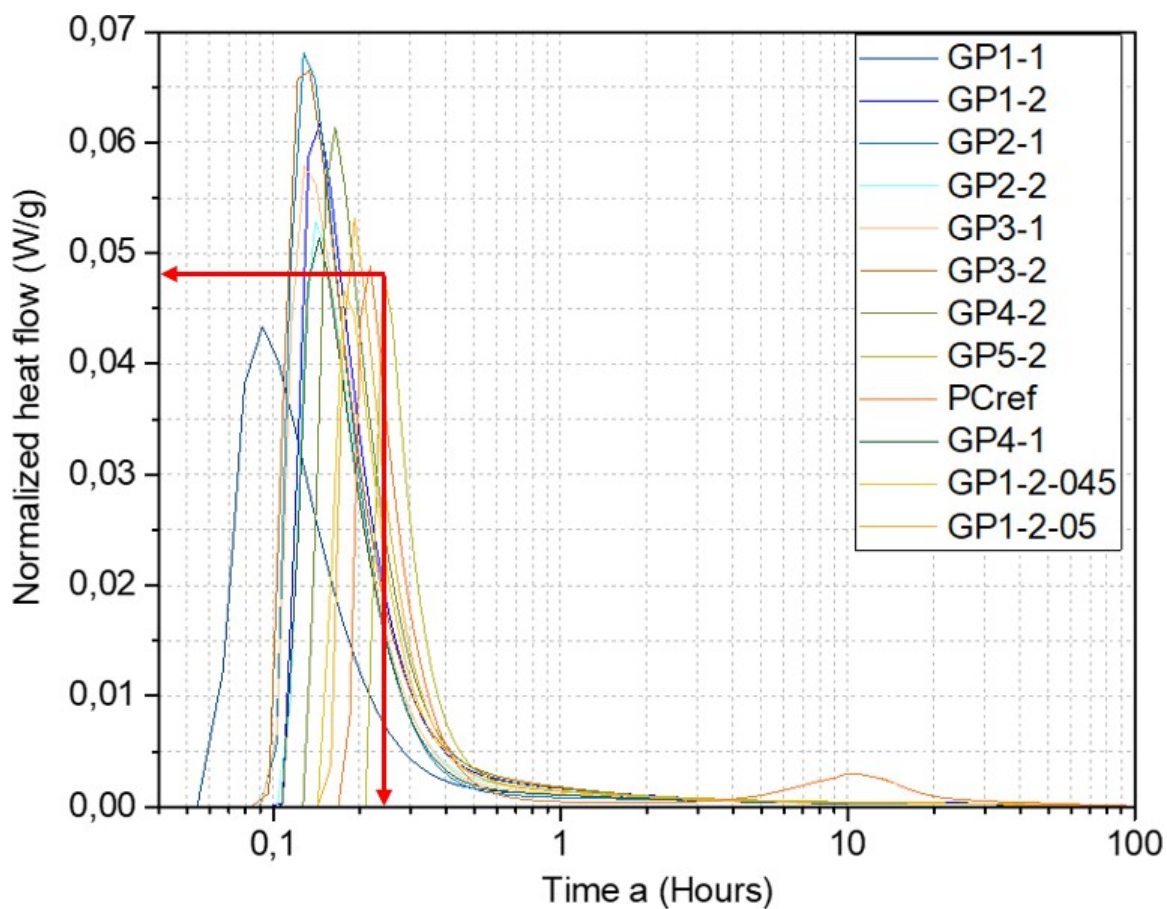
	GP5.2		GP1.2-0,45		GP1.2-0,50	
Recipe (R)/ actual (A)	R	A	R	A	R	A
m_{FA}	2,334g	2,330g	2,449g	2,450g	2,400g	2,400g
m_{GGBFS}	1,556g	1,560g	1,633g	1,630g	1,600g	1,600g
$m_{Na_2SiO_3}$	1,173g	1,178g	0,985g	0,986g	1,965g	0,965g
m_{NaOH}	-	-	-	-	-	-
m_{KOH}	0,772g	0,790g	0,648g	0,650g	0,635g	0,629g
m_{H_2O}	0,086g	0,085g	0,204g	0,208g	0,400g	0,400g
$m_{SP\ visco}$	0,076g	0,073g	-	-	-	-
$m_{SP\ flube}$	-	-	0,082g	0,083g	-	-

Vedlegg 18: 01.03.23 - Total masse i ampuller

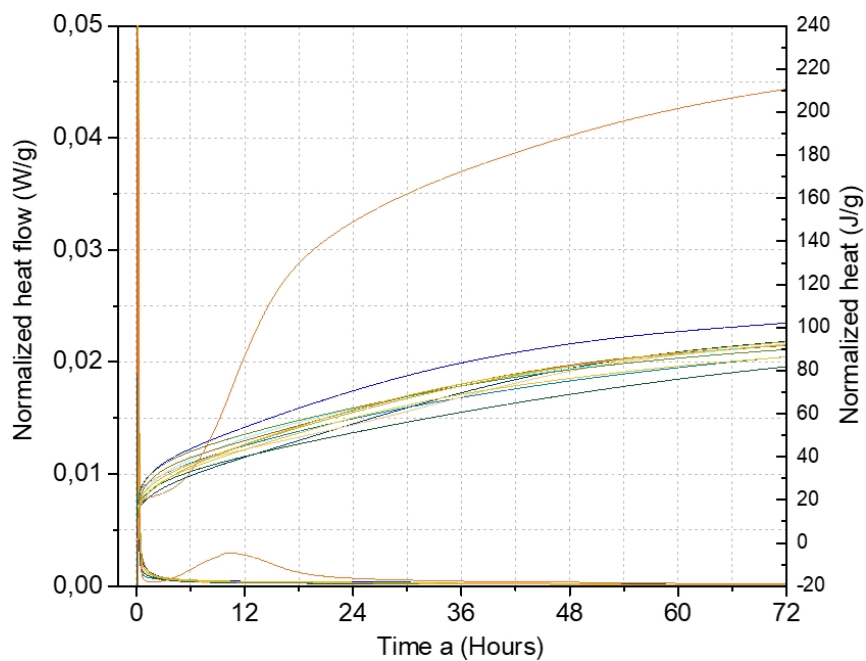
	GP5.2	GP1.2-0,45	GP1.2-0,50
Ampoule nr.	A1	A4	A5
$m_{ampoules}$	5,314	5,974g	6,021g

Compressive strength test, beams 40mmx40mm					
Recipe	Nr	Date of mixing	Curing age	Density	MPa
GP1.1		23.02.23	7	2282,7 kg/m ³	31,3
GP1.2		23.02.23	7	2275,5 kg/m ³	31,6
GP3.1		23.02.23	7	2271,6 kg/m ³	21,0
GP5.2		24.02.23	7	2289,3 kg/m³	44,9
GP1.2-0,5	1	28.02.23	1	2320,0 kg/m ³	18,6
GP1.2-0,5	2	28.02.23	1	2266,7 kg/m ³	42,1
GP1.2-0,5		28.02.23	7	2327,7 kg/m ³	19,4
GP1.2-0,45	1	28.02.23	1	1955,4 kg/m ³	9,9
GP1.2-0,45	2	28.02.23	1	1966,8 kg/m ³	9,3
GP1.2-0,45		28.02.23	7	2029,7 kg/m ³	18,3

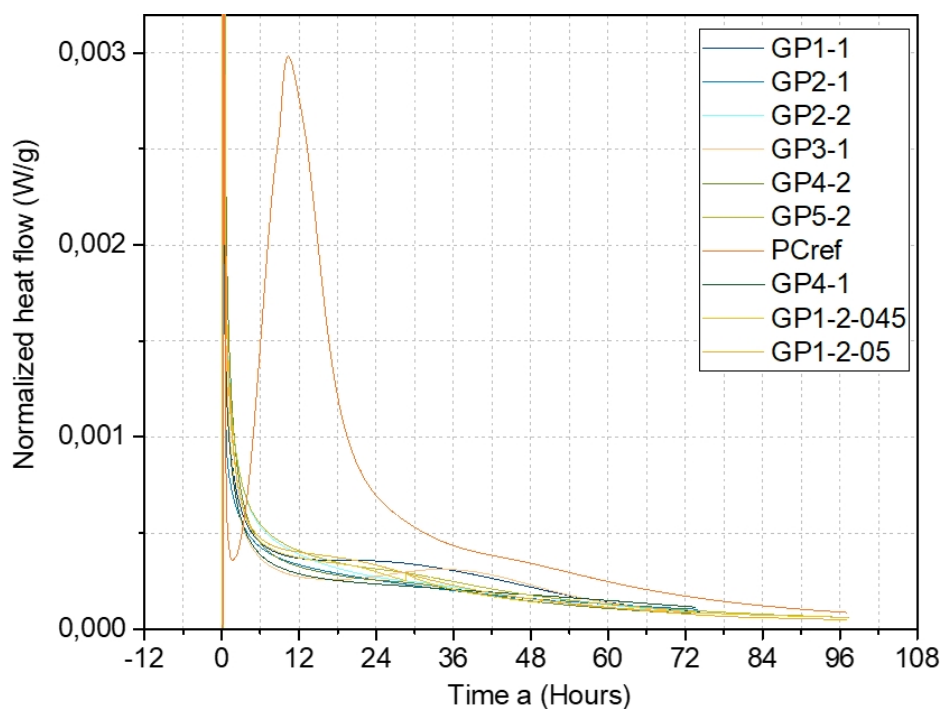
Vedlegg 20: 01.03.23 - TAM-resultater for alle oppskrifter til sammenligning, normalisert varmestrøm



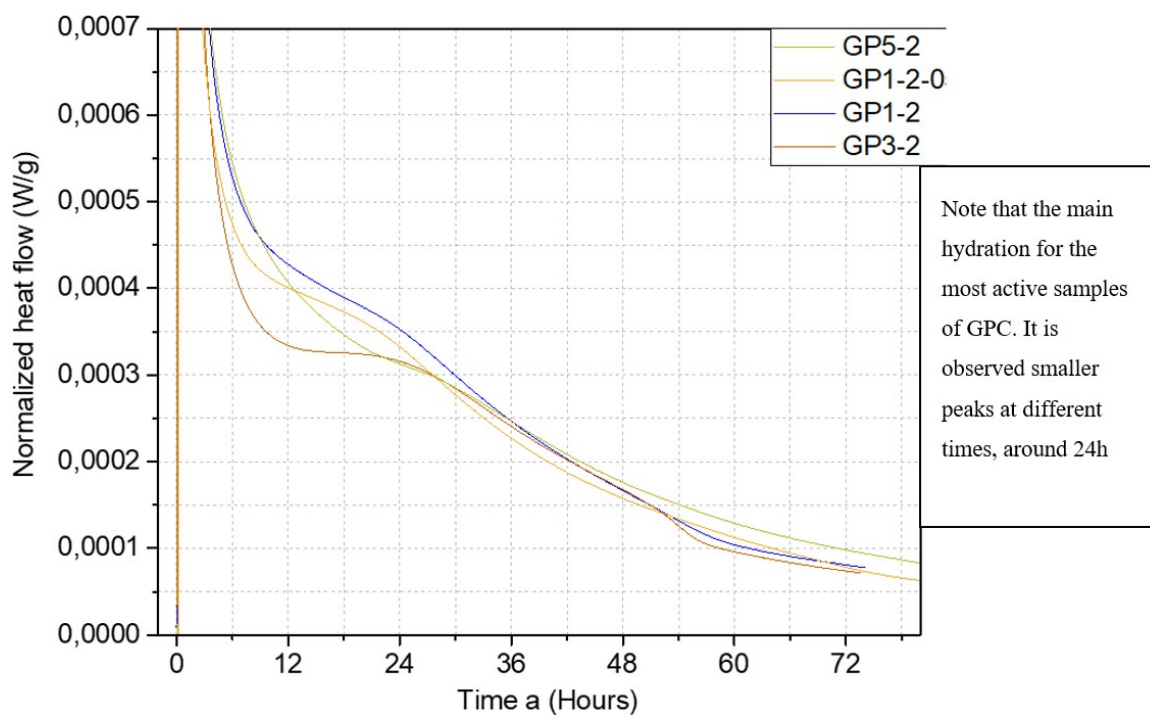
Vedlegg 21: 01.03.23 - TAM-resultater for alle oppskrifter i sammenligning, normalisert varmestrøm og normalisert varme



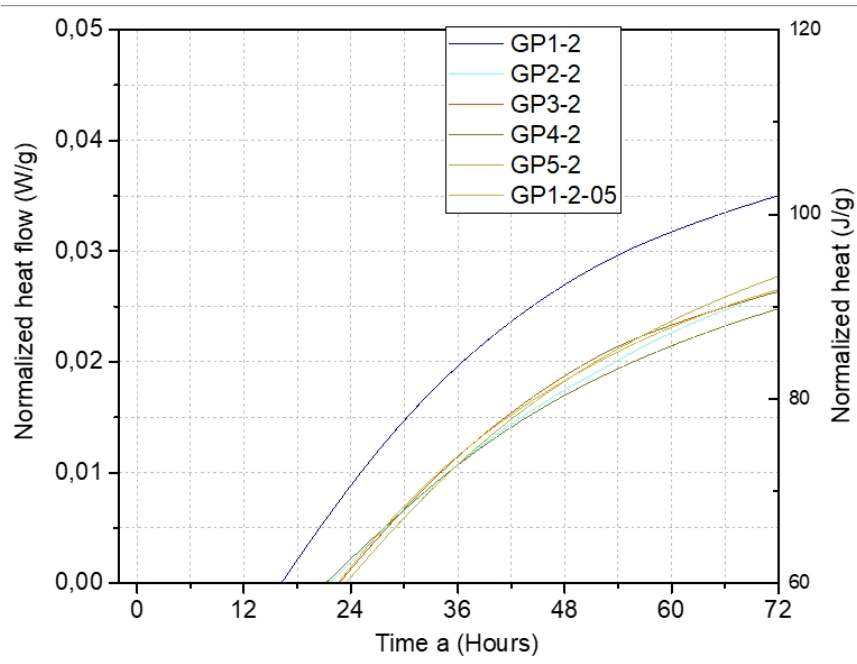
Vedlegg 22: 01.03.23 - TAM-resultater av oppskrifter i sammenligning, normalisert varmestrøm



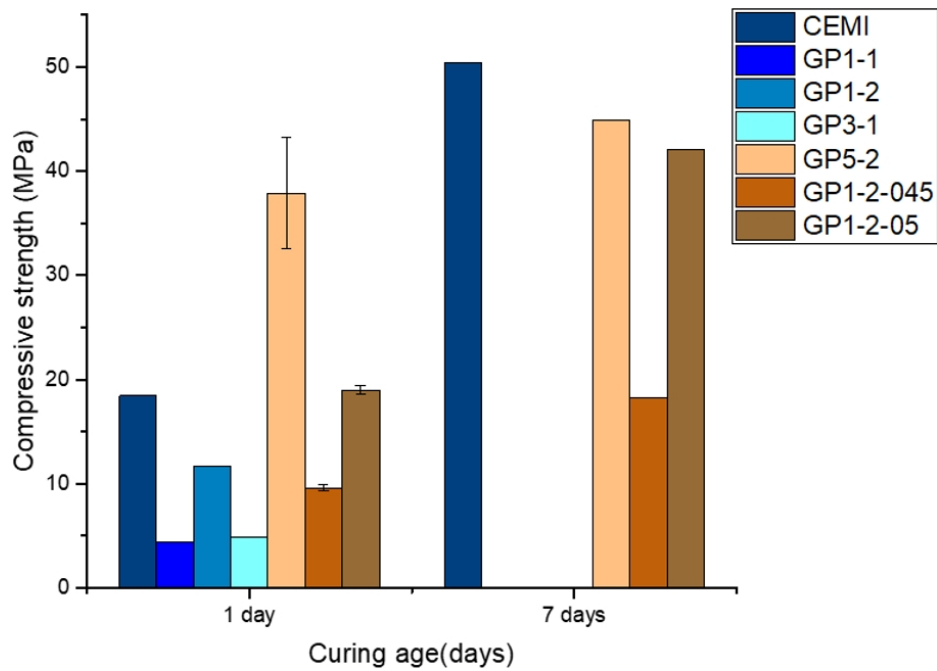
Vedlegg 23: 01.03.23 - TAM-resultater av oppskrifter i sammenligning, normalisert varmestrøm



Vedlegg 24: 01.03.23 - TAM-resultater av oppskrifter i sammenligning, normalisert varmestrøm



Vedlegg 25: 01.03.23 - Sammenligning av trykkfasthetsresultater for oppskrifter

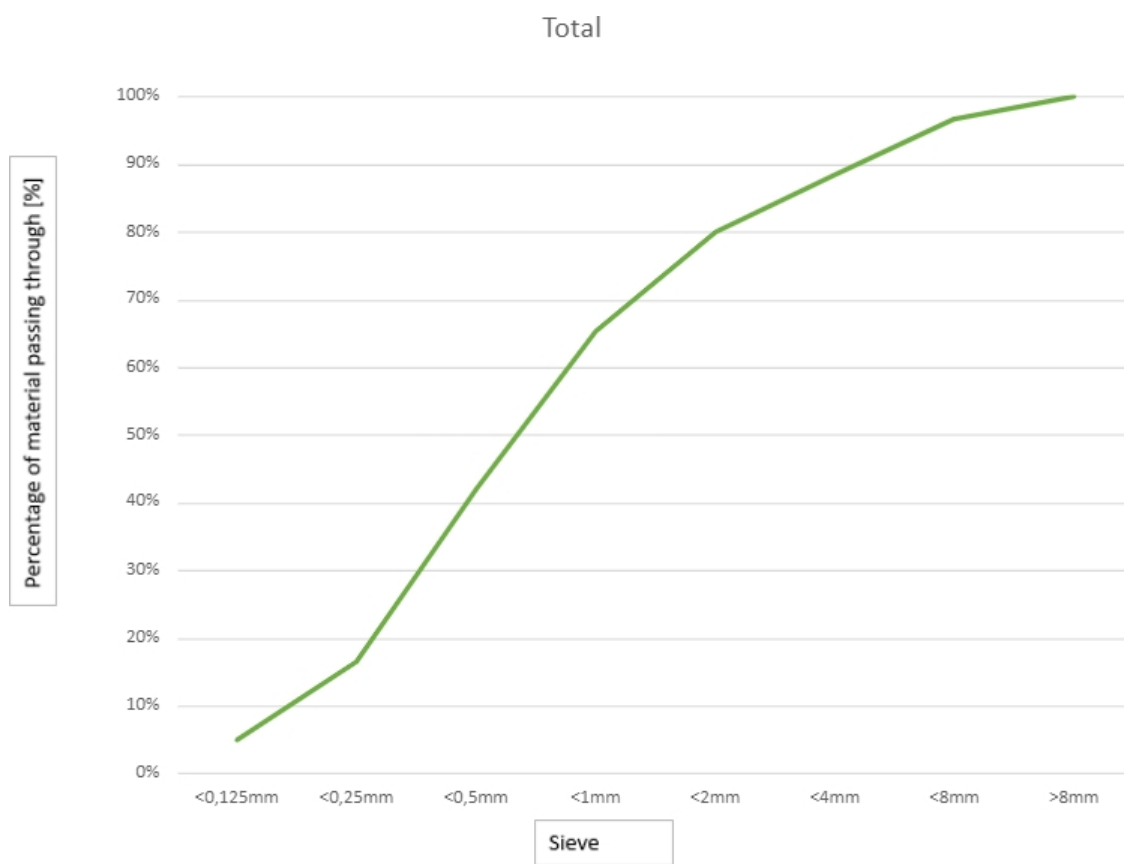


Vedlegg 26: 22.03.23 - Trykkfasthet for GP5.2, luftherdet

Compressive strength date	Curing age	Number	Strength	Notes
23.03.23	1	1	$12,9 \frac{N}{mm^2}$	Not centered
23.03.23	1	2	$13,9 \frac{N}{mm^2}$	Flaked off on one side, 6mm
29.03.23	7	1	$34,4 \frac{N}{mm^2}$	Flaked off on one side, 2mm
29.03.23	7	2	$38,8 \frac{N}{mm^2}$	
19.04.23	28	1	$54,5 \frac{N}{mm^2}$	Moist on the bottom
19.04.23	28	2	$54,7 \frac{N}{mm^2}$	

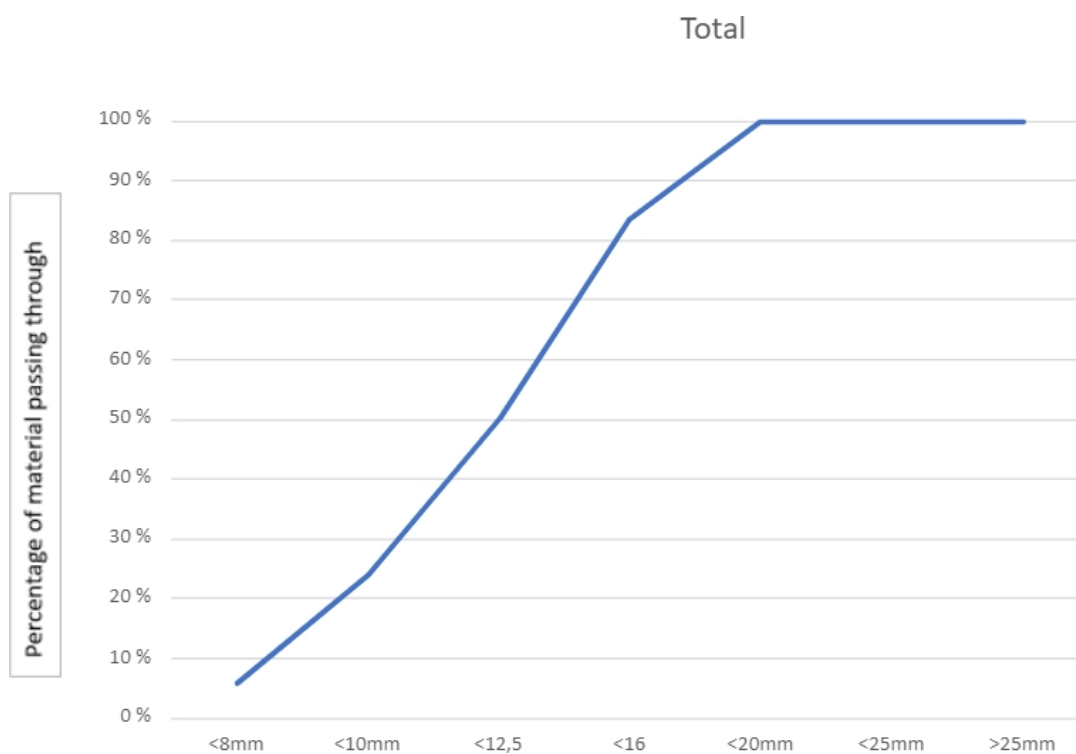
Vedlegg 27: 22.03.23 - Sikting av tilslag, 0-8 mm

Fraksjoner	Weight empty sieve [g]	Weight sand [g]	Measured sand [g]	Ratio sand/empty	Total
<0,125mm	1356	1406	50	5 %	5 %
<0,25mm	646	762	116	12 %	17 %
<0,5mm	590	842	252	25 %	42 %
<1mm	652	884	232	23 %	65 %
<2mm	732	878	146	15 %	80 %
<4mm	840	924	84	8 %	89 %
<8mm	974	1056	82	8 %	97 %
>8mm	954	986	32	3 %	100 %
Sum after sieving			994	100 %	



Vedlegg 28: 22.03.23 - Sikting av tilslag, 8-16 mm

Fraksjoner	Weight empty sieve [g]	Weight sand [g]	Measured sand [g]	Ratio sand/empty	Total
<8mm	1375,8	1551,5	175,7	6 %	6 %
<10mm	954,7	1498,1	543,4	18 %	24 %
<12,5	1060,9	1852,4	791,5	26 %	50 %
<16	1075,7	2074,1	998,4	33 %	84 %
<20mm	1368,2	1861,8	493,6	16 %	100 %
<25mm	1367	1367	0	0 %	100 %
>25mm	1257,9	1257,9	0	0 %	100 %
Sum after sieving			3002,6	100 %	



Vedlegg 29: 22.03.23 - Vanninnhold i tilslag

0-8 mm vanninnhold i tilslaget:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M)_3} * 100 = \frac{1900 - 1896}{1900 - 300} * 100 = 0,25\%$$

8-16 mm vanninnhold i tilslaget:

$$w = \frac{(M_1 - M_2)}{(M_2 - M)_3} * 100 = \frac{3500 - 3500}{3500 - 300} * 100 = 0\%$$

Vedlegg 30: Testen startet 19.04.2023 og hadde en varighet på 24 timer før måling av verdiene vist nedenfor 20.04.2023

Kloridinntrengning

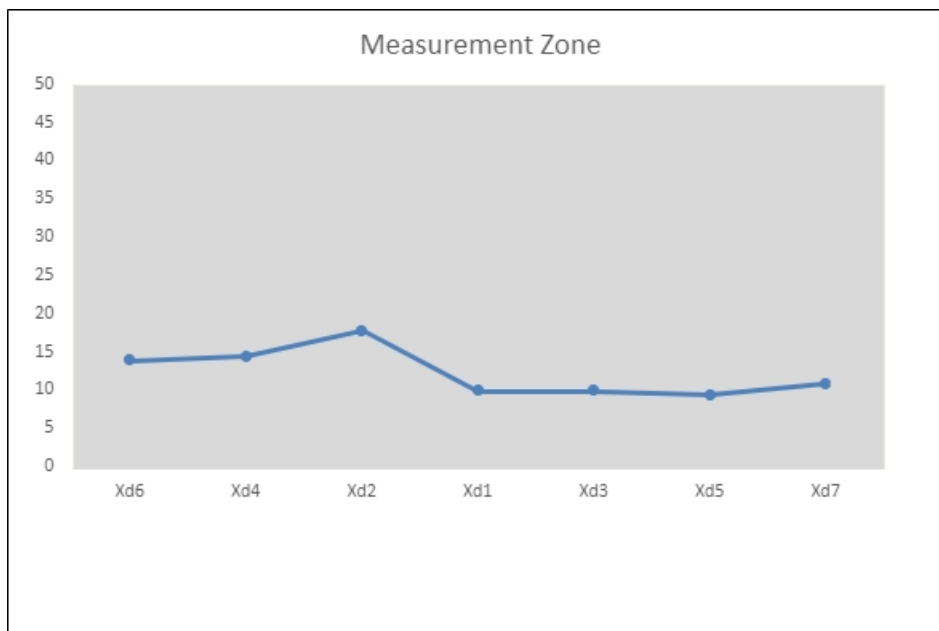
Preset conditions
10 V
24Hours
225mA

Measured values	Catholyte°C	Anolyte°C	Voltage
Start	15,2	24,5	225mA, 10V
Finish	18,2	19,3	217mA, 10,6V

Results of measured depths in GP5.2 in mm.

Xd6	Xd4	Xd2	Xd1	Xd3	Xd5	Xd7
14	14,5	17,9	10	10	9,5	11

Illustrasjon av kloridinntrengningsdybden i målesonen (mm)



Koeffisient for ikke-stasjonær migrasjon:

$$D_{nssm} = 0,0239 \cdot \frac{(273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(1 - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right)$$

Hvor?

D_{nssm} - Koeffisient for ikke-stabil tilstandsmigrasjon, $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

U- Absolutt verdi av det eksterne potensialet mellom de to elektrodene. V

=10,6V

T- Gjennomsnittsverdien av start- og sluttemperaturen i anolytten, °C. T=21,9°C

L- Tykkelse på prøven, mm. L=50,6 mm

x_d - Gjennomsnittsverdi for inntrengningsdybde, mm.

$x_d=12,4 \text{ mm}$ t- Testens varighet, timer. t=24h

$$D_{nssm} = 0,0239 \cdot \frac{(273+21,9) \cdot 50,6}{(10,6-2) \cdot 24} \cdot \left(12,4 - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273+21,9) \cdot 50,6 \cdot 12,4}{10,6-2}} \right)$$
$$D_{nssm} = 15,39 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

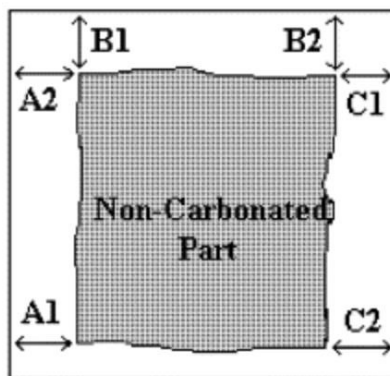
Ikke-stasjonær migrasjonskoeffisient (D_{nssm}) for de studerte betongblandingene, vann/semest-forhold på 0,55:

Resultater av karbonatiseringsalder:

Følgende formel er en formel basert på *intuisjon* og er et *forslag* til hvordan man kan bestemme alderen på en betongprøve, ut fra en hurtigkarbonatiseringstest (Duran Atiş, 2003), basert på:

- Karbonkonsentrasjon i luft, 421PPM
- Karbonkonsentrasjon i kammeret, 50000PPM
- Testprosedyrens varighet, 14 dager
- 1 år = 365 dager

$$\frac{50000PPM}{421PPM} \times \frac{14 \text{ days}}{365 \text{ year}} = 4,56 \text{ years}$$



Illustrasjon av målesoner ved måling av kloriddybder.

Mål: 2 terninger, herdet i ovn.

Kube #1	Kube nr. 2
A1: 1,5 mm	A1: 3,37 mm
A2: 0 mm	A2: 4,03 mm
B1: 7,26 mm	B1: 7,48 mm

B2: 3,67 mm	B2: 6,5 mm
C1: 1,49 mm	C1: 2,61 mm
C2: 4,06 mm	C2: 4,62 mm
D: 2 946 mm	D: 4,83 mm

Vedlegg 32: Energiforbruk i produksjonsprosessen

✓	Impact category	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer
✓	Non renewable, fossil	MJ	2,61E3	3,01E3
✓	Non-renewable, nuclear	MJ	210	564
✓	Non-renewable, biomass	MJ	0,259	0,401
✓	Renewable, biomass	MJ	47,1	97
✓	Renewable, wind, solar, geothe	MJ	85	118
✓	Renewable, water	MJ	1,79E3	1,56E3

Vedlegg 33: CO2-ekvivalenter

Se	Impact category	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer
✓	GWP100 - fossil	kg CO2-eq	386	216
✓	GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	0,593	0,599
✓	GWP100 - land transformation	kg CO2-eq	0,218	0,291

Vedlegg 34: Materialene i hver oppskrift som ble brukt i LCA-sammenligningen

No	Process	Project	Unit	LCA, CEM II/A-S 42,5 N Concrete	Lifecycle of 1m3 Geopolymer Concrete
1	Cement, blast furnace slag 6-20% (RoW) cement production, blast fu	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	kg	440	x
2	Diesel, burned in building machine (GLO) processing Cut-off, S	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	MJ	289	296
3	Electricity, medium voltage (NO) electricity voltage transformation fr	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	GJ	1,7	1,41
4	Flygeaske GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	243
5	Gravel, crushed (RoW) production Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	756
6	Ground granulated blast furnace slag (RoW) production Cut-off, S, (GP5.2 LCA analysis	kg	x	162
7	Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyd	GP5.2 LCA analysis	kg	x	7,87
8	Potassium hydroxide (RER) production Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	41,8
9	Sand (RoW) gravel and quarry operation Cut-off, S, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	kg	x	965
10	Sand (RoW) sand quarry operation, extraction from river bed Cut-of	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	1,63	x
11	Sodium silicate, solid (RER) sodium silicate production, furnace proce	GP5.2 LCA analysis	kg	x	43,9
12	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 (RER) transport, freig	Ecoinvent 3 - allocation, cut-off	tkm	116	x
13	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 (RER) transport, freig	GP5.2 LCA analysis	tkm	x	117
14	Waste concrete (Europe without Switzerland) treatment of waste con	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	2,31	x
15	Waste concrete (Europe without Switzerland) treatment of waste con	GP5.2 LCA analysis	ton	x	2,35
16	Waste scenario for landfill, GP5.2	GP5.2 LCA analysis	ton	x	2,35
17	Waste scenario landfill	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	ton	2,32	x
18	Water, completely softened (RER) market for water, completely softei	Concrete with CEM II/A-S 42,5 N	kg	242	x
19	Water, completely softened (RER) market for water, completely softei	GP5.2 LCA analysis	kg	x	91,2
20	Water, completely softened (RoW) market for water, completely softi	GP5.2 LCA analysis	kg	x	39,3

Vedlegg 35: Livefoto av forsterkning av en faktisk massiv modulvegg

