



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTETET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Konstruksjoner og materialer	Vårsemesteret, 2023 Åpen / Konfidensiell
Forfatter: Haakon Venås Årbu Anojan Shanmugam	 Signatur forfattere
Fagansvarlig ved UiS: Kjell Tore Fosså, Uis Veileder (e): Torbjørn Vrålstad, Saferock Kjell Tore Fosså, Uis	
Tittel på oppgaven: Vurdering av egenskaper til geopolymerebetong Engelsk tittel: Assessment of the properties of Geopolymer concrete	
Studiepoeng: 30	
Emneord: - Geopolymer - Alkali aktivator - Miljøvennlig - Egenskaper	Sidetall: 55 + vedlegg/annet: 76 Stavanger, (15.06.2023)

Sammendrag

Gjennom en analyse av tester, var målet å identifisere den optimale betongblandingen for geopolymere, en blanding som opprettholder de høye mekaniske egenskapene til geopolymermaterialer samtidig som den gir forbedret holdbarhet og miljø. Forventningen var at denne forskningen ville bidra til å fremme feltet for geopolymerbetong og hjelpe i overgangen til mer bærekraftige byggematerialer i fremtiden. Samarbeidet med Saferock sikret at forskningen var direkte relevant og anvendelig i den nåværende industrielle konteksten.

Geopolymere er et relativt nytt materiale som har fått betydelig oppmerksomhet i bygge- og anleggsbransjen de siste årene. Geopolymere, som kjent fra tidligere studier, er et sementfritt materiale som brukes som et alternativ til konvensjonell sementbasert betong. En av hovedfordelene med geopolymere er deres lavere CO₂-utslipp sammenlignet med konvensjonell sementbasert betong. Produksjonen av konvensjonell sement krever høye temperaturer for kalsineringsprosessen, noe som resulterer i store utslipp av CO₂. Geopolymere, derimot, kan produseres ved lavere temperaturer og med råmaterialer som resulterer i lavere utslipp.

Ved å identifisere en blanding med en mer gunstig balanse mellom støpelighet og trykkfasthet, kan bedre mekaniske egenskaper oppnås, noe som dermed forsterker betongen i seg selv. Dette vil kreve ytterligere eksperimentering og testing for å finne den best mulige blandingen som oppfyller både kravene til trykkfasthet og de ønskede egenskapene knyttet til arbeidsevne.

Det er viktig å understreke at videre forskning og eksperimentering er nødvendig for å validere denne tilnærmingen og evaluere den mulige effekten på betongens trykkfasthet. Analyser og sammenligninger av forskjellige blandingskomposisjoner vil være avgjørende for å finne den mest passende blandingen med gunstig trykkfasthet.

Abstract

Through an analysis of tests, the aim was to identify the optimal concrete mix for geopolymers, a mix that maintains the high mechanical properties of geopolymer materials while providing improved durability and environmental sustainability. The expectation was that this research would contribute to advancing the field of geopolymer concrete and assist in the transition to more sustainable building materials in the future. The collaboration with Saferock ensured that the research was directly relevant and applicable in the current industrial context.

Geopolymers are a relatively new material that has received significant attention in the construction industry in recent years. Geopolymers, as known from previous studies, are a cement-free material used as an alternative to conventional cement-based concrete. One of the main advantages of geopolymers is their lower CO₂ emissions compared to conventional cement-based concrete. The production of conventional cement requires high temperatures for the calcination process, resulting in large CO₂ emissions. Geopolymers, on the other hand, can be produced at lower temperatures and with raw materials that result in lower emissions.

By identifying a mix with a more favorable balance between workability and compressive strength, better mechanical properties can be achieved, thereby reinforcing the concrete itself. This will require further experimentation and testing to find the best possible mix that meets both the requirements for compressive strength and the desired properties related to workability.

It is important to emphasize that further research and experimentation are necessary to validate this approach and evaluate the possible effect on the compressive strength of the concrete. Analyses and comparisons of different mix compositions will be crucial in finding the most suitable mix with favorable compressive strength.

Forord

Først og fremst ønsker vi å uttrykke vår dypeste takknemlighet til våre veiledere Kjell Tore Fosså og Torbjørn Vrålstad. Vi er oppriktig takknemlige for veiledningen vi har mottatt gjennom hele prosessen med denne oppgaven. Deres hjelp og erfaring har vært betydelig fra begynnelsen til innleveringsdatoen. Reisen har vært både opplysende og krevende.

I tillegg ønsker vi å formidle vår takk til Saferock for å la oss bruke deres oppskrift på geopolymer og de fasilitetene de har gitt oss, samt for assistanse i laboratoriet og veiledning underveis. Til slutt har også andre studenter bidratt med relevante diskusjoner og motivasjon.

Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG	I
ABSTRACT	II
FORORD	III
FIGUR-LISTE	VI
TABELL-LISTE	VIII
1 INNLEDNING	1
2 TEORI	2
2.1 Definisjon og historisk bakgrunn.....	2
2.2 Alkali-aktiverende materialer.....	3
2.3 Geopolymermateriale og sammensetning.....	4
2.4 Egenskaper og bruksområder.....	5
2.5 Produksjon av geopolymere	7
2.6 Avfallsmateriale.....	8
2.7 Bærekraftighet og miljøfordeler	9
2.8 Bruk av avfallsmaterialer og resirkulering:	10
2.9 Tilslag.....	11
2.10 Uttørring.....	11
2.11 Tilsetningsstoffer Plastisernede.....	12
2.12 Sammenligning av geopolymer og betong.....	13
3 METODE	15
3.1 Trykkfasthetstest	15
3.2 Slumpetest.....	16
3.3 Auto-Shrink-system.....	17
3.4 Densitet (P).....	19
3.5 Bestemmelse av tørkesammentrekning av betong.....	20
3.6 PF-metoden – Densitet og porøsitet.....	21
4 FORSØK	23
4.1 B1.....	24
4.2 B1-V.....	25
4.3 B1-A.....	26
4.4 B1-2	27
4.5 B1-V2.....	28
4.6 B1-V3.....	28
4.7 B1-C1.....	29
4.8 B1-C2.....	29
4.10 BLANDINGSPROSEDYRE.....	31
4.10.1 Små terninger 50x50.....	31
4.10.2 Hovedblandingen betong terninger 100x100.....	35
5 RESULTAT	37

5.1 Støpelighet – testblanding.....	37
5.2 Trykkfasthet – testblandinger	37
5.3 Synkmål/slump.....	38
5.4 Densitet.....	39
5.5 Trykkfasthet	40
5.6 Svinn.....	41
5.7 PF-metoden	46
6 DISKUSJON.....	51
7 KONKLUSJON.....	54
8 VIDERE ARBEID.....	55
9 BIBLIOGRAFI.....	56
VEDLEGG A.....	58
VEDLEGG B.....	59
VEDLEGG C.....	64

Figur-liste

Figur 1 Noritt fra avfallsmateriale til geopolymer.....	9
Figur 2 Trykkfasthetstest maskin	16
Figur 3 Slumptest utstyr, små og store kjegler	17
Figur 4 Auto-Shrink-system utstyr.....	18
Figur 5 Maskin for tørrkrymping og prøvestykke.....	20
Figur 6 Prøveemnene plassert i en vanntank for absorpsjon som en del av PF-metoden	21
Figur 7 Utførelse av slumptest på prøveemne B1	24
Figur 8 Utførelse av slumptest på prøveemne B1-V	25
Figur 9 Utførelse av slumptest på prøveemne B1-A	26
Figur 10 Utførelse av slumptest på prøveemne B1-2	27
Figur 11 Utførelse av slumptest på prøveemne B1-V2	28
Figur 12 Utførelse av slumptest på prøveemne B1-V3	28
Figur 13 Utførelse av slumptest på prøveemne B1-C1	29
Figur 14 Utførelse av slumptest på prøveemne B1-C2	30
Figur 15 Kjøkkenmaskiner benyttet for sammenblanding av materialene til de små terningene.....	31
Figur 16 Utførelse av slumptest på hovedblandingen	38
Figur 17 Bilde av oppkappede prøvestykker hvor tegn på separasjon kan observeres.	39
Figur 18 Bilde av prøveemne etter gjennomført trykkfasthetstest.	40
Figur 19 Prøvestykke etter kapping, som viser en ru og ujevn overflate.	41
Figur 20 Bilde av Auto-Shrink-systemet i bruk under testing av prøven.....	42
Figur 21 Resultater fra autogen svinn-test målt over 56 dager, der grafen viser krympingen av prøveemnet over tid, angitt i minutter.	42
Figur 22 Fire forskjellige prøveemner benyttet for PF-metoden testen, fra venstre P1, P2, P3 og P4..	46
Figur 23 Graf som viser absorpsjonshastighet	49
Figur 24 Graf som viser absorpsjonshastigheten opp til 6 timer.....	49

Figur 25 Graf som viser absorpsjonshastigheten fra 1-7 dager.....	50
Figur 26 Graf som viser absorpsjonshastighet på B45 betong.....	53
Figur 27 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1 etter 7 og 56 dager	59
Figur 28 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1 etter 28 dager...	59
Figur 29 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-V etter 7,28 og 56 dager.....	60
Figur 30 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-A etter 7,28 og 56 dager.....	60
Figur 31 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-2 etter 7,28 og 56 dager.....	61
Figur 32 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-V2 etter 7,28 og 56 dager.....	61
Figur 33 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-V3 etter 7,28 og 56 dager.....	62
Figur 34 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-C1 etter 7,28 og 56 dager.....	62
Figur 35 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-C2 etter 7,28 og 56 dager.....	63
Figur 36 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykkene etter 7 dager.....	64
Figur 37 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykkene etter 28 dager.....	64
Figur 38 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykkene etter 7 dager.....	65

Tabell-liste

Tabell 1 Oversikt over alle prøvestykkene som er testet, inkludert innholdet i hver av dem.....	23
Tabell 2 Oversikt over resept for hovedblandingen	30
Tabell 3 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-blanding.	32
Tabell 4 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-V-blanding.	32
Tabell 5 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-A-blanding.	32
Tabell 6 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-2-blanding.	33
Tabell 7 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-V2-blanding.	33
Tabell 8 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-V3-blanding.	33
Tabell 9 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-C1-blanding.	34
Tabell 10 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-C2-blanding.	34
Tabell 11 Oversikt over trykkfasthet etter 7, 28 og 56 dager for hvert prøvestykke.....	37
Tabell 12 Oversikt over synkmålinger utført på hovedblandingen.	38
Tabell 13 Resultatene for densitet av fersk betong er presentert.....	39
Tabell 14 Viser gjennomsnittlig trykkfasthet for betongen etter 7, 28 og 56 dagers herdetid.	40
Tabell 15 Presenterer svinnet i den angitte perioden, både for maksimal verdi og ved avsluttet måling.	43
Tabell 16 Resultater av uttørkingssvinn for prøvestykke P1, presentert for de fire forskjellige sidene.	44

Tabell 17 Resultater av uttøkingssvinn for prøvestykke P2, presentert for de fire forskjellige sidene.	44
Tabell 18 Resultater av uttøkingssvinn for prøvestykke P3, presentert for de fire forskjellige sidene.	44
Tabell 19 Resultater av uttøkingssvinn for prøvestykke P3, presentert for de fire forskjellige sidene.	44
Tabell 20 Presenterer en systematisk oversikt over de ulike verdiene for svinn, inkludert autogent svinn, uttøkingssvinn og det totale svinnet.	45
Tabell 21 Presenterer resultatene fra alle gjennomførte vektmålinger.....	47
Tabell 22 Presenterer beregningene av hvor mye vekt prøvestykkene hadde absorbert.....	48
Tabell 23 Presenterer beregningene av gjennomsnittlig vekt som prøvestykke P1/P2 og P3/P4 hadde absorbert.	48
Tabell 24 Presenterer de beregnede resultatene for betongens densitet og porøsitet.....	50
Tabell 25 Detaljert oversikt over resultatene fra trykkfasthetstesten for alle prøvestykkene.....	58

1 Innledning

Geopolymerteknologien har vist betydelig potensial for utvikling av mer miljøvennlige og bestandige betongmaterialer. Denne masteroppgaven tar sikte på å bygge videre på forskningen utført av Saferock, et ledende selskap innen utvikling av geopolymere, for å optimalisere sammensetningen av geopolymere betongblandinger.

Saferock har gjort betydelige bidrag til feltet ved å utvikle en geopolymere blanding som har egenskaper som ligner mest mulig på tradisjonell sement. Oppgaven tar utgangspunkt i denne innovasjonen ved å bruke den som grunnlag for å utvikle og teste den beste mulige betongblandingen.

Ved å kombinere Saferocks geopolymere blanding med ulike typer tilslag, har det blitt formulert forskjellige betongblandinger. Disse blandingene ble testet med tradisjonelle betongtestmetoder, som for eksempel trykkfasthet, tetthet, bestandighet og støpelighet.

Gjennom analysen av disse testene håpes det å identifisere den beste betongblandingen for geopolymere, en blanding som opprettholder de høye mekaniske egenskapene til geopolymermaterialer samtidig som den gir forbedret bestandighet og miljø.

Det forventes at denne oppgaven ville bidra til å fremme feltet for geopolymere betong og bidra til overgangen til mer bærekraftige byggematerialer i fremtiden. Samarbeidet med Saferock sikret samtidig at forskningen var direkte relevant og anvendelig i den nåværende industrielle konteksten.

2 Teori

2.1 Definisjon og historisk bakgrunn

Geopolymere er et relativt nytt materiale som har fått betydelig oppmerksomhet innen bygg- og anleggsbransjen de siste årene. Geopolymere har visst fra tidligere er et sementfritt materiale som brukes som et alternativ til vanlig sementbasert betong.

Oppdagelsen av geopolymere kan tilskrives ukraineren Glukhovsky på 1950-tallet. Han refererte til materialet som "soil cement" og oppdaget at det var mulig å produsere et materiale med lignende egenskaper som sementbasert betong, men basert på ulike råmaterialer. [1] Senere, på 1970-tallet, ble materialet omdøpt til "geopolymere" av Joseph Davidovits, som identifiserte de geologiske forbindelsene som kunne danne en kjemisk sammensetning som kunne herde og binde materialene sammen. [2]

Geopolymere ble først brukt primært i laboratorier for forskning og utvikling. Det var ikke før på 1980-tallet at geopolymere begynte å få oppmerksomhet som et alternativ til vanlig sementbasert betong i faktiske byggeprosjekter. Siden den gang har geopolymere blitt brukt i flere betydelige byggeprosjekter over hele verden. [3]

En av hovedfordelene med geopolymere er det lavere CO₂-utslippet sammenlignet med vanlig sementbasert betong. Produksjonen av vanlig sement krever høy temperatur for å brenne bort CO₂-en fra kalksteinen og skape klinker. Denne kalsineringsprosessen består for rundt 60% av CO₂ utslipp tilknyttet produksjonen av sement, mens resten kommer fra forbrenning av drivstoff, transport og finmaling. [4] Geopolymere kan derimot produseres ved lavere temperaturer og med råmaterialer som gir lavere utslipp. [5]

Enkelte typer geopolymerebetong har vist seg å ha meget gode mekaniske egenskaper sammenlignet med vanlig sementbasert betong. Det er slitesterkt og god motstand mot aggressive kjemikalier og brann. Det har også lav vannabsorpsjon og permeabilitet, noe som gjør det godt egnet for konstruksjonsformål som krever høy tetthet. [3]

I dag brukes geopolymere som belegningsstein i ulike typer konstruksjonsprosjekter, inkludert bygninger, broer, flyplasser og veier. Potensialet for bruk av geopolymere strekker seg også til andre industrielle sektorer, for eksempel produksjon av isolasjon og keramikk. [3]

Det er viktig å fortsette forskningen og utviklingen av geopolymere for å utnytte deres fulle potensial som en mer miljøvennlig og bestandig erstatning for vanlig sementbasert betong. Samtidig må man ta hensyn til de spesifikke egenskapene og kravene til hvert prosjekt ved bruk av geopolymere, og sikre at materialene oppfyller de nødvendige standarder og forskrifter. [3]

2.2 Alkali-aktiverende materialer

Alkali-aktiverende materialer, også kjent som geopolymerer, er et lovende alternativ til tradisjonelle sementbaserte materialer. Disse materialene har vist seg å ha betydelig potensial for å oppnå forbedret mekanisk styrke, bestandighet og miljøvennlighet. [6]

Geopolymere dannes ved å aktivere mineralske råvarer, som industriavfall, med en alkalisk løsning. Dette aktiveringsmiddelet består vanligvis av en kombinasjon av alkalihydroksider eller alkalikarbonater. Ved å reagere med de mineralske råvarene dannes et tredimensjonalt nettverk av polymerer. [6]

En viktig egenskap ved alkali-aktiverende materialer er deres evne til å binde seg til en rekke tilslagsmaterialer, inkludert sand, grus og knust stein. Dette gjør det mulig å produsere alkali-aktiverende betong med lignende mekaniske egenskaper som tradisjonell sementbasert betong. Imidlertid kan geopolymerer også oppvise forskjellige egenskaper avhengig av sammensetningen og aktiveringsprosessen. [6]

Forskning innen alkali-aktiverende materialer har omfattet studier av sammensetning, struktur og egenskaper. Målet har vært å forstå de kjemiske og fysiske mekanismene som styrer dannelsen av geopolymernetverket, samt deres mekaniske og termiske egenskaper. Dette har ført til utvikling av ulike formuleringer og produksjonsmetoder for å optimalisere materialegenskapene. [6]

Bruken av alkali-aktiverende materialer er mangfoldig. De kan brukes i produksjonen av betongelementer, inkludert prefabrikkerte komponenter og strukturelle elementer. Videre kan de også benyttes i rehabilitering av betongkonstruksjoner for å forbedre levetiden og motstå aggressivt miljø. Andre anvendelser inkluderer termisk isolasjon, brannbeskyttelse og miljøvennlige bindemidler i byggematerialer. [6]

Selv om alkali-aktiverende materialer viser lovende egenskaper, er det fortsatt utfordringer som må takles for å fremme deres anvendelse på bredere skala. Dette inkluderer å forbedre aktiveringsprosessene, optimalisere sammensetningene og sikre konsistens i produksjonen. Videre forskning er nødvendig for å forstå de langsiktige egenskapene til disse materialene, deres levetid og bærekraftig anvendelse. [6]

2.3 Geopolymermateriale og sammensetning

Geopolymere er et relativt nytt materiale som har blitt utviklet de siste tiårene. De er et alternativ til tradisjonelle sementbaserte materialer og kan produseres ved hjelp av ulike råmaterialer og kjemiske reaksjoner. [5]

Geopolymere produseres ved hjelp av to hovedkomponenter: en aluminosilikatisk kilde og en alkalisk aktivator. Aluminosilikatiske kilder kan være forskjellige typer av mineraler som kaolin, metakaolin, flygeaske, tuff eller zeolitter. Alkaliske aktivatorer kan være forskjellige typer av alkalier som natriumhydroksid, kaliumhydroksid eller natriumsilikat. Andre materialer som kan brukes inkluderer avfall fra metallproduksjon og ulike typer av restprodukter, som aske fra forbrenning av biomasse eller glassavfall. [5]

Produksjon av geopolymer involverer en reaksjon mellom aluminosilikatiske kilder og alkaliske aktivatorer. Reaksjonen produserer silisium- og aluminiumoksyd som bindemiddel seg sammen og danner et fast materiale. Reaksjonen kalles geopolymerisasjon, og den involverer en kjedereaksjon av hydroksyler og oksyder. Reaksjonen kan være basisk eller sur, og den kan variere avhengig av hvilke råmaterialer som brukes. [5]

Generelt sett kan reaksjonen deles inn i tre trinn:

1. Aktivering: Alkaliske aktivatorer aktiverer aluminosilikatiske kilder, som frigjør silisium- og aluminiumoksyd.
2. Polymerisering: Silisium- og aluminiumoksydene reagerer med hverandre og danner en tredimensjonal struktur.
3. Herding: Materialet herder og danner et fast stoff.

Det er viktig å merke seg at geopolymerproduksjon er en kompleks prosess som avhenger av mange faktorer, inkludert valg av råmaterialer, kjemisk sammensetning av aktivatorer og produksjonsforhold som temperatur og tid. Denne kompleksiteten kan påvirke materialegenskapene til det endelige produktet, og derfor er det viktig å ha god kjennskap til produksjonsprosessen og kontrollere at prosedyren følges. [5] [3]

2.4 Egenskaper og bruksområder

Egenskaper og bruksområder for geopolymere er av interesse for mange industrier, inkludert bygg- og anleggsbransjen. Det er i ferd med å skje en stor endring i bygge- og anleggsindustrien med hensyn til økt bærekraft. Derfor er det essensielt for bransjen å se på de materialene som danner mest utslipp, gitt at de utgjør en stor del av materialforbruket på globalt nivå. Det å finne bærekraftige materialer som kan levere like gode eller bedre resultater sammenlignet med tradisjonell betong er en nøkkel til både industriforandring og global miljøbeskyttelse. [5]

2.4.1 Styrke og mekaniske egenskaper

Geopolymere har fra andre studier vist seg å ha høy styrke og hardhet som gjør dem egnet for konstruksjonsformål. De kan produseres med ulike styrkenivåer, avhengig av de råmaterialene og produksjonsprosessen som brukes. [7]

2.4.2 Autogent svinn

Autogent svinn er et fenomen som oppstår i herdene sementpasta inkludert geopolymer, spesielt i høyfast betong og betong med lav vann-sement-ratio. Denne typen svinn er direkte relatert til herdeprosessen, hvor vann blir konsumert, og det dannes faste hydratkrytaller, som resulterer i en samlet reduksjon av volumet. Det skjer uten at det er tilstedeværelse av fuktighetsutveksling med omgivelsene. Autogent svinn kan føre til intern spenning i betongen som kan forårsake mikroskopiske sprekker. Disse sprekkeene kan redusere betongens bestandighet og styrke over tid, noe som resulterer i betydelige strukturelle problemer. [8]

En viktig faktor som bidrar til autogent svinn er silika i sementen, som danner silikahydrat under hydratiseringsprosessen. Denne prosessen absorberer en betydelig mengde vann, noe som fører til en reduksjon i det totale volumet av blandingen. Dette fenomenet er mer utpreget i betong med lav vann-sement-ratio, der silikaandelen er høyere. [8]

Flere forskjellige metoder har blitt utforsket for å redusere autogent svinn i betong. Noen av disse inkluderer bruk av svinnreduserende tilsetningsstoffer, bruk av interne herdingsmetoder, eller bruk av materialer med lavere aluminatinnhold for å redusere hastigheten av hydratiseringsreaksjonen. [8]

2.4.3 Permeabilitet og vannabsorpsjon

Geopolymere har lav permeabilitet og vannabsorpsjon, som gjør dem egnet for bruk i miljøer med høy luftfuktighet eller høy vannpåvirkning. Dette kan også føre til en økt levetid for konstruksjoner, da fuktighet og vann kan forårsake skader på materialer over tid. [9]

2.4.4 Anvendelser i bygg- og anleggsbransjen, samt i andre industrielle sektorer

Geopolymere har en rekke bruksområder i bygg- og anleggsbransjen, inkludert produksjon av bygningsmaterialer som betong, murstein og takstein. De kan også brukes som bindemiddel for fiberarmerte materialer som glasfiber og karbonfiber. I tillegg kan de brukes til å reparere og forsterke infrastruktur som broer, veier og flyplasser. Geopolymere har også anvendelser i andre industrielle sektorer, som olje- og gassindustrien og avfallshåndtering.

Det er viktig å merke seg at produksjon og bruk av geopolymere krever god kunnskap om materialenes egenskaper og produksjonsprosessen. Det er også viktig å undersøke materialeegenskapene og testresultatene nøye før man tar i bruk geopolymere i nye bruksområder. [3]

2.5 Produksjon av geopolymere

Produksjon av geopolymere er en kompleks prosess som involverer ulike trinn og materialer. Her vil det ses nærmere på noen av de viktigste aspektene ved produksjon av geopolymere, inkludert blandingsforhold, herding og formingsprosesser, varmebehandling og varmebestandighet. [3]

2.5.1 Blandingsforhold, herding og formingsprosesser

Blandingsforholdet mellom aluminosilikatiske kilder og alkaliske aktivatorer er avgjørende for å produsere geopolymere. Det er viktig å finne riktig blandingsforhold som vil gi det best mulige resultat når det gjelder styrke, mekaniske egenskaper og kjemisk resistens.

Blandingsforholdet kan variere avhengig av råmaterialene som brukes og produksjonsforholdene. [3]

Etter at blandingen er laget, må den herdes ved en bestemt temperatur og i en bestemt tid. Herding kan skje ved romtemperatur eller ved høyere temperaturer. Herding ved høye temperaturer kan føre til økt styrke og hardhet, men kan også føre til økt energiforbruk og kostnader. [3]

Formingsprosessen kan variere avhengig av hvilket produkt som skal produseres. Vanligvis kan geopolymere formes ved hjelp av støpning eller pressing. Støpning kan brukes til å produsere store plater eller strukturer, mens pressing kan brukes til å produsere mindre deler som murstein eller takstein. [3]

2.5.2 Varmebehandling og varmebestandighet:

Varmebehandling kan brukes for å øke styrken og hardheten til geopolymere. Dette kan gjøres ved å utsette materialet for høye temperaturer, vanligvis mellom 200 og 1000 grader Celsius. Varmebehandlingen kan føre til en økt kryssbinding av silisium- og aluminiumoksydene og dermed forbedre materialets mekaniske egenskaper. [3]

Geopolymere er også kjent for å ha høy varmebestandighet. De kan motstå høye temperaturer uten å deformeres eller brytes ned. Dette gjør dem egnet for bruk i brannsikre materialer, som brannsikre isolasjon og brannsikre plater. [3]

2.6 Avfallsmateriale

Avfallsmateriale som blir brukt i blandingen i denne oppgaven kommer fra et gruveområde i Rogaland. Her utvinnes Titania AS, Ilmenitt er et titanholdig mineral som vanligvis finnes i magmatiske og metamorfe bergarter over hele verden. Det har en kjemisk formel på (FeTiO_3) , der jernet og titanet kan variere i mengde avhengig av forekomsten. Ilmenitt er en viktig kilde til titan, som brukes i en rekke applikasjoner, inkludert produksjon av pigmenter, titanmetall, katalysatorer og elektronikk. Titania tilbyr Saferock en variant av bergart kjent som noritt. Noritt er en geologisk term som refererer til en spesifikk type metamorfisk bergart. Denne bergarten er kjennetegnet av sin fin-kornede struktur og mørke farge, og den består hovedsakelig av mineraler som amfibol og plagioklas feltspat. Noritt dannes vanligvis gjennom metamorfe prosesser og finnes ofte i områder der bergarten har blitt utsatt for betydelig varme og trykk [10]. Gruveavfall fra Titania AS er hovedsakelig overskuddsberg og avfallsmateriale som oppstår under ilmenittutvinning og titandioksidproduksjon. Dette avfallsmaterialet består hovedsakelig av kvarts, feltspat og anatas, som er mineraler som er vanlige i jordskorpen. [10] [11] [12] [13]



Figur 1 Noritt fra avfallsmateriale til geopolymer

Ved å bruke gruveavfall fra Titania AS i geopolymer kan man også bidra til å løse problemet med avfallshåndtering og redusere mengden avfallsmateriale som deponeres i naturen. På denne måten kan geopolymer med gruveavfall fra Titania AS være et eksempel på sirkulær økonomi, hvor avfallsmateriale blir omgjort til en nyttig ressurs. [12] [13]

2.7 Bærekraftighet og miljøfordeler

Bærekraftighet og miljøfordeler er viktige aspekter ved bruk av geopolymere i bygg- og anleggsbransjen. Her vil det ses nærmere på noen av de viktigste bærekraftsaspektene ved bruk av geopolymere, inkludert redusert karbonavtrykk, bruk av avfallsmaterialer og resirkulering, og potensialet for bruk i fremtidige bærekraftige byggeprosjekter. [3]

2.7.1 Redusert karbonavtrykk sammenlignet med vanlig sementbetong:

Geopolymere kan ha en betydelig lavere karbonavtrykk sammenlignet med vanlig sement basert betong. Dette skyldes at produksjonen av sement er en av de største kildene til karbondioksidutslipp i verden. Produksjon av sement krever høye temperaturer, bruk av fossile brensler og består av en kalsineringsprosess, dette resulterer i store mengder karbondioksidutslipp. Produksjon av geopolymere kan derimot være en mer bærekraftig og miljøvennlig alternativ, da det kan produseres ved hjelp av industriavfall og restprodukter.

Geopolymerbetong har vært gjenstand for betydelig forskning som en potensiell løsning for å redusere CO₂-utslippene fra bygg- og anleggssektoren. Dette skyldes at det produseres enormt mye sement i verden, et hovedelement i konvensjonell betong, bidrar til rundt 7-8% av de globale CO₂-utslippene [14].

Den eksakte mengden CO₂-utslipp som kan reduseres ved bruk av geopolymerbetong varierer betraktelig avhengig av flere faktorer, inkludert typen og kilden til råmaterialene som brukes, produksjonsprosessen og den konkrete anvendelsen av betongen. [14]

Generelt anses det at geopolymerbetong kan redusere CO₂-utslipp med 30-80% i forhold til tradisjonell Portland-sementbetong. Dette grunnet i stor grad det faktum at produksjonen av geopolymerbetong ikke involverer kalsinering - en prosess der kalkstein oppvarmes til ekstremt høye temperaturer for å produsere sement - noe som er en betydelig kilde til CO₂-utslipp i produksjonen av Portland-sement. [14]

En studie publisert [15], estimerte at utskifting av Portland-sement med flygeaske-basert geopolymer kan redusere CO₂-utslippene med opptil 64%. Det bør imidlertid bemerkes at dette tallet varierer betraktelig avhengig av spesifikke forhold, slik som kilden og typen av flygeaske, samt den eksakte formuleringen og produksjonsprosessen av geopolymerbetong. [15]

Det er viktig å påpeke at geopolymerbetong fortsatt er gjenstand for forskning og utvikling, og ytterligere data og erfaring vil være nødvendig for å fastslå de eksakte miljømessige fordelene og ytelsesegenskapene sammenlignet med Portland-sementbetong. [15]

2.8 Bruk av avfallsmaterialer og resirkulering:

Geopolymere kan produseres ved hjelp av avfallsmaterialer og resirkulert materiale. Dette kan føre til en reduksjon i mengden avfall som går til deponi og dermed bidra til en mer bærekraftig avfallshåndtering. Restprodukter fra industrielle prosesser, som aske fra forbrenning av biomasse eller glassavfall, kan brukes som råmaterialer for produksjon av geopolymere. Dette gir en mulighet til å resirkulere avfall og samtidig produsere et nyttig og bærekraftig materiale. [16]

2.9 Tilslag

Tilslag spiller en avgjørende rolle. Disse grunnleggende materialene kombineres for å skape det endelige produktet. Tilslag kan generelt deles inn i to hovedkategorier: fint tilslag og grovt tilslag. [17]

Grovt tilslag består av større partikler, ofte stein eller knust stein. Eksempler på dette kan være knust granitt, knust basalt, knust kalkstein eller sandstein. Tilslaget bidrar til produktets styrke og hjelper til med å redusere sammentrekning når betongen tørker. [17]

På den annen side består fint tilslag ofte av sand. Det har en rolle i å fylle rommet mellom de grovere tilslagspartiklene, og binder seg til sement eller geopolymer- bindemiddel for å danne en solid matrise. [17]

Tilslag utgjør en betydelig andel av det totale volumet både i geopolymer betong. Dens egenskaper, inkludert størrelse, form og mineralogisk sammensetning, kan betydelig påvirke de mekaniske egenskapene, bestandigheten og ytelsen til det endelige produktet. [17]

2.10 Uttørking

Uttørking, eller tørkingssvinn, oppstår når vannet i betongen fordampes over tid. Dette er en fysisk prosess der fuktighet beveger seg fra innsiden av betongstrukturen til overflaten, hvorfra det fordampes. Resultatet er at betongen krymper, noe som kan føre til sprekker og redusere betongens bestandighet og styrke. [18]

Uttørking er spesielt utbredt under forhold med lav relativ fuktighet, og kan bli forverret av faktorer som vind og høy temperatur. Den kan også bli påvirket av betongens porestørrelse og fordeling, siden disse egenskapene styrer veien vannet tar når det beveger seg mot overflaten. [18]

En viktig metode for å bekjempe uttørking er riktig herding av betongen etter at den er støpt. Dette kan inkludere vanning av betongoverflaten, dekkning med plastfolie, eller bruk av kjemiske herdemembraner. Disse metodene virker ved å redusere mengden vann som kan fordampe fra betongen, og dermed redusere mengden uttørking som forekommer. [18]

Både autogent svinn og uttørring er viktige faktorer å vurdere når man jobber med betong, siden de kan ha en betydelig innvirkning på betongens langvarige bestandighet og styrke. [18]

2.11 Tilsetningsstoffer Plastisernede

Plastiserende tilsetningsstoffer, også kjent som superplastifiserere, er viktige komponenter i produksjonen av geopolymer betong. Deres hovedfunksjon er å forbedre bearbeidbarheten og redusere vanninnholdet i betongblandingen uten å endre dens styrke. [19]

Plastifiserere fungerer ved å redusere tiltrekningskreftene mellom sementpartiklene, noe som gjør det mulig å oppnå en mer flytende blanding med samme mengde vann. Dette betyr at mindre vann trengs for å oppnå en arbeidsdyktig betongblanding, noe som resulterer i høyere styrke og bestandighet. [19]

I geopolymer betong kan plastifiserere være spesielt nyttige for å forbedre støpeligheten og forsinke herdetiden. Dette gir mer tid for blanding, transport og plassering av betongen før den begynner å stivne og herde. [19]

Til tross for at plastifiserere har blitt mye brukt i betongindustrien, er deres bruk i geopolymer betong fortsatt et aktivt forskningsfelt. Enkelte studier har vist at visse typer superplastifiserere kan forbedre de mekaniske egenskapene til geopolymere, men mer forskning er nødvendig for å forstå de eksakte effektene og optimalisere deres bruk i denne sammenheng. [19]

2.12 Sammenligning av geopolymere og betong

Betong og geopolymere materialer representerer to forskjellige tilnærminger til byggematerialer, hver med sine unike kjemiske sammensetninger, produksjonsprosesser, mekaniske egenskaper, miljøpåvirkninger og bestandighetsegenskaper. [20]

2.12.1 Kjemisk Sammensetning og Produksjonsprosesser:

Konvensjonell betong består primært av portlandsement, vann, tilslag i form av sand og grus. Produksjonen av portlandsement innebærer kalsinering av kalkstein, en energiintensiv prosess som genererer betydelige CO₂-utslipp. [20]

I kontrast til dette er geopolymere sammensatt av aluminosilikatmaterialer, som flygeaske eller metakaolin, kombinert med en alkalisk løsning. Denne prosessen involverer ikke kalsinering, noe som resulterer i betydelig lavere CO₂-utslipp. [20]

2.12.2 Mekaniske Egenskaper:

Mens både betong og geopolymere materialer kan oppnå høy trykkfasthet, utviser geopolymere materialer generelt en høyere motstand mot termiske belastninger, kjemiske angrep og sykliske belastninger. Dette antyder at geopolymere materialer kan være mer egnet for bruksområder med strenge krav. [20]

2.12.3 Miljøpåvirkning:

Portlandsement-basert betong er kjent for å være en stor bidragsyter til globale CO₂-utslipp, står for omtrent 7-8% av de totale utslippene på verdensbasis. Geopolymer betong kan redusere disse utslippene betydelig, takket være den lavere energiintensive prosessen og det mindre karbonintensive råmaterialet som brukes i dens produksjon. [21]

2.12.4 Bestandighet:

Geopolymerer har vist seg å være mer bestandige enn konvensjonell betong under visse forhold. Spesielt er geopolymerer materialer mer motstandsdyktige mot syreangrep, er mindre påvirket av alkali-silikat reaksjoner, og viser lavere permeabilitet. Disse egenskapene kan resultere i en lengre levetid for konstruksjoner laget av geopolymerer materialer. [3]

Selv om geopolymer materialer har fordeler, står de overfor betydelige utfordringer når det gjelder høyere kostnad sammenlignet med vanlig betong, mangelen på standardiserte testprosedyrer og behovet for spesialisert utstyr og materialer i produksjonen. Disse utfordringene begrenser den brede bruken av geopolymer teknologi. Videre forskning og utvikling er nødvendig for å adressere disse utfordringene og realisere det fulle potensialet for geopolymerer som et bærekraftig og bestandig byggemateriale. [3]

3 Metode

I løpet av arbeidet med geopolymer-blandingene, benyttets en rekke forskjellige testmetoder for å karakterisere og evaluere egenskapene til de produserte prøvene. Denne delen vil presentere en oversikt over de forskjellige metodene benyttet, og forklare formålet og betydningen av hver metode i konteksten med forskningen.

3.1 Trykkfasthetstest

En trykkfasthetstest utføres for å bestemme et materiales evne til å motstå trykkbelastninger eller krefter. Det brukes ofte til å evaluere styrken og bestandigheten til materialer som betong, stein, murstein og andre byggematerialer. Trykkfasthetstesten er gjort i henhold til standarden NS-EN 12390-3:2019 [22].

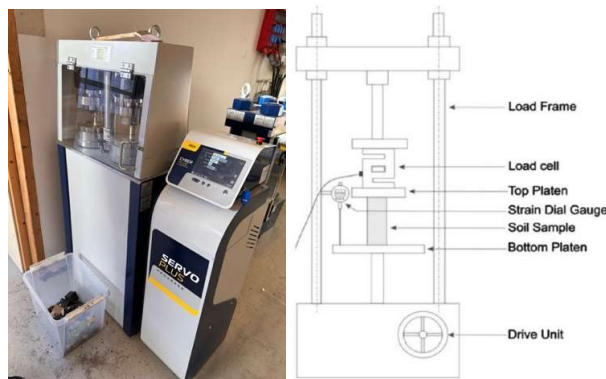
I trykkfasthetstesten blir prøver av betong tatt fra konkrete strukturer eller ferske betongblandinger og formet til standardiserte sylindriske eller kubiske former. Disse prøvene blir deretter utsatt for en gradvis økende kompresjonskraft ved hjelp av en trykkmaskin. [22]

Testprosessen involverer påføring av last på betongprøvene mens man kontinuerlig registrerer den økende kraften og den tilsvarende deformasjonen. Dataene brukes til å generere en trykk-deformasjonskurve som viser betongens atferd under kompresjon. [22]

Trykkfasthetstesten er viktig for å sikre at betongen oppfyller de nødvendige kravene og standardene for konstruksjonsprosjekter. Den gir også viktig informasjon for ingeniører og entreprenører om betongens kvalitet, design og dimensjonering av strukturer. Det er verdt å merke seg at trykkfasthetstesten ikke er den eneste testen som brukes for å vurdere betongens egenskaper. [22]

Beregning av trykkstyrke: Trykkfastheten til betongen beregnes ved å dividere den maksimale kraften som betongprøven kan motstå før den svikter, med det tverrsnittsarealet som prøven er utsatt for. Denne trykkfasthetsverdien uttrykkes vanligvis i enheten "megapascal" (MPa) og brukes som et viktig mål på betongens styrke. [22]

$$f_c(MPa) = \frac{F(N)}{A(mm^2)}$$



Figur 2 Trykkfasthetstest maskin

3.2 Slumptest

Slumptesten er en mye brukt test for å måle konsistensen eller støpeligheten til fersk betong. Den gir en indikasjon på vanninnholdet, konsistensen og sammenhengen til betongblandingen. Slumptesten er gjort i henhold til standarden NS-EN 12350-2:2019 [22]. Testen omfatter følgende trinn:

En prøve av fersk betong hentes fra byggeplassen eller betongblanderens. Prøven bør være stor nok til å tillate riktig testing. En slumpkjegle, som er en støpeformet form, brukes til testen. Kjeglen plasseres på et jevnt og stabilt underlag. Den blir deretter fuktet og fylt i tre like lag med den ferske betongprøven. Hvert lag komprimeres ved å tampe det med en komprimeringsstang. Etter at kjeglen er fylt, blir overflødig betong slått av fra toppen av kjeglen ved hjelp av en rettkant. Kjeglen løftes forsiktig vertikalt i en oppadgående bevegelse, og etterlater betongen i en haugform.

Synkmålet måles som differansen mellom den opprinnelige høyden på kjeglen og høyden på den sedimenterte betongen eller på diameter mål. Dette er vanligvis uttrykt i millimeter (mm). Slumpmålingen gir en indikasjon på bearbeidbarheten til betongen, som er et mål på hvor lett det er å blande, plassere og komprimere.

Synkmålingen sammenlignes med kravene eller spesifikasjonene gitt for den spesifikke applikasjonen eller byggeprosjektet. Ulike fall områder anbefales for ulike typer betongkonstruksjoner, for eksempel høyst betong, vanlig betong eller betong med spesifikke krav.



Figur 3 Slumpetest utstyr, små og store kjegler

3.3 Auto-Shrink-system

Auto-Shrink-systemet er en innovativ løsning for å måle den autogene krympingen av sementpasta eller mørtelprøver, og gir viktig innsikt i den strukturelle integriteten til disse materialene. Denne teknologien gir en metode for å forstå mulig krymping av forskjellige sementholdige systemer, og muliggjør forutsigelse og forebygging av mulige strukturelle problemer, som mikrosprekker, som kan kompromittere bestandigheten og levetiden til betongkonstruksjoner. [23]

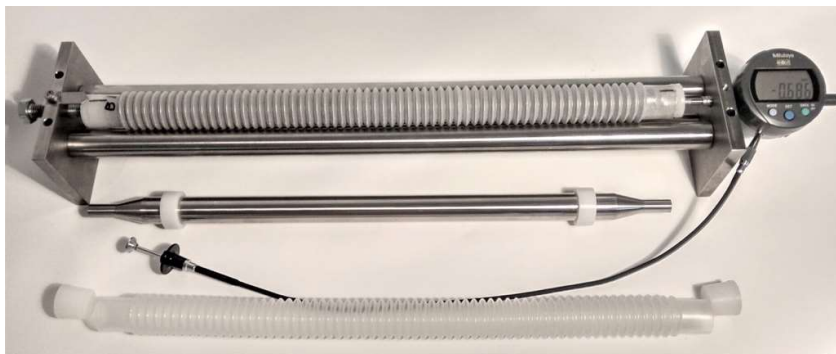
Bygget rundt prinsippet om kjemisk krymping, reduksjonen i volum forårsaket av hydrering av sement. Auto-Shrink muliggjør nøyaktige lineære målinger av autogen krymping i sementbaserte materialer når de herder. Under hydreringsprosessen er volumet av de resulterende produktene mindre enn det opprinnelige volumet av sement og vann, noe som skaper indre tomrom. Hvis herdet under forseglede forhold, der det ikke er noen ekstern vannkilde, kan denne reduksjonen i pastavolum føre til krymping og mulig mikrosprekker.

Disse sprekkene kan øke permeabiliteten til betongen, redusere motstanden mot vann og andre skadelige stoffer. [23]

Auto-Shrink-systemet består av flere nøkkelkomponenter. Den inkluderer en stiv ramme for å støtte prøven, en korrugert plastform for klargjøring av testprøven, en høypresisjon digital måleur med fjernkontroll for å måle endringer i prøvelengde, en referansestang og et støtterør for å helle betongen inn i det korrugerte røret. For å sikre nøyaktige målinger bør både referanselinjen og prøvene plasseres i rammen i samme retning under hver måling. [23]

For forbedret funksjonalitet og enkel datainnsamling kan systemet kobles til en datamaskin ved hjelp av en spesiell USB-kabel og programvare, noe som muliggjør automatisk registrering av lengdeendringer til en regnearkfil. Dette alternativet forenkler sanntidssporing av endringer, noe som muliggjør mer effektiv dataanalyse og beslutningstaking. [23]

Auto-Shrink-systemet er et robust og pålitelig verktøy som gir verdifulle data om potensiell autogen krymping av forskjellige sementholdige systemer. Bruken kan hjelpe ingeniører og konstruksjonsfagfolk til å ta informerte beslutninger om hvilke typer sementpasta eller mørtel som skal brukes, og dermed forbedre kvaliteten og levetiden til strukturene de bygger. [23]



Figur 4 Auto-Shrink-system utstyr

3.4 Densitet (P)

Densiteten til den ferske geopolymertongblanding bestemmes ved bruk av en kalibrert beholder, kjent både i masse og volum, i samsvar med standarden NS-EN 12350-6:2019 [24]. Beholderen, innledningsvis med en kjent tom masse, fylles opp i to separate faser, hver fase nøye komprimert for å sikre konsistensen i blandingen. Beholderens tomme masse, betegnet m_1 , er kjent før starten av eksperimentet. [25]

For å eliminere mulige luftlommer innenfor blandingen, blir beholderen gjenstand for lette, jevnt fordelte slag. Dette sikrer en best mulig eliminering av innesluttete luftlommer, som ellers kunne ha påvirket nøyaktigheten av densitetsmålingen. [25]

Etter at hver fase er komprimert, avrettes overflaten av blandingen for å oppnå en jevn og plan overflate. Beholderen rengjøres deretter på utsiden for å fjerne eventuelle overskuddsmasser, hvorpå den veies for å bestemme den samlede massen. [25]

Densiteten til geopolymertongblanding beregnes så ved å dele massen av den ferske blandingen med beholderens kjente volum. Denne målingen gir en presis indikasjon på densiteten til den ferske geopolymertongen, noe som er avgjørende for å forstå og kontrollere dens mekaniske egenskaper og ytelse under forskjellige forhold. [25]

$$P = \frac{M1 - M2}{V}$$

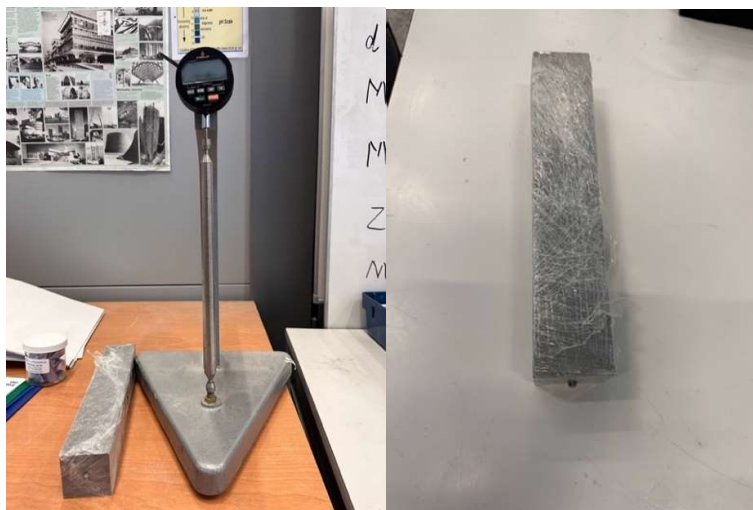
3.5 Bestemmelse av tørkesammentrekning av betong

Tørkesammentrekningstest er en viktig metode for å evaluere betongens egenskaper og ytelse over tid. ISO 1920-8:2009 del 8 gir retningslinjer for å bestemme tørkesammentrekningen av betongprøver som er preparert enten på byggeplassen eller i laboratoriet.

Testen krever prøvestaver eller prøveplater av betong, som er representativ for den aktuelle konstruksjonen. Disse prøvene skal være av en spesifisert størrelse og form, i samsvar med standardens krav. Før testen utføres, blir prøvene herdet under kontrollerte betingelser for å sikre at betongen oppnår tilstrekkelig styrke og modning. Etter herding blir prøvene utsatt for tørking under spesifikke betingelser. Dette kan omfatte kontrollert temperatur og fuktighet, avhengig av testens formål og krav. Under tørkingen overvåkes prøvenes lengde endringer over tid.

Målingene av tørkesammentrekning utføres ved hjelp av nøyaktige lengdemålinger av prøvene. Endringer i lengden registreres og brukes til å beregne den totale tørkesammentrekningen i henhold til standardens angitte metoder og formler.

Det er viktig å merke seg at tørkesammentrekning kan påvirkes av flere faktorer, inkludert betongblandings sammensetning, herdeprosessen, miljøforholdene og materialets egenskaper. Ved å utføre tørkesammentrekningstesten i samsvar med ISO 1920-8:2009 del 8, oppnår man standardiserte og pålitelige data som kan brukes til å evaluere betongens ytelse og dimensjonelle endringer over tid.

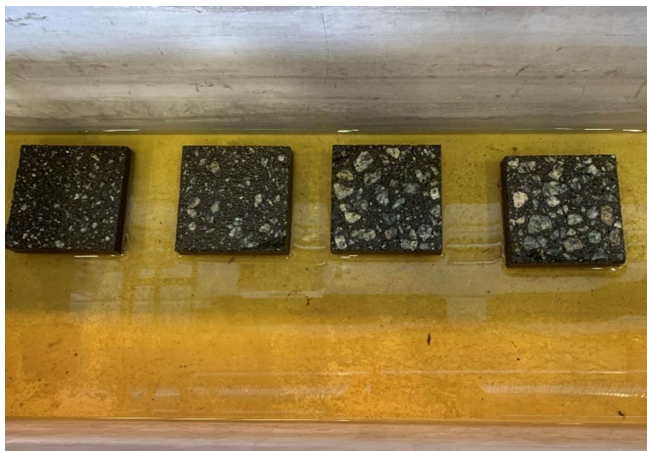


Figur 5 Maskin for tørrkrymping og prøvestykke

3.6 PF-metoden – Densitet og porøsitet

Bestemmelser rundt geopolymertbetongens densitet og porøsitet er utført i henhold til Statens Vegvesen sin Håndbok 14.637 – Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF [26]. Det ble kappet opp to skiver fra to ulikeklosser av hovedblandingen, med en størrelse på 100mmx100mmx19mm. Klossene legges så i et tørkeskap med temperatur på 105 °C. Skivene skal tørkes inntil et vekttap på mindre enn 0,01% i døgnet. Når skivene er ferdig tørket skal pakkes de inn i plastfolie for å kjøle seg ned uten at fuktighet fra luften skal komme trekkes inn i prøvestykkene, kjøles i minimum 2 timer. Deretter veies prøvestykkene når de er tørre (g_1), før de plasseres i en tank med vann. Prøvene skal plasseres slik at det kun er en av sug flatene som er i kontakt med vannet, slik at vannspeilet kun er 1-2mm opp på side flatene til prøvestykkene. De første 4 dagene veies prøvene en rekke ganger etter bestemte tidspunkt, dette for å kunne se på absorpsjonsevnen til prøvene. Veies etter 10min, 30min, 1time, 2timer, 3timer, 4timer, 5timer, 6timer, 1døgn, 2døgn, 3døgn og 4 døgn.

Etter disse 4 dagene plasseres prøvestykkene helt nedsunket i vann, før det gjøres to nye målinger av vekt. En av kun prøvestykket etter det har vært nedsunket i vann (g_2) og en der hvor prøvestykket veies under vann (g_3). Siste del av testmetoden gjøres ved bruk av en trykktank som i prinsippet skal skape vannmetting i prøvestykket, prøvene legges i trykktanken i ett døgn med et trykk på 50 atm. Før de igjen veies (g_4).



Figur 6 Prøveemnene plassert i en vanntank for absorpsjon som en del av PF-metoden

De registrerte målingen benyttes sammen med formler som er gitt i håndboken for å bestemme densiteten og porøsiteten. ρ_w = densitet på vann, satt til 1000 kg/m³.

Tørr densitet: $\rho = \frac{g_1}{V}$

Fast-stoff densitet: $\rho_{fs} = \frac{g_1}{V - \frac{g_4 - g_1}{\rho_w}}$

Sug-porøsitet: $P_s = \frac{g_1 - g_2}{V * \rho_w}$

Makro-porøsitet: $P_m = \frac{g_4 - g_2}{V * \rho_w}$

Total porøsitet: $P_1 = P_s + P_m$

Tørr densitet – densiteten av betongen uten vann i kapillærporene og gel porene.

Fast-stoff densitet – densiteten til betongen uten porer.

Sug-porøsitet – er avhengig av volumet av gelporer og kapillærporer.

Makro-porøsitet – er avhengig av volumet av luftporer og makroporer.

4 Forsøk

Dette kapitlet omhandler den faktiske forskningen og utviklingen av resepten. Nedenfor presenteres en tabell som beskriver de forskjellige prøvenes innhold som er produsert i løpet av dette studiet. En grundig og systematisk tilnærming ble tatt for å utvikle en optimal resept for geopolymerebetong gjennom en rekke småskala tester. Utgangspunktet var en bindemiddelresept, et bindemiddel utviklet av Saferock, som besto av Noritt (gruveavfall), en alkali-aktivator og mindre mengder andre stoffer. Testene hadde som formål å finne den mest hensiktsmessige blandingen ved å vurdere støplighet og egenskaper.

Prøve navn	Innhold
B1	Bindemiddel med 7% økt aktivator
B1-V	Mørtel: Bindemiddel med 7% økt aktivator Fint tilslag fra Velde 0-8mm
B1-A	Mørtel: Bindemiddel med 7% økt aktivator Fint tilslag fra Årdal 0-8mm
B1-2	Bindemiddel med 7% økt aktivator og 1% plastiserende
B1-V2	Mørtel: Bindemiddel med 7% økt aktivator og 1% plastiserende Fint tilslag fra Velde 0-8mm
B1-V3	Mørtel: Bindemiddel med 7% økt aktivator og 2% plastiserende Fint tilslag fra Velde 0-8mm
B1-C1	Betong: Bindemiddel med 7% økt aktivator og 2% plastiserende Fint og grovt tilslag fra Velde 0-16mm
B1-C2	Betong: Bindemiddel med 7% økt aktivator og 2% plastiserende Fint og grovt tilslag fra Velde 0-16mm, med anbefaling av fordeling fra forker hos Velde
B1-C3	Hovedblanding (Betong): Original bindemiddel resept, ikke med økt mengde aktivator Fint og grovt tilslag fra Velde 0-16mm, med anbefaling av fordeling fra forker hos Velde

Tabell 1 Oversikt over alle prøvestykkene som er testet, inkludert innholdet i hver av dem

4.1 B1

B1 ble utført med den opprinnelige bindemiddelresepten fra Saferock, og det ble raskt tydelig at blandingen var for stiv og vanskelig å jobbe med. Derfor ble aktivator mengden økt med omtrent 7%, en endring som ikke ville ha en vesentlig innvirkning på styrken. Denne bindemiddelresepten ble benyttet for videre tester.



Figur 7 Utførelse av slumpetest på prøveemne B1

4.2 B1-V

B1-V ble en mørtelmiks utført ved å kombinere den nye bindemiddelresepten med fint tilslag. Et forhold på 40/60 mellom bindemiddel og tilslag ble bestemt på forhånd, der tilslaget var fra Velde AS med kornstørrelsene 0-2mm, 2-5mm og 5-8mm. Målet var å oppnå en tilslagsfordeling som etterlignet siktekurven til Årdal-tilslaget på 0-8mm, som tidligere hadde vist seg å være et av de beste tilslagene for betong. Dette ble gjort for å sikre en god fordeling av de forskjellige størrelsene i blandingen.



Figur 8 Utførelse av slumpetest på prøveemne B1-V

4.3 B1-A

B1-A ble utført for å sammenligne tilslaget levert fra Velde med tilslaget fra Årdal.

Sammensetningen mellom bindemiddel og tilslag var den samme som i den andre testen, med en fordeling på 40/60.



Figur 9 Utførelse av slumpetest på prøveemne B1-A

Med resultatene fra de første testblandingene ble det å vurdere mulige tilsetningsstoffer og hvordan endringer i tilslagssammensetningen kunne forbedre resepten.

4.4 B1-2

B1-2 ble en ny blanding kun med bindemiddel for å undersøke effekten av tilsetningsstoffer på støpligheten. 1% lignosulfonat (P-stoff) ble tilsatt for å øke støpligheten. Basert på Saferock sine resultater fra prøving, så er det funnet ut at lino sulfonat har best effekt på denne spesifikke bindemiddelresepten.



Figur 10 Utførelse av slumpetest på prøveemne B1-2

4.5 B1-V2

B1-V2 ble en mørtelblanding med 1% P-stoff og endret sammensetning av tilslaget. En vurdering ble tatt for å øke prosentandelen av 0-2mm tilslag og redusere mengden groveste tilslag (5-8mm) for å oppnå en bedre sammensatt blanding.



Figur 11 Utførelse av slumpetest på prøveemne B1-V2

4.6 B1-V3

B1-V3 var en ny mørtelblanding med samme tilslagssammensetning som i B-1-V-2, men med en økning av P-stoff til 2% for å forbedre støpligheten og undersøke om effekten av denne mengden P-stoff påvirker trykkfasheten.



Figur 12 Utførelse av slumpetest på prøveemne B1-V3

4.7 B1-C1

B1-C1 ble det for første gang utført en betongblanding med både fint og grovt tilslag. Forholdet mellom bindemiddel og tilslag var det samme som tidligere, med en fordeling på 40/60. Tilslagsfordelingen ble satt til 50/50 mellom fint tilslag (0-2, 2-5, 5-8mm) og grovt tilslag (8-11, 11-16mm). Mengden P-stoff ble beholdt på 2% av vekten til tørrstoffene i bindemiddel miksen.



Figur 13 Utførelse av slumpetest på prøveemne B1-C1

4.8 B1-C2

B1-C2 siste testen ble utført med en annen tilslagssammensetning basert på anbefaling fra Velde, leverandøren av tilslaget. Forslaget fra Velde var basert på en fordeling som ofte brukes i B30-betong.



Figur 14 Utførelse av slumpetest på prøveemne B1-C2

B1-C2 viste seg å være svært vellykket med en godt sammensatt blanding og god støplighet. For den større blandingen ble det bestemt å bruke den opprinnelige bindemiddelresepten fra Saferock, ikke den med 7% økning av aktivatormengden. Dette ble gjort med hensyn til at mindre væske vil føre til en sterkere betong. Tabell 2 viser endelig resept for hovedblandingen B1-C3.

Resept for B1-C3				
Binder 40%		Tilslag 60%		
	Vekt		Vekt	Prosent
Noritt	8960 g	0-2mm	11202.8 g	46 %
Aktivator (KO)	5214.72 g	2-5mm	1218 g	5 %
Tilleggsstoff	2060 g	5-8mm	1705.2g	7 %
P-stoff	221.2 g	8-11mm	4627 g	19 %
Totalt	16456.72 g	11-16mm	5601.4 g	23 %
		Totalt	24354.4 g	100 %

Tabell 2 Oversikt over resept for hovedblandingen

4.10 Blandingsprosedyre

Dette kapitlet vil omhandle prosessene som er blitt brukt for å blande de nevnte prøvene.

4.10.1 Små terninger 50x50

Først begynnes det med å måle opp nødvendige ingredienser, inkludert bindemiddel materialene, aktivator og andre tilsetningsstoffer som skulle blandes sammen. Det blir brukte en Kenwood-kjøkkenmaskin som blander for å utføre blandingen.



Figur 15 Kjøkkenmaskiner benyttet for sammenblanding av materialene til de små terningene.

I prosessen plasseres først de tørre ingrediensene i kjøkkenmaskinen og lot dem blande sammen ved lav hastighet i 1 minutt. Deretter tilsattes de flytende komponentene, nemlig aktivatoren, som ble blandet ved lav hastighet i 4 minutter. Etter dette økes hastigheten til høy og blandet i 2 minutter.

Det er viktig å merke seg at nøyaktighet og korrekte blandingsprosedyrer er avgjørende for å oppnå ønsket kvalitet og egenskaper i betongblandingen. Ved å følge en presis og systematisk prosedyre, som beskrevet ovenfor, sikres en grundig og effektiv blanding av bindemiddelet. Blandingsprosedyren var forskjellig avhengig av hvilke materialer som inngår i den spesifikke blandingen som skulle produseres, som tydelig presenteres i tabellene nedenfor.

1. bindemiddel B1:

Steg	Innhold	Varighet og hastighet
1	Tørrstoff	1 min lav hastighet
2	Aktivator	4min lav hastighet og 2 min høyhastighet
3	Platinerende	-
4	Sand/Stein	-

Tabell 3 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-blandingen.

2. Mørtel B1-V:

Steg	Innhold	Varighet og hastighet
1	Tørrstoff	2min lav hastighet
2	Aktivator	4min lav hastighet og 2 min høyhastighet
3	Platinerende	-
4	Sand/Stein	1 min middelshøy hastighet

Tabell 4 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-V-blandingen.

3.Mørtel B1-A:

Steg	Innhold	Varighet og hastighet
1	Tørrstoff	2min lav hastighet
2	Aktivator	4min lav hastighet og 2 min høyhastighet
3	Platinerende	-
4	Sand/Stein	1 min middelshøy hastighet

Tabell 5 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-A-blandingen.

4. Bindemiddel B1-2:

Steg	Innhold	Varighet og hastighet
1	Tørrstoff	2min lav hastighet
2	Aktivator	4min lav hastighet og 2 min høyhastighet
3	Platinerende	2min lav hastighet og 2 min høyhastighet
4	Sand/Stein	-

Tabell 6 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-2-blanding.

5. Mørtel B1-V2:

Steg	Innhold	Varighet og hastighet
1	Tørrstoff	2 min lav hastighet
2	Aktivator	4min lav hastighet og 2 min høyhastighet
3	Platinerende	2min lav hastighet og 2 min høyhastighet
4	Sand/Stein	1 min middelshøy hastighet

Tabell 7 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-V2-blanding.

6. Mørtel B1-V3:

Steg	Innhold	Varighet og hastighet
1	Tørrstoff	2 min lav hastighet
2	Aktivator	4 min lav hastighet og 2 min høyhastighet
3	Platinerende	2min lav hastighet og 2 min høyhastighet
4	Sand/Stein	1 min middelshøy hastighet

Tabell 8 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-V3-blanding.

7. Betong B1-C1:

Steg	Innhold	Varighet og hastighet
1	Tørrstoff	1 min lav hastighet
2	Aktivator	4 min lav hastighet og 2 min høyhastighet
3	Platinerende	2 min lav hastighet og 2 min høyhastighet
4	Sand/Stein	1 min middelhøy hastighet

Tabell 9 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-C1-blanding.

8. Betong B1-C2:

Steg	Innhold	Varighet og hastighet
1	Tørrstoff	1 min lav hastighet
2	Aktivator	4 min lav hastighet og 2 min høyhastighet
3	Platinerende	2 min lav hastighet og 2 min høyhastighet
4	Sand/Stein	1 min middelhøy hastighet

Tabell 10 Oversikt over varigheten av blandingen for hvert materiale under blandingsprosessen i B1-C2-blanding.

4.10.1.1 Utstøpning av terninger

Oppfyllingen av formene ble gjennomført i 3 lag, i det første trinnet ble en tredjedel av blandingen plassert i formen. Deretter ble blandingen komprimert med 25 slag ved bruk av en komprimeringsstav for å sikre god pakning. På det andre trinnet ble ytterligere en tredjedel av blandingen lagt til, etterfulgt av en annen runde med 25 slag. Til slutt, i det tredje trinnet, ble den siste tredjedelen av blandingen lagt til og komprimert med ytterligere 25 slag.

For å fjerne det resterende luftinnholdet i blandingen, ble en vibrasjonsmaskin benyttet etter komprimering. Dette ble gjort til ingen flere luftbobler ble observert, hvorefter vibrasjonen ble stoppet. Dette sikrer en kompakt betongblanding uten større luftbobler.

Etter at blandingene ble hellet inn i formene, ble de deretter forseglet med plastfolie og pose. Dette ble gjort for å forhindre at omgivelsenes atmosfære og luft kunne påvirke blandingen. Formene ble dermed isolert for å sikre at herdingsprosessen fortsatte under kontrollerte forhold, uten utenforliggende innflytelse. Det ble besluttet å la prøvestykkene herde i forseglet tilstand gjennom hele prøveperioden, det vil si fra støpedag til to måneder.

4.10.2 Hovedblandingens betong terninger 100x100

Blandingsprosedyren for hovedblandingens terninger ble utført ved bruk av en 40 liters bøtte og en elektrisk håndholdt betongblander for å sikre en jevn og grundig blanding. Først ble bindemiddelet tilsatt og mikset inntil det visuelt kunne bekreftes at blandingen ble som planlagt.

Deretter ble aktivatoren tilsatt i blandingen. Denne gjorde blandingen mer flytende, og en ytterligere 5-10 minutter med omrøring ble utført for å sikre at bindemiddelet og aktivatoren ble godt blandet.

Etter denne prosessen ble det plastiserende materialet tilsatt. Omrøring fortsatte i omtrent 5 minutter til, igjen for å sørge for en fullstendig innblanding av alle komponentene. Gjennom hele denne prosessen ble en konstant hastighet på hånddrillen opprettholdt. Etter at blandingen var jevn og uniform, ble drillhastigheten økt til maksimum for å sikre best mulig blanding.

Tilslaget ble deretter tilsatt i to trinn. Først ble tilslag med en partikkelstørrelse på 0-5mm tilsatt og blandet i ca. 5 minutter ved en middels høy drillhastighet. Etter dette ble tilslag med en partikkelstørrelse på 5-16mm tilsatt, og blandingen fortsatte i ytterligere 5 minutter ved samme hastighet.

Når det kunne observeres at blandingen var jevn og godt blandet, ble hastigheten økt til maksimum. Dette ble gjort for å forsikre oss om at blandingen var grundig blandet og at det ikke var noen tydelige skiller mellom de forskjellige komponentene. Dette siste trinnet sørget for at alle komponentene i blandingen var jevnt fordelt og godt blandet, noe som er kritisk for den endelige ytelsen av det produserte materialet.

Som ved prosedyren for de mindre terningene, ble en lignende prosess fulgt for overføring av blandingen til større terninger. Etter fullføring av blandingsprosessen, var neste trinn å plassere blandingen i formene. For dette formålet ble det benyttet 100x100mm terningsformer.

Først ble en tredjedel av blandingen lagt i formen, hvoretter den ble komprimert ved hjelp av en komprimeringsstav med 25 slag for å sikre god pakning. Dette ble etterfulgt av et tillegg av ytterligere en tredjedel av blandingen, komprimert med ytterligere 25 slag. Til slutt ble den siste tredjedelen av blandingen lagt til og komprimert med 25 slag.

Deretter ble en vibrasjonsmaskin benyttet for å eliminere det resterende luftinnholdet i blandingen. Vibrasjonen ble opprettholdt inntil ingen flere luftbobler ble observert, hvorpå vibrasjonen ble avsluttet. Dette sikret en kompakt og luftfri blanding, klar for videre herding og bearbeiding som ble forseglet med pose og plastfolie. Denne samme prosessen som ble gjort for de små terningene.

5 Resultat

Dette kapittelet vil alle resultater oppnådd gjennom de forskjellige forsøkene presenteres. Første del vil inneholde resultatene fra testblandingene som ble gjennomført for å komme frem til en god resept, og andre del resultatene fra hoved blandingen.

5.1 Støpelighet – testblanding

Minislump-testen ble utført i samsvar med metodikken beskrevet i kapittel 3.2, med den eneste forskjellen at det ble benyttet en mindre kjele. Hovedformålet med testblandingene var å identifisere en blanding med optimal tilslagssammensetning og tilfredsstillende støpe egenskaper. Derfor var observasjonene fra disse testene av vesentlig betydning for utviklingen av den endelige resepten.

5.2 Trykkfasthet – testblandinger

På grunn av en begrenset mengde med Norittpulver tilgjengelig ble det kun støpt ut 3 terninger til hver av de forskjellige blandingene. Så det ble kun testet trykkfasthet av ett prøvestykke ved 7 døgn, 28 døgn og 56 døgn for hver av blandingen. Ved kun test av ett prøvestykke kan det hende at enkelte resultater ikke er helt pålitelige da noen prøvestykker kan ha skader eller feil. Resultatene fra de forskjellige testblandingene er presentert i tabell 11 med alle tallene fra testene gjort for 7 dager, 28 dager og 56 dager. For en mere detaljert tabell med tidspunkt for test og kN trykk på hver terning se vedlegg A. I vedlegg B er resultatene for trykkfastheten presentert ved grafer.

Prøve NR	Mpa - 7 dager	Mpa - 28 dager	Mpa - 56 dager
B1-1	6.2 MPa	6.9 Mpa	6.2 Mpa
B1-V	6.6 MPa	8.6 Mpa	8.1 mPa
B1-A	6.9 MPa	9.0 Mpa	8.3 Mpa
B1-2	4.9 Mpa	7.0 Mpa	5.7 Mpa
B1-V2	6.1 Mpa	9,1 Mpa	8.8 Mpa
B1-V3	6.6 Mpa	9.7 Mpa	6.8 Mpa
B1-C1	5.7 Mpa	8.9 Mpa	7.3 Mpa
B1-C2	8.6 Mpa	14.6 Mpa	13.9 Mpa

Tabell 11 Oversikt over trykkfasthet etter 7, 28 og 56 dager for hvert prøvestykke.

5.3 Synkmål/slump



Figur 16 Utførelse av slumptest på hovedblandingen

Som vist på bilde over ble det ved slumptesten målt diameter på synk utbredelsen til blandingen. Tabell 12 under viser målinger og resultater for gjennomført slumptest.

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

B1-C3	
d1	660mm
d2	650mm
SF (gjennomsnitt)	655mm

Tabell 12 Oversikt over synkmålinger utført på hovedblandingen.

Tidlig i blandeprosessen ble det observert en betydelig endring på flytskjærspenningen og viskositeten til blandingen. Når blanderen/drillen går er viskositeten og flytskjærspenningen betydelig lavere enn når det ikke blandes. Når P-stoffet er tilsatt i blandingen endrer blandingen seg og får en god mobilitet, som vil si at viskositeten og flytskjærspenningen er lav.



Figur 17 Bilde av oppkappede prøvestykker hvor tegn på separasjon kan observeres.

En av usikkerhetene gjennom støpeprosessen var om blandingen hadde for lav viskositet, som kan skape separasjon etter utstøping. Tilslaget vil da synke mot bunnen av formene og det vil i toppen av terningene ligge et lag som kun består av bindemiddel og finmasse. Som vist på bilde over har det blitt litt segregering etter utstøping.

5.4 Densitet

Resultatene for densitet av fersk betong er presentert i tabell 13. Testen ble gjennomført som beskrevet i kap 3.4, ved bruk av bøtte med kjent volum.

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{\text{Volum av bøtte (1L)}}$$

B1-C3		
vekt av bøtte, m1	1113 g	1.113 kg
vekt av full bøtte, m2	3240.6 g	3.2406 kg
Desnitet, ρ	2127.6 g/l	2128 kg/m ³

Tabell 13 Resultatene for densitet av fersk betong er presentert.

5.5 Trykkfasthet

Trykkfastheten ble testet på samme måte som terningene fra testblandingene. Det ble her laget en større blanding som resulterte i flere prøvestykker, her av terninger på 100mmx100mmx100mm. Det ble gjennomført test av 2 prøvestykker ved 7 dager og 28 dager, og 4 tester ved 56 dager. Tabell 14 viser gjennomsnittsfastheten til betongen etter 7 dager, 28 dager og 56 dagers herdetid. For full tabell med alle resultater både kN og Mpa se vedlegg A. I Vedlegg C er trykkfastheten til all gjennomførte tester presentert i grafer.

Herdetid	7 døgn	28 døgn	56 døgn
Trykkfasthet, Mpa	7.1 Mpa	9.4 Mpa	8.0 Mpa

Tabell 14 Viser gjennomsnittlig trykkfasthet for betongen etter 7, 28 og 56 dagers herdetid.



Figur 18 Bilde av prøveemne etter gjennomført trykkfasthetstest.

Bildet over viser et av prøvestykkene etter fullført testing. Etter å ha fjernet løs masse fra prøvestykket ble det tydelig at materialet var preget av en høy grad av porøsitet, og fjerningen av løs massen var en enkelt. Dette resultatet støtter tidligere tester som indikerer en lav fasthet for prøvestykkene.

Som en visuell bekreftelse på denne observasjonen, kan man merke seg en betydelig forskjell i overflatekarakteren mellom bindemiddelet og tilslaget på prøvestykket som ble kuttet opp i forbindelse med andre tester. En tydelig distinksjon kan observeres, idet bindemiddelet har en ru og ujevn overflate etter kapping, mens tilslaget har en glatt og jevn overflate.



Figur 19 Prøvestykke etter kapping, som viser en ru og ujevn overflate.

5.6 Svinn

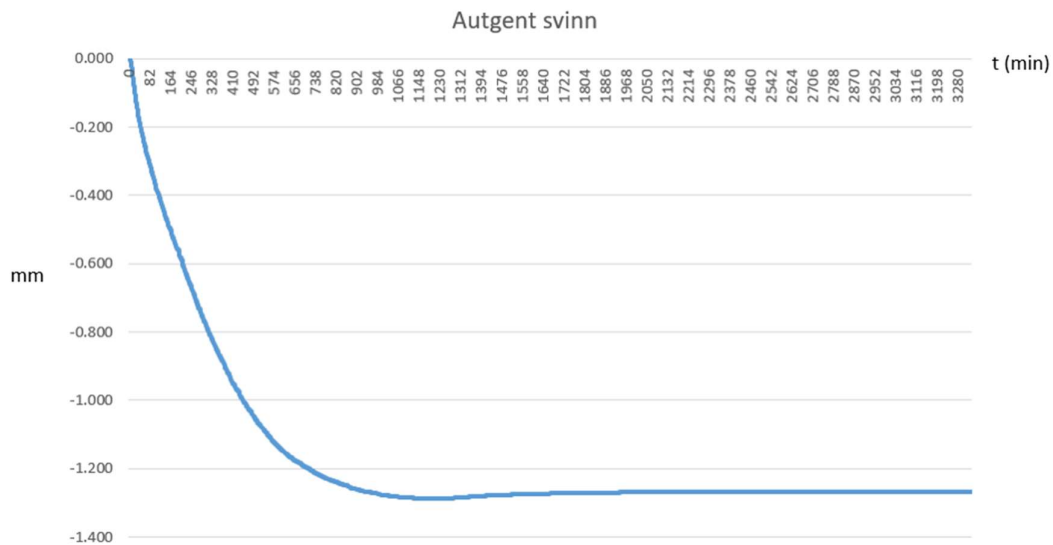
Resultatene angående svinn vil bli presentert i to separate deler. Første del vil inkludere resultatene fra autogent svinn, som ble målt ved hjelp av testapparatet fra German Instruments, kap 3.3. Den andre delen vil omfatte resultatene for svinn som ble målt ved hjelp av prismeprøver, beskrevet i kap 3.5.

5.6.1 Del 1



Figur 20 Bilde av Auto-Shrink-systemet i bruk under testing av prøven.

Resultatene for autogent svinn ved bruk av German Instruments' testapparat presenteres i diagrammet nedenfor. Denne testmetoden viser kun det autogene svinnet, da prøven fylles i et plastrør og forsegles på begge sider, som vist på vedlagte bilde. Prøven som ble fylt i røret besto av en blanding av bindemiddel og tilslag med størrelser på 0-2mm og 2-5mm. Alle målinger fra støpingstidspunktet og opp til 56 dagers herding ble loggført automatisk i en Excel-fil. Testapparatet har stått uforstyrret i et rom med jevn temperatur gjennom hele testperioden.



Figur 21 Resultater fra autogen svinn-test målt over 56 dager, der grafen viser krympingen av prøveemnet over tid, angitt i minutter.

Da resultatene ble registrert, var det kun de første 3336 minuttene (2,3 døgn) som var loggført i Excel-arket. Dette gir kun et innblikk i svinnet i løpet av disse minuttene, og ikke hele herdeperioden på 56 døgn. Resultatene fra disse målingene er plottet i den overliggende grafen og viser at svinnet stabiliserer seg etter omtrent 1100 minutter, og oppnår en maksimal verdi på -1,286mm etter 1126 minutter. Etter 2400 minutter stabiliserer svinnet seg helt, og resten av målingene frem til 3336 minutter er på -1,266mm. Tabellen nedenfor viser svinnet i denne perioden, både for maksimal verdi og ved avsluttet måling. Prøveemnet som ble benyttet ble målt til 424mm før oppstart av testen.

	mm	Promille (‰)	m/m
Autogent svinn, maks	1.286mm	3.03‰	0.00303
Autogent svinn, stabil	1.266mm	2.99‰	0.00299

Tabell 15 Presenterer svinnet i den angitte perioden, både for maksimal verdi og ved avsluttet måling.

Det er utfordrende å fastslå fullstendig nøyaktighet for resultatene fra denne testen, da testen primært er ment å utføres kun med bindemiddel, men kan også gjennomføres med en mørtelblanding som inneholder tilslag opp til 4 mm. Som tidligere nevnt, ble testen i dette tilfellet gjennomført med tilslag opp til en størrelse på 5 mm. En mulig innvirkning på nøyaktigheten kan skyldes pakningen av blandingen i plastrøret. Ved fylling av plastrøret ble det observert at pakningen ikke var optimal, og det ble registrert enkelte lommer med luft i enkelte områder av plastrøret.

5.6.2 Del 2

Resultatene for svinn ved bruk av prismene er presentert i tabellene nedenfor. Nullpunktet for testen ble satt til 3 dager etter utstøpning, samme dag som forskalingen ble fjernet. Målinger ble utført etter 3 dager, 7 dager, 28 dager og 56 dager etter utstøpning. Tabell 16 og tabell 17 viser resultatene for de to prismene (P1 og P2) som var forseglet gjennom hele testperioden, mens tabell 18 og tabell 19 viser resultatene for de to prismene (P3 og P4) som ikke var forseglet. Tester ble utført på både forseglete og ikke-foseglete prismene for å kunne skille mellom det autogene svinnet og svinnet forårsaket av uttørring. På grunn av prøvestykkets små størrelse er det ikke antatt at svinnet skyldes temperaturforskjeller. P1-P4 er navnet på de forskjellige prøvestykkene.

Prøvestykke P1 - forseglet					
	3 dager	7 dager	28 dager	56 dager	Totalt svinn
Side 1	0,106 mm	0,082 mm	0,040 mm	0,030 mm	0.076
Side 2	0,106 mm	0,082 mm	0,038 mm	0,030 mm	0.076
Side 3	0,106 mm	0,080 mm	0,038 mm	0,030 mm	0.076
Side 4	0,106 mm	0,078 mm	0,038 mm	0,030 mm	0.076

Tabell 16 Resultater av uttørringssvinn for prøvestykke P1, presentert for de fire forskjellige sidene.

Prøvestykke P2 - Forseglet					
	3 dager	7 dager	28 dager	56 dager	Totalt svinn
Side 1	0,066 mm	0,044 mm	0,004 mm	-0.012	0.078
Side 2	0,066 mm	0,042 mm	0,004 mm	-0.012	0.078
Side 3	0,066 mm	0,042 mm	0,004 mm	-0.012	0.078
Side 4	0,066 mm	0,044 mm	0,004 mm	-0.012	0.078

Tabell 17 Resultater av uttørringssvinn for prøvestykke P2, presentert for de fire forskjellige sidene.

Prøvestykke P3 - Ikke forseglet					
	3 dager	7 dager	28 dager	56 dager	Totalt svinn
Side 1	0,456 mm	0,360 mm	0,246 mm	0,148 mm	0.308
Side 2	0,454 mm	0,362 mm	0,246 mm	0,148 mm	0.306
Side 3	0,456 mm	0,362 mm	0,246 mm	0,148 mm	0.308
Side 4	0,456 mm	0,360 mm	0,246 mm	0,148 mm	0.308

Tabell 18 Resultater av uttørringssvinn for prøvestykke P3, presentert for de fire forskjellige sidene.

Prøvestykke P4 - ikke forseglet					
	3 dager	7 dager	28 dager	56 dager	Totalt svinn
Side 1	0,490 mm	0,398 mm	0,302 mm	0,208 mm	0.282
Side 2	0,492 mm	0,402 mm	0,304 mm	0,208 mm	0.284
Side 3	0,494 mm	0,402 mm	0,308 mm	0,208 mm	0.286
Side 4	0,494 mm	0,402 mm	0,308 mm	0,208 mm	0.286

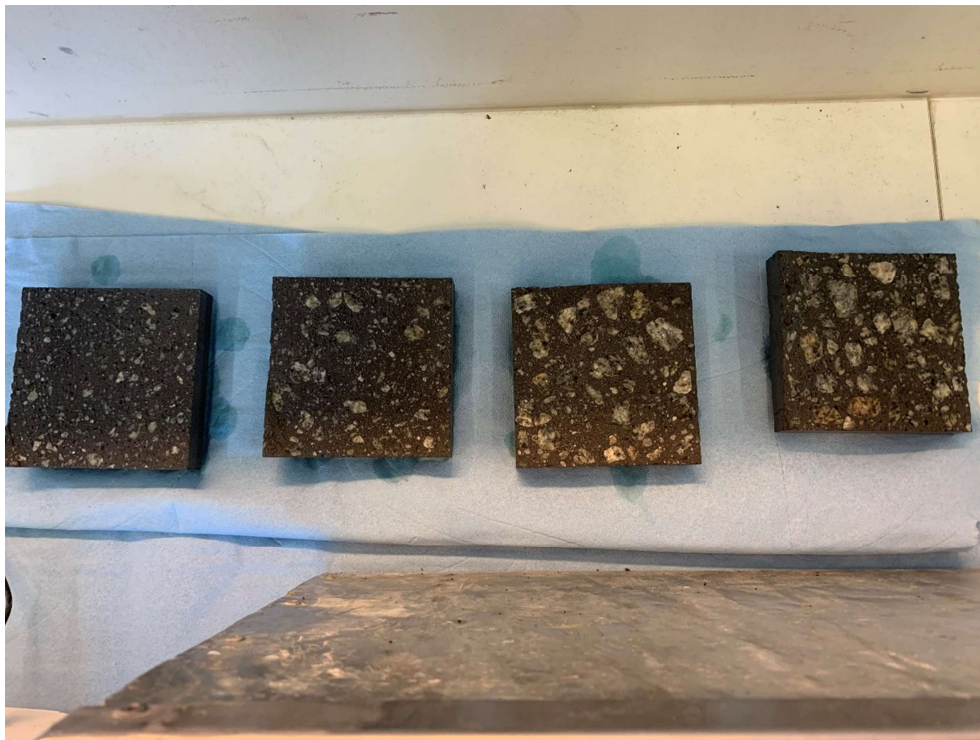
Tabell 19 Resultater av uttørringssvinn for prøvestykke P4, presentert for de fire forskjellige sidene.

Tabell 20 presenterer en systematisk oversikt over de ulike verdiene for svinn, inkludert autogent svinn, uttørkingssvinn og det totale svinnet. Verdiene i tabellen er gjennomsnittet av de ulike testene, der de høyeste verdiene fra de ikke-forseglete og forseglete prøvene er benyttet (0,308 og 0,286). Det er viktig å merke seg at lengden på alle prøvestykkene var lik etter fjerning av forskalingen etter 3 dager, med en lengde på 286 mm.

	mm	Promille (‰)	m/m
Autogent	0.077	0.27 ‰	0.00027
Uttørkning	0.220	0.77 ‰	0.00077
Tot	0.297	1.04‰	0.00104

Tabell 20 Presenterer en systematisk oversikt over de ulike verdiene for svinn, inkludert autogent svinn, uttørkingssvinn og det totale svinnet.

5.7 PF-metoden



Figur 22 Fire forskjellige prøveemner benyttet for PF-metoden testen, fra venstre P1, P2, P3 og P4.

Prøvestykkene som ble benyttet i PF-metoden ble hentet fra to forskjellige terninger. Den ene terningen bestod av restene som lå igjen i bøtten og hadde en betydelig mindre andel av grovt tilslag. Dette er tydelig synlig på bildet som er vist ovenfor. På grunn av denne forskjellen i sammensetning ble målingene delt inn i to grupper. Prøvestykke 1 og 2 tilhører terningen med mindre andel grovt tilslag, mens prøveestykke 3 og 4 tilhører terningen med en bedre sammensetning.

Resultatene for alle gjennomførte vektmålinger er presentert i tabell 21 nedenfor. Tabellen gir en oversiktlig framstilling av vektmålingene som er utført for hver enkelt prøve.

Absorbasjonshastighet	P1	P2	P3	P4
Tørrvekt i gram (G1)	396.1	405	411.5	417.5
Prøvestykker tykkelse [mm]	19	19	19	19
Start tid	09:35	09:35	09:35	09:35
Vekt etter 10 min	424.5	430.5	434.6	439.8
Vekt etter 30 min	425	430.6	434.6	439.9
Vekt etter 1 timer	425.2	430.6	434.5	439.9
Vekt etter 2 timer	424.9	430.5	434.4	439.9
Vekt etter 3 timer	425	430.4	434.3	439.8
Vekt etter 4 timer	424.9	430.3	434	439.5
Vekt etter 5 timer	424.8	430.1	433.9	439.4
Vekt etter 6 timer	424.7	429.9	433.8	439.2
Vekt etter 1 dag	423.6	428.8	432.7	438.1
Vekt etter 2 dager	422.9	428.5	432.1	437.5
Vekt etter 3 dager	422.5	427.6	431.5	436.9
Vekt etter 4 dager	422	427.2	431.1	436.5
Vekt etter 7 dager (G2)	419.2	425.1	429.7	435.2
Våt vekt etter 7 dager (G3) (volum vekt)	180.5	180.5	182	183
Vekt under trykk (G4)	423.0	428.7	434.5	439.1

Tabell 21 Presenterer resultatene fra alle gjennomførte vektmålinger

Det fremgår tydelig av tabellen at prøvestykkene absorberer vann svært raskt, noe som var forventet på forhånd. Allerede etter noen få minutter etter at prøvestykkene ble plassert i vannet, kunne det observeres at vannet hadde trengt gjennom hele prøvestykket. Videre ble det beregnet hvor mye vekt prøvestykkene hadde absorbert, og disse verdiene er presentert i tabell 22 og 23. Gjennomsnittsverdiene for vektupptak fra de to forskjellige terningene ble brukt til å plote en graf.

Denne tabellen gir en klar indikasjon på vannabsorpsjonsegenskapene til prøvestykkene. Ved å registrere og sammenligne vekten av prøvestykkene etter vannkontakt kan man vurdere og kvantifisere vannopptaket. Grafen, som viser gjennomsnittet av vektupptakene fra de to forskjellige terningene, gir en visuell fremstilling av vannabsorpsjonen over tid.

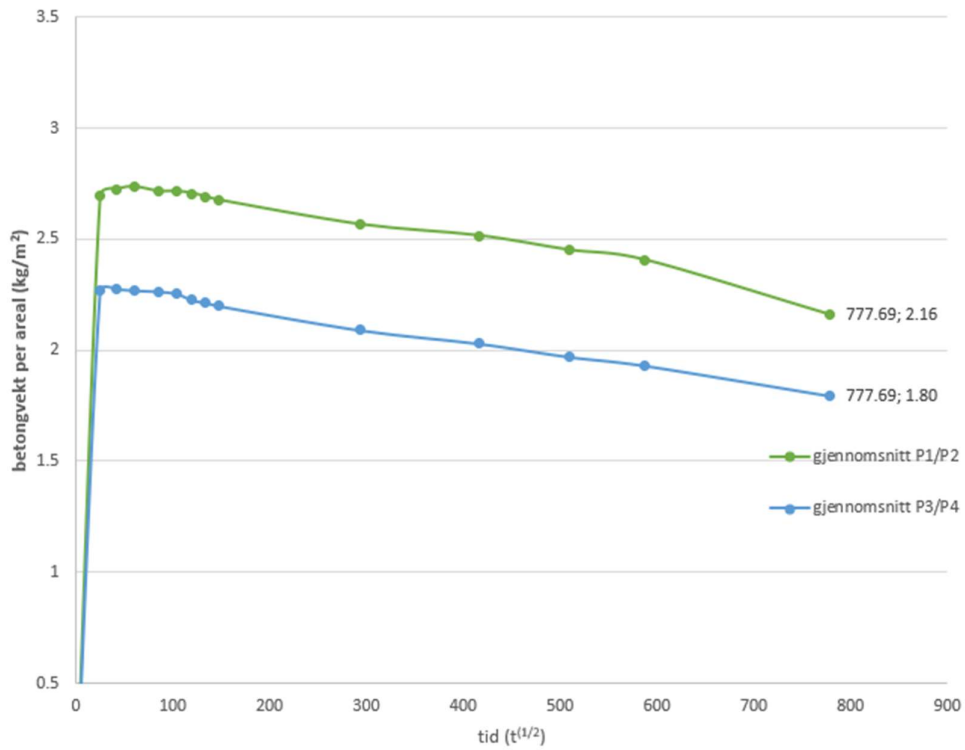
Tid i sekunder ^(1/2)	P1	P2	P3	P4
	Tilført vekt av vann i kg			
0	0	0	0	0
24.49	2.84	2.55	2.31	2.23
42.43	2.89	2.56	2.31	2.24
60.00	2.91	2.56	2.30	2.24
84.85	2.88	2.55	2.29	2.24
103.92	2.89	2.54	2.28	2.23
120.00	2.88	2.53	2.25	2.20
134.16	2.87	2.51	2.24	2.19
146.97	2.86	2.49	2.23	2.17
293.94	2.75	2.38	2.12	2.06
415.69	2.68	2.35	2.06	2.00
509.12	2.64	2.26	2.00	1.94
587.88	2.59	2.22	1.96	1.90
777.69	2.31	2.01	1.82	1.77

Tabell 22 Presenterer beregningene av hvor mye vekt prøvestykkene hadde absorbert

Gjennomsnittshøyde av prøvestykke [mm]	19	19
Tid i sekunder ^(1/2)	gjennomsnitt P1/P2	gjennomsnitt P3/P4
	Tilført vekt av vann i kg	
0	0	0
24.49	2.70	2.27
42.43	2.73	2.28
60.00	2.74	2.27
84.85	2.72	2.27
103.92	2.72	2.26
120.00	2.71	2.23
134.16	2.69	2.22
146.97	2.68	2.20
293.94	2.57	2.09
415.69	2.52	2.03
509.12	2.45	1.97
587.88	2.41	1.93
777.69	2.16	1.80

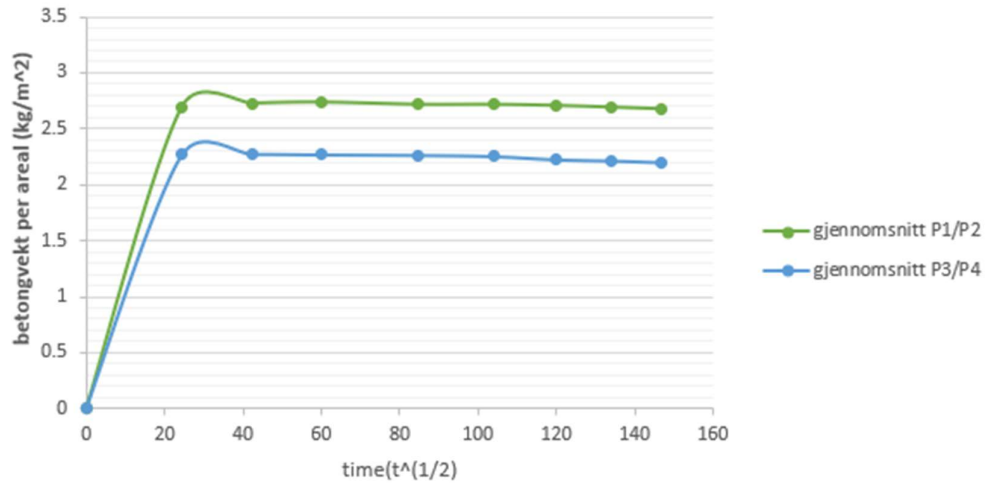
Tabell 23 Presenterer beregningene av gjennomsnittlig vekt som prøvestykke P1/P2 og P3/P4 hadde absorbert.

Absorbasjonshastighet

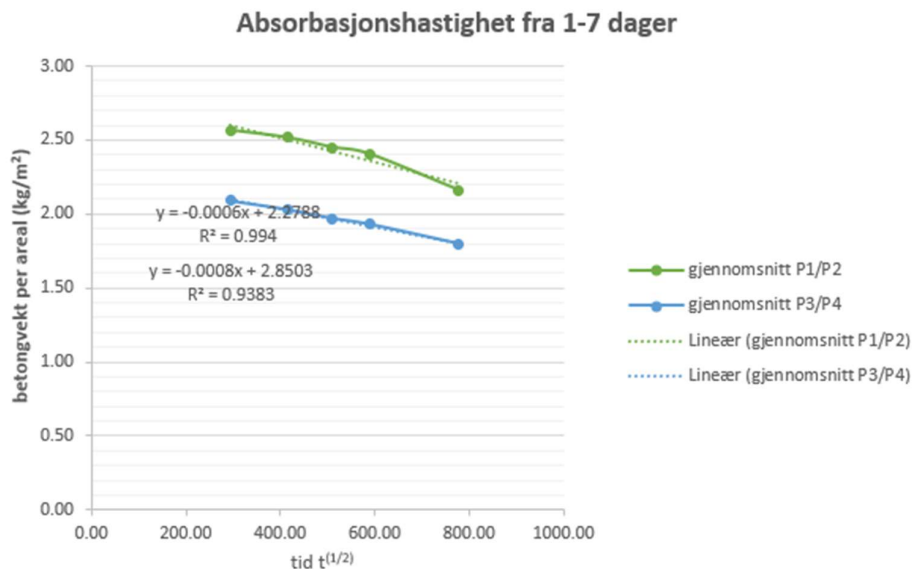


Figur 23 Graf som viser absorpsjonshastighet

Absorbasjonshastighet frem til 6 timer



Figur 24 Graf som viser absorpsjonshastigheten opp til 6 timer.



Figur 25 Graf som viser absorpsjonshastigheten fra 1-7 dager.

Fra alle målingen som ble gjort kan nå densiteten og porøsiteten til betongen bli beregnet ved hjelp av formlene gitt i håndboken til statensvegvesen. Disse formlene er presentert i Kap 3.6. Resultatene er presentert i tabellene under. Tabell 24 presenterer resultater for prøvestykker P1 og P2 (venstre) og resultatene for prøvestykkene P3 og P4 (høyre).

P1 og P2		P3 og P4	
Tørr densitet ρ_1	2108.158	Tørr densitet ρ_1	2181.579
Fast-stoff densitet ρ_{fs}	0.002108158	Fast-stoff densitet ρ_{fs}	0.002181579
Sug porøsitet P_s	1.137E-01	Sug porøsitet P_s	0.09447368
Makro porøsitet P_m	1.94737E-08	Makro porøsitet P_m	2.28947E-08
Total porøsitet P_1	1.137E-01	Total porøsitet P_1	0.09447371

Tabell 24 Presenterer de beregnede resultatene for betongens densitet og porøsitet

6 Diskusjon

Resultatene som er oppnådd har gitt enkelte reaksjoner for den valgte geopolymerbetongblandingen. Resultatene fra trykkfasthetsprøvene viser en uventet nedgang i trykkfastheten etter 28-56 dager. Det er usikkert hva årsaken til denne endringen kan være, men det ble tidlig observert en mistanke om at det kunne skyldes ikke god nok sammenblanding eller komprimering i prøvestykkene. Imidlertid, etter å ha utført tester på ulike tidspunkter (7 dager, 28 dager og 56 dager) med totalt 9 prøveterninger, hvorav 2 ble testet etter 7 dager, 2 etter 28 dager og 4 etter 56 dager, ble det lagt litt bort fra tanken om at dårlig pakning av blandingen kunne være årsaken, grunnet at samtlige prøver fikk en reduksjons i trykkfasthet.

En annen mulig årsak til nedgangen i trykkfastheten kan være bruken av det plastiserende stoffet for å oppnå en mer flytende blanding. Det ble observert fra forsøkene utført på bindemiddel og bindemiddel med plastisering at forskjellen i trykkfasthet ikke var betydelig, da resultatene lå på omtrent samme nivå på trykkfastestestprøvene. Dette betyr at en varierende mengde tilsetningsstoff ikke har noen betydelig påvirkning av trykkfastheten.

En annen faktor som kan påvirke trykkfastheten er separasjon i blandingen. Observasjonene fra forsøket viser at det var en viss grad av separasjon i blandingen der tilslaget har sunket ned i massen, som kan observeres på bildene. Dette kan ha påvirket homogeniteten og konsistensen av blandingen, og det kan være en mulig årsak til nedgangen i trykkfasthet. Resultatene viste at nedgangen i trykkfastheten skyldte bindemiddelet og ikke betongen, slik det kom frem av resultatene som viste en minimal nedgang for mørtel- og betongprøvene, og en mer markant nedgang for de rene bindemiddelprøvene. Separasjonen som ble observert, kunne trolig tilskrives en overskuddsmengde av KOH eller det plastifiserende stoffet i bindemidlet, eller at proporsjoneringen ikke var optimal.

Ut ifra resultatene ses det at selv om betongblandingen har vist seg å ha en høy grad av støplighet, har trykkfastheten avtatt. En så høy støplighet kan klassifisere dette som en selvkomprimerende betong, og kan indikere på at det er for mye væske i betongen. Derfor kan det være hensiktsmessig å prøve ut en blanding som mulig har litt lavere støplighet enn det

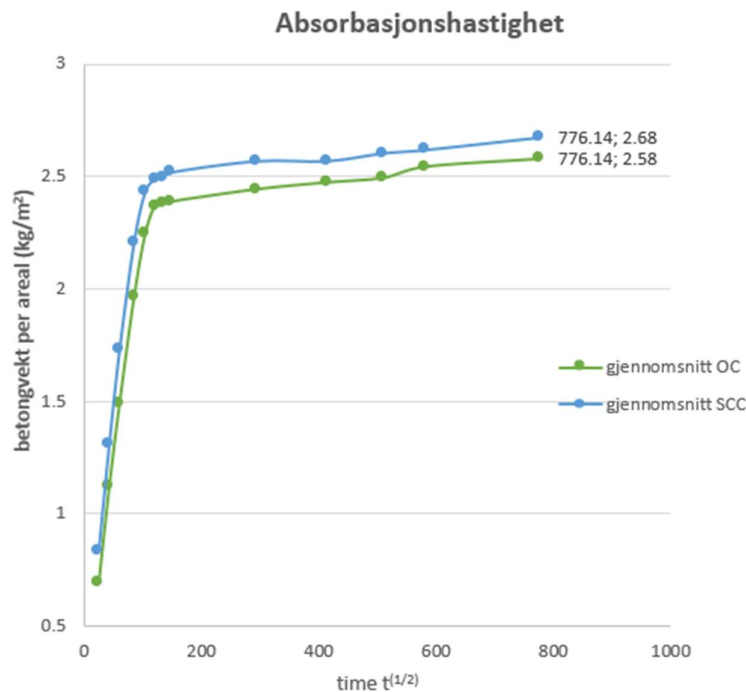
som er oppnådd i resultatene. En slik tilnærming kan bidra til å forbedre separasjon, som igjen kan forbedre trykkfastheten til betongen.

Analysen av nedgangen i trykkfastheten og vektreduksjonen mellom 28 og 56 dager kan ha indikert at noen ureagerte noritt-partikler kunne ha fortsatt å løse seg delvis opp av KOH etter at bindemiddel-fasen hadde herdet. Dette kan ha ført til en delvis helhetlig nedgang i trykkfastheten, som ble muliggjort av den forseglede herdingen på 56 dager, slik at våt KOH fremdeles kunne påvirke noritten. Det er imidlertid viktig å merke seg at en så lang forseglet herdeperiode ikke er praktisk gjennomførbar i en typisk produksjonsprosess. For å unngå nedgangen i trykkfasthet kunne det være hensiktsmessig å redusere mengden KOH i resepten og av forsegle prøvene etter for eksempel én uke.

Ved å identifisere disse mulige årsakene til nedgangen i trykkfastheten, kan det utvikles en mer helhetlig forståelse av de faktorene som påvirker geopolymerbetongblandingens egenskaper og resultatene. Videre forskning og analyser vil være avgjørende for å bekrefte eller avkrefte disse årsakene og bidra til å optimalisere blandingens kvalitet og ytelse.

I diskusjonen av betongens svinn, er det viktig å merke seg at denne egenskapen har direkte innflytelse på betongens ytelse og holdbarhet. En typisk verdi for totalt svinn i konvensjonell betong ligger vanligvis i området 0,5 til 0,75 prosent. Dette kan variere basert på en rekke faktorer, inkludert betongens sammensetning, herdeforhold, og miljøforhold etter herding. Resultatene fra denne studien indikerer et svinn på 1.04 promille, som er relativt lavt og generelt ville bli ansett som en akseptabel.

Det har oppstått spørsmål knyttet til resultatene og observasjoner under testen PF-metoden. Det er uvanlig at vekten til prøvestykkene avtar over tid i denne testen. Normalt sett vil man forvente en graf som stiger relativt raskt i starten og deretter avtar gradvis over tid ved utførelse av denne testen. Dette er illustrert i figur under. Figur 25 er hentet fra tidligere forsøk gjennomført av studenter på Uis våren 2022. Forsøkene ble gjennomført på en betong med fasthetsklasse B45 med luftinnførende tilsetningsstoffer.



Figur 26 Graf som viser absorpsjonshastighet på B45 betong

En overskuddsmengde av KOH kunne også ha vært årsaken til den målte vektreduksjonen i PF-testen. Ubundet KOH fra porevannet diffunderer ut i vannet når prøvene ble lagt i vann. Siden en KOH-løsning har høyere tetthet enn rent vann, vil prøvenes vekt naturligvis gå ned.

I analysen av betongens porøsitet og densitet, er det vesentlig å erkjenne at disse egenskapene har en direkte innvirkning på betongens ytelse og holdbarhet. En typisk verdi for porøsiteten til herdet sementpasta (bindemiddelet i betong) ligger på omkring 15-25%. I dette tilfellet ligger verdiene på rundt 9-11%, noe som indikerer at dette skulle være en lav porøsitet. Imidlertid kan økt porøsitet føre til økt vannabsorpsjon. Dette stemmer ikke overens med resultatene presentert i kapittel 5.7, hvor det ble observert at prøvestykket ble nærmere mettet etter en kort periode. Dette antyder at en blanding selv med lav porøsitet absorberer mer, årsaken til dette kan være hvis betongens overflate er ru eller ikke er tilstrekkelig forseglet, kan dette akselerere vannabsorpsjonen. Dette er i samsvar med observasjonene fra figur 18, som understøtter dette problemet. I teorien skulle en lavere porøsitet være mer optimal, noe som kunne bidra til å forhindre problemer som frost-tine skader og redusert styrke.

7 Konklusjon

Denne oppgaven har sett på potensialet til geopolymerebetong som et bærekraftig alternativ til tradisjonell Portland-sementbetong. Vårt arbeid har fokusert på å identifisere den optimale betongblandingen for geopolymere med primært hensyn på støpelighet og sekundært fasthet. Fokus har vært også opprettholde de gode mekaniske egenskapene til geopolymere materialer samt gode egenskaper innenfor bestandighet og miljø.

Våre resultater indikerer at geopolymerebetong kan redusere CO₂-utslippene med opptil 64% sammenlignet med Portland-sement, noe som er et betydelig skritt mot mer bærekraftige byggematerialer. All prøving av geopolymere i oppgaven viser at den kan produseres ved hjelp av avfallsmaterialer og resirkulert materiale, noe som vil bidra til en mer bærekraftig avfallshåndtering.

I løpet av vårt arbeid med geopolymere, har det blitt benyttet en rekke testmetoder for å karakterisere og evaluere egenskapene til geopolymere. Resultatet viser en uventet nedgang i trykkfastheten etter 28-56 dager. Dette kan skyldes flere faktorer som tendens til separasjon av blandingen og mengde tilsatt plastiserende stoffer.

Resultatene viser at Geopolymere har en rekke gode egenskaper innenfor støpelighet, bestandighet og mekaniske egenskaper, men den lave trykkfastheten og uventete trykkfasthetsnedgangen etter 28 døgn tilsier at noe mer utvikling må gjennomføres før denne type geopolymere er klar for markedet. Det er verdt å merke seg at den benyttede bindemiddelresepten ikke er ferdig utviklet.

8 Videre arbeid

For videre arbeid og utvikling av dette prosjektet, er det flere områder som krever oppmerksomhet. Først og fremst, er det nødvendig å revurdere og endre bindemiddelresepten. Dette er basert på observasjonene og resultatene fra denne studien, som indikerer at den nåværende oppskriften ikke gir optimale resultater når det gjelder betongens styrke og holdbarhet.

Videre, kan det også være behov for å justere blandingsforholdene. Eksempelvis kan det hende at en fordeling på 30/70 mellom bindemiddel og tilslag vil være mere gunstig fordeling.

Til slutt, er det også viktig å vurdere herdeprosessen. Som nevnt i diskusjon kan en forseglest herdeperiode på 1-2 uker være mer gunstig. Disse forslagene til videre arbeid gir en vei fremover for å forbedre og optimalisere geopolymerbetonen som er studert i denne oppgaven. Det er viktig å merke seg at disse endringene vil kreve ytterligere forskning og testing for å bekrefte deres effektivitet og påvirkning på betongens egenskaper.

9 Bibliografi

- [1] O. Geiger, "Geopolymer House," 2011. [Online]. Available: <https://geopolymerhouses.wordpress.com/2011/07/31/victor-glukhovsky/>. [Accessed 9 Juni 2023].
- [2] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère, 2008.
- [3] J. S. J. v. D. J L Provis, *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead publishing limited : CRC Press LLC, 2009.
- [4] Heidelberg Materials, "Heidelberg Materials," [Online]. Available: <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/segmentproduksjon-co2>. [Accessed 12 juni 2023].
- [5] "Geopolymer Concrete – A New Eco-friendly Material of Construction," 3 Mars 2017. [Online]. Available: <https://theconstructor.org/concrete/geopolymer-concrete-ecofriendly-construction-material/9430/>. [Accessed 2023 Mars 12].
- [6] J. L. P. .. K. A. .. S. A. B. .. D. B. .. A. B. .. A. C. .. S. C. .. M. C. .. A. D. .. K. D.-D. .. A. D. .. V. D. .. G. J. G. G. .. S. N. ., "RILEM TC 247-DTA round robin test: mix design and reproducibility of compressive strength of alkaliactivated concretes," 2019.
- [7] H. U. A. M. Azad A. Mohammed, "Survey of Mechanical Properties of Geopolymer Concrete: A Comprehensive Review and Data Analysis," [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8398852/>. [Accessed 13 Mars 2023].
- [8] N. F. a. C. S. a. Z. Z. b. H. W. b. Linmei Wu a b, "sciencedirect," 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817309558>. [Accessed 2 Mai 2023].
- [9] P. K. S. H. N. Monita Olivia, "Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete," 2008.
- [10] "PETROLOGI," [Online]. Available: <https://googleblog.com/2016/08/23/jotunitt/>. [Accessed 12 April 2023].
- [11] "PETROLOGI," [Online]. Available: <https://googleblog.com/2016/08/23/ilemenitt/>. [Accessed 12 April 2023].
- [12] R. Antonsen, "SNL," [Online]. Available: https://snl.no/Titania_AS. [Accessed 12 April 2023].
- [13] "valide," [Online]. Available: <https://valide.no/portfolio/saferock>. [Accessed 11 April 2023].
- [14] R. M. Andrew, "Earth System Science Data," 2019. [Online]. Available: <https://essd.copernicus.org/articles/11/1675/2019/>. [Accessed 20 April 2023].
- [15] C. L. S. K. C. H. (. Z. Yu Zhuang, "researchgate," 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/298328252_Fly_Ash-based_Geopolymer_Clean_Production_Properties_and_Applications. [Accessed 22 April 2023].
- [16] D. W. S. E. S. D. M. & R. B. V. Hardjito, "concrete.org," 2014. [Online]. Available: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=13485>. [Accessed 24 April 2023].
- [17] B. Pedersen, "Statens Vegvesen," Januar 2019 2019. [Online]. Available: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen->

- xmlui/bitstream/handle/11250/2580688/Effekt%20av%20tilslag%20p%C3%A5%20betongens%20mekaniske%20egenskaper%20SVV%20rapport%20181%20%2811%20MB%29.pdf?sequence=1 . [Accessed 27 April 2023].
- [18] P. F. H. Ole Mejlhede Jensen, "sciencedirect," 2001. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601005014>. [Accessed 2 Mai 2023].
- [19] "byggforsk," September 2010. [Online]. Available: https://www.byggforsk.no/dokument/590/tilsetningsstoffer_for_betong#i2. [Accessed 24 Mai 2023].
- [20] D. W. L. X. Q. C. Z. Z. Keyu Chen, "sciencedirect," 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821002567>. [Accessed 28 Mai 2023].
- [21] European Commission, "Decarbonisation options for the cement industry," Decarbonisation options for the cement industry , Luxembourg, 2023.
- [22] Norsk Standard, "NS-EN 12390-3:2019 Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet," Standard Norge, Standard.no, 2019.
- [23] germanninstruments.com, "germanninstruments," [Online]. Available: <https://www.germanninstruments.com/wp-content/uploads/2022/09/AS-TDS-02-AutoShrink.pdf>. [Accessed 12 April 2023].
- [24] Norsk Standard, "NS-EN 12350-6:2019 Prøving av fersk betong - Del 6: Densitet," Standard Norge, 2019.
- [25] Stanadard Norge , "Stanadard Norge," 2019. [Online]. Available: <https://handle.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1104973>. [Accessed 13 April 2023].
- [26] Statens Vegvesen, "14.637 Kapillær sugeshastighet og porøsitet, PF," Statens Vegvesen, 1996.
- [27] "joseph-davidovits-biography," [Online]. Available: <https://www.davidovits.info/joseph-davidovits-biography/>. [Accessed 02 mars 2023].
- [28] Norsk Standard, "NS-EN 12350-2:2019 Prøving av fersk betong - Del 2: Synkmål," Standard Norge, 2019.

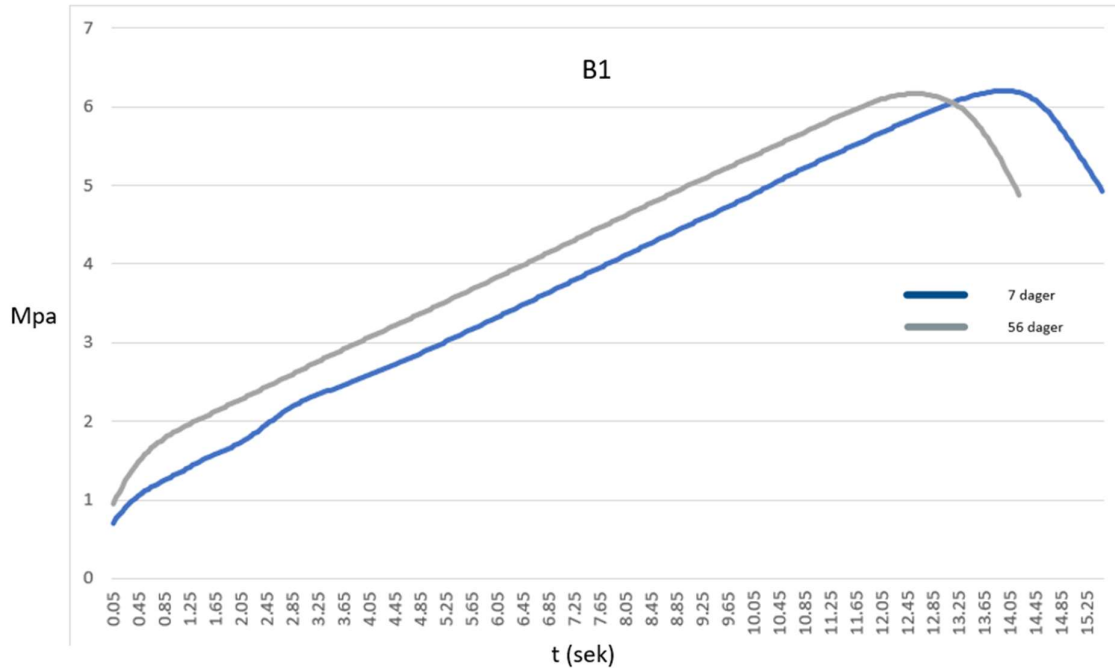
Vedlegg A

Prøve NR	Test etter 7 dager			Test etter 28 dager			Test etter 56 Dager		
	KN	Mpa	Dato	KN	Mpa	Dato	KN	Mpa	Dato
B1-1	15,515 kN	6,2 MPa	27.02.2023	17,322 kN	6,929 Mpa	20.03.2023	15,418 kN	6,167 Mpa	17.04.2023
B1-V	16,511 kN	6,604 MPa	27.02.2023	21,393 kN	8,557 Mpa	20.03.2023	20,372 kN	8,149 mPa	17.04.2023
B1-A	17,250 kN	6,900 MPa	27.02.2023	22,400 kN	8,960 Mpa	20.03.2023	20,698 kN	8,279 Mpa	17.04.2023
B1-2	12,236 kN	4,894 Mpa	28.02.2023	17,400 kN	6,960 Mpa	21.03.2023	14,363 kN	5,745 Mpa	18.04.2023
B1-V2	155,235 kN	6,094 Mpa	28.02.2023	22,741 kN	9,096 Mpa	21.03.2023	22,134 kN	8,854 Mpa	18.04.2023
B1-V3	16,545 kN	6,618 Mpa	06.03.2023	24,250 kN	9,7 Mpa	27.03.2023	17,141 kN	6,856 Mpa	24.04.2023
B1-C1	14,889 kN	5,690 Mpa	06.02.2023	22,309 kN	8,924 Mpa	27.03.2023	18,190 kN	7,276 Mpa	24.04.2023
B1-C2	21,483 kN	8,593 Mpa	21.03.2023 Ble testet 22.03.2023	36,498 kN	14,599 Mpa	12.04.2023	34,717 kN	13,887 Mpa	10.05.2023
B1 - C3	Kube 1: 69,781 kN Kube 2: 72,671 kN	Kube 1: 6,978 MPa Kube 2: 7,267 MPa	24.03.2023	Kube 1: 95,519 kN Kube 2: 96,028 kN	Kube 1: 9,252 Mpa Kube 2: 9,603 Mpa	14.04.2023	Kube 1: 77,235 kN Kube 2: 76,427 kN Kube 3: 80,484 kN Kube 4: 82,961 kN	Kube 1: 7,724 Mpa Kube 2: 7,643 Mpa Kube 3: 8,048 Mpa Kube 4: 8,296 Mpa	12.05.2023

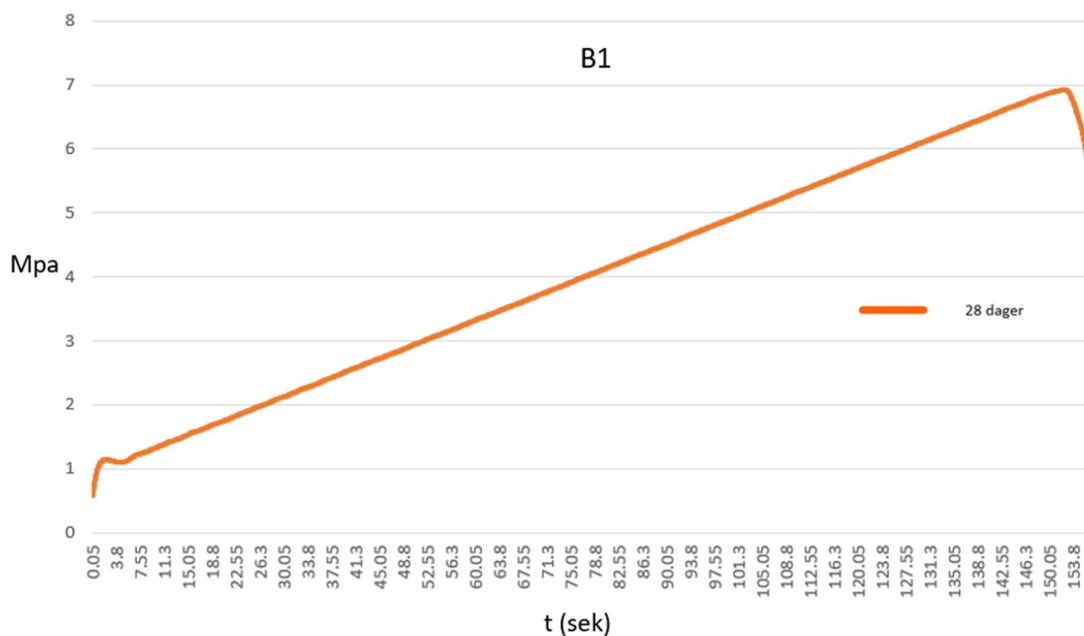
Tabell 25 Detaljert oversikt over resultatene fra trykkfasthetstesten for alle prøvestykkene.

Vedlegg B

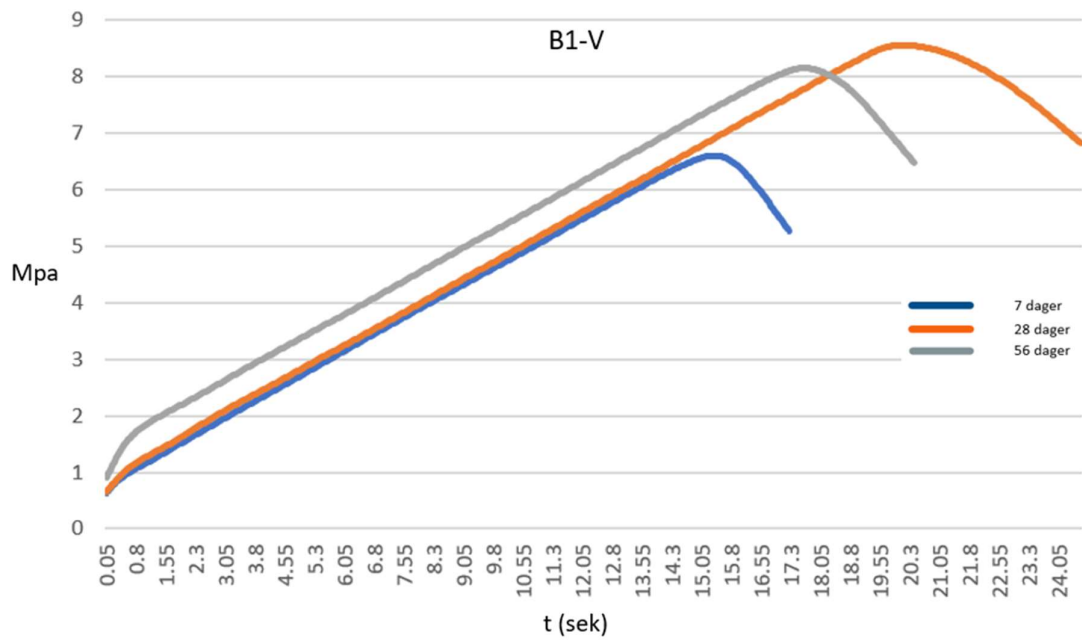
Grunnet en feil innstilling på testmaskin for test av prøve B1 etter 28 dager er resultatene fordelt i to grafer. Ett diagram for 7 dager og 56 dager, og ett for 28 dager.



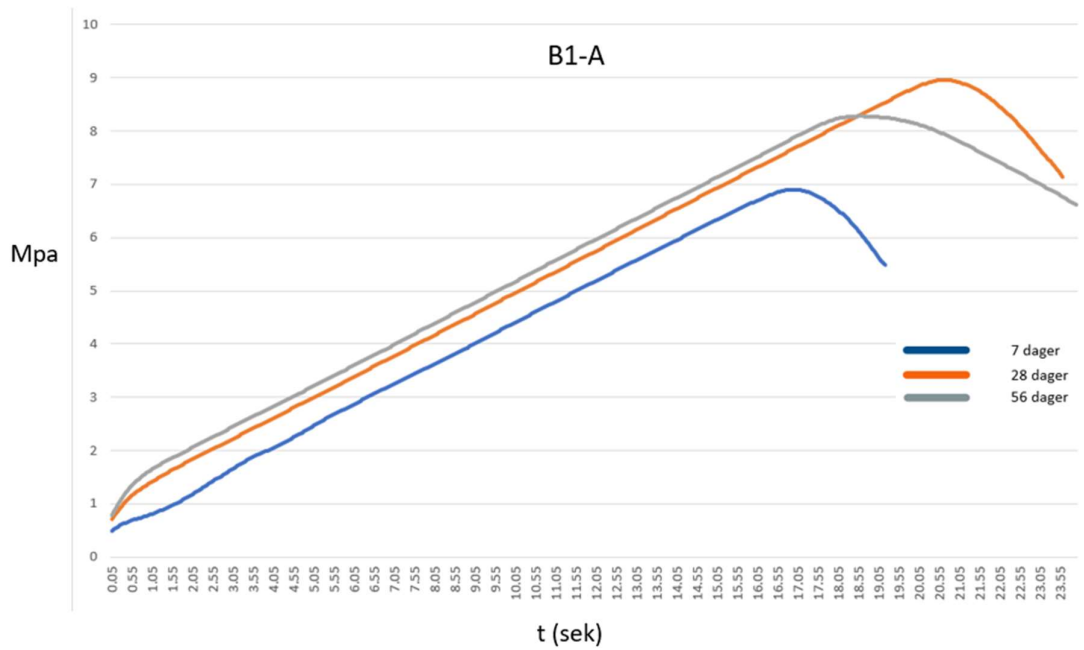
Figur 27 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1 etter 7 og 56 dager



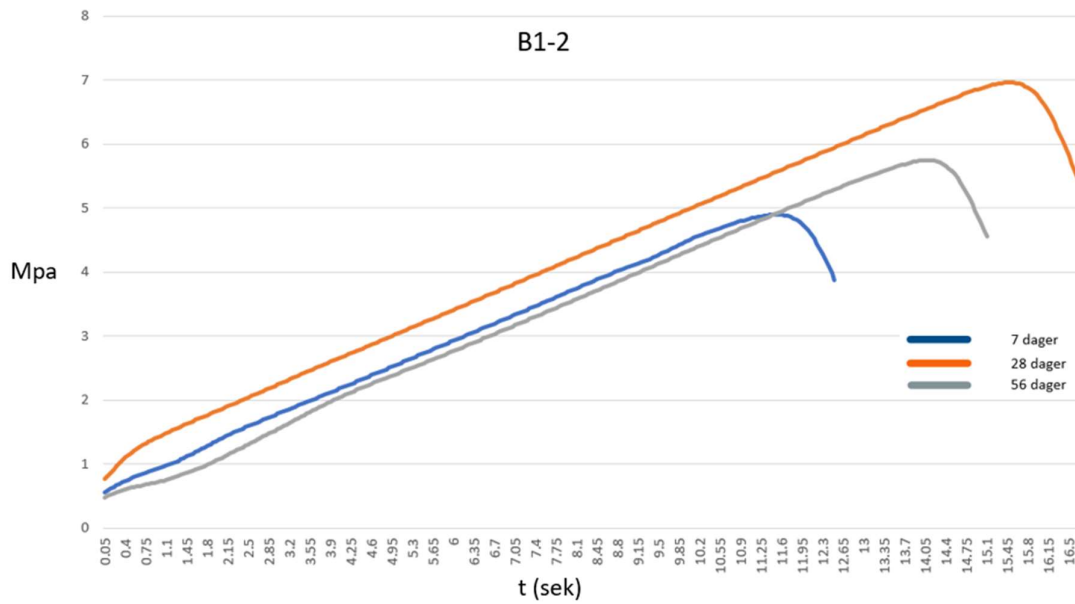
Figur 28 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1 etter 28 dager



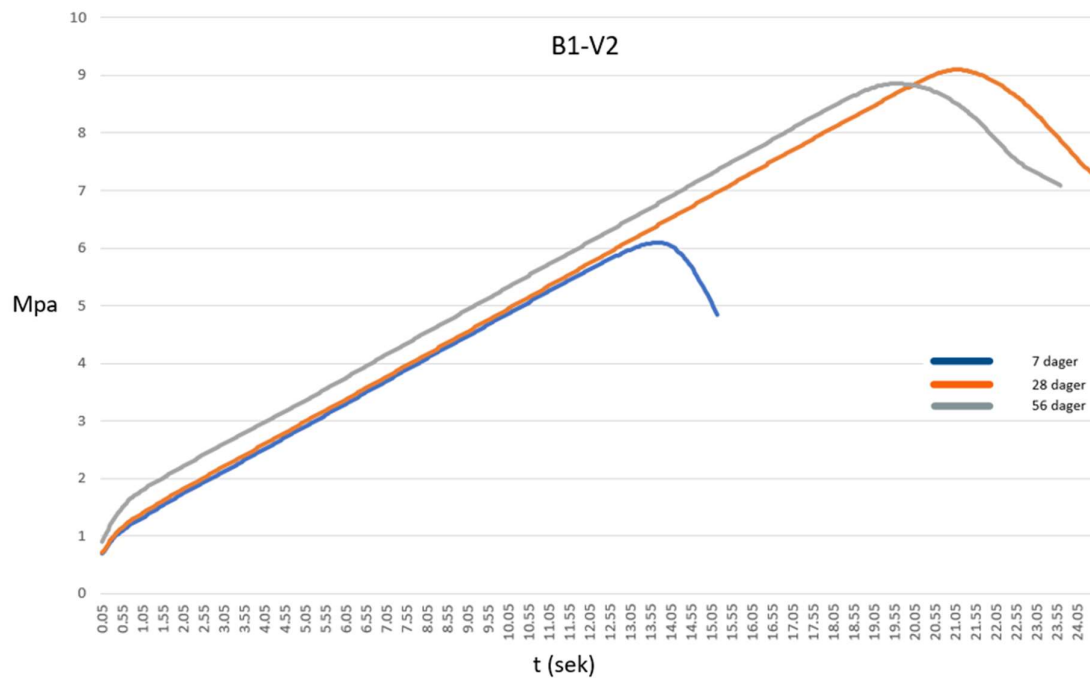
Figur 29 Graf som viser resultater fra trykfasthetstestene utført på prøvestykke B1-V etter 7,28 og 56 dager



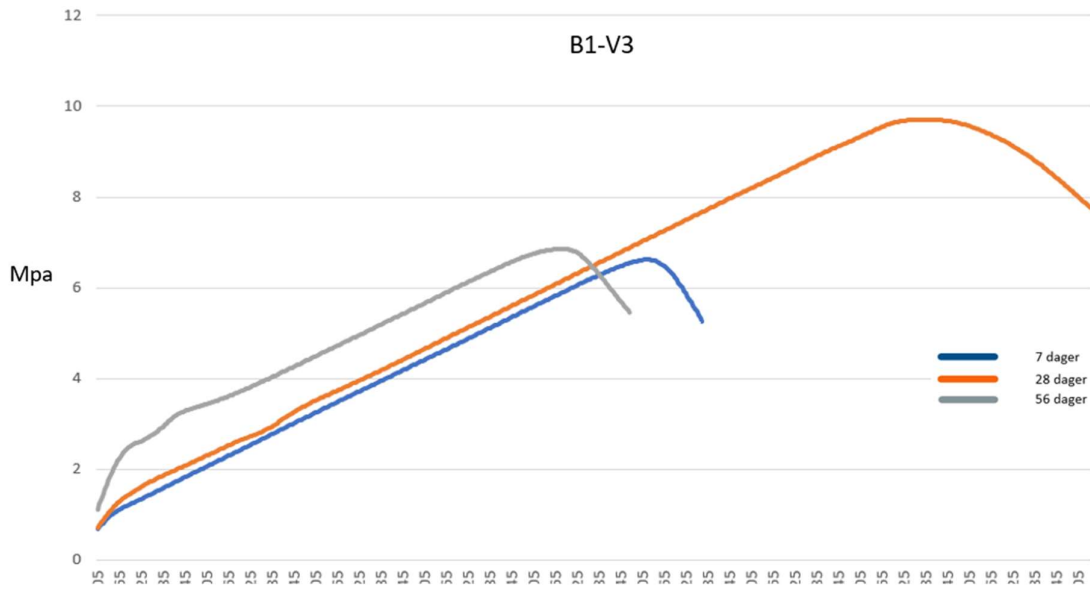
Figur 30 Graf som viser resultater fra trykfasthetstestene utført på prøvestykke B1-A etter 7,28 og 56 dager



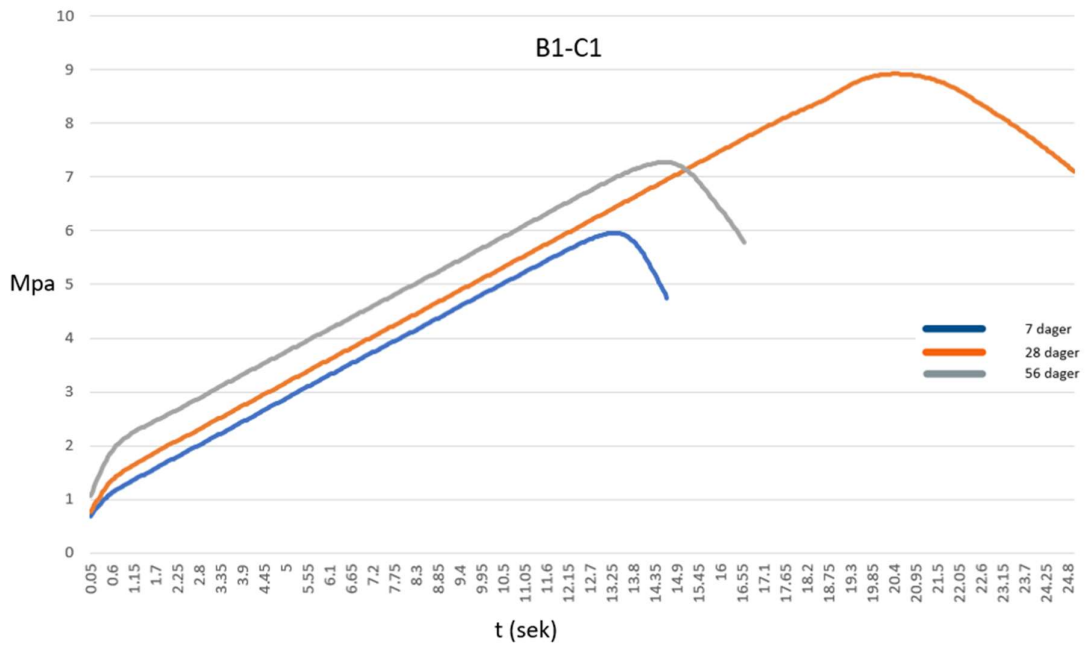
Figur 31 Graf som viser resultater fra trykfasthetstestene utført på prøvestykke B1-2 etter 7,28 og 56 dager



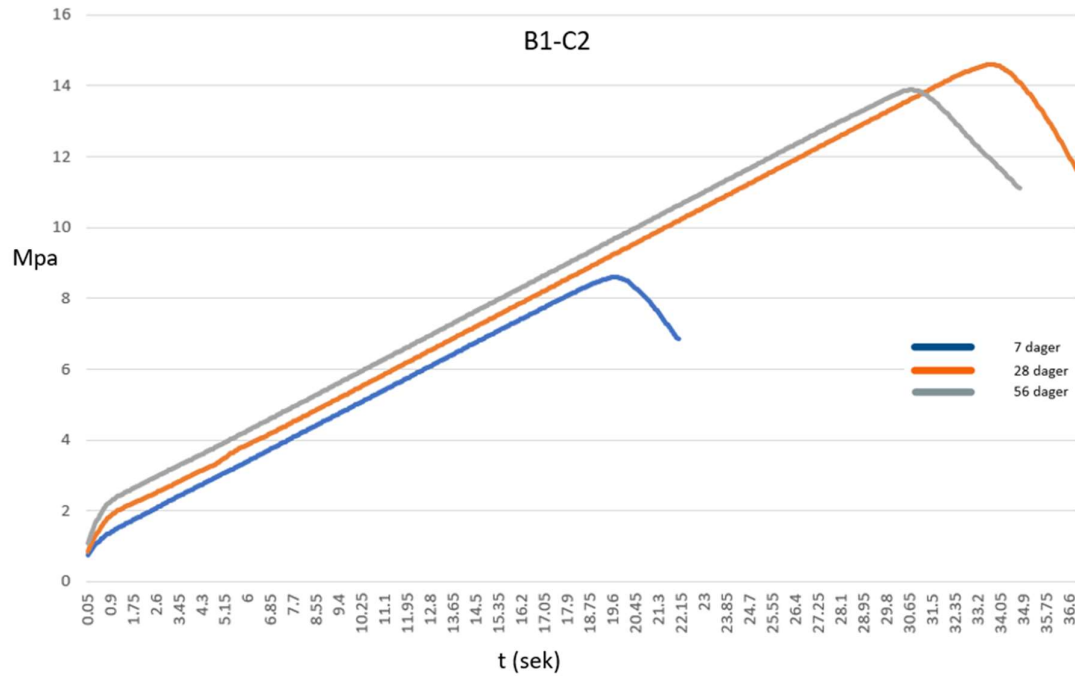
Figur 32 Graf som viser resultater fra trykfasthetstestene utført på prøvestykke B1-V2 etter 7,28 og 56 dager



Figur 33 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-V3 etter 7,28 og 56 dager



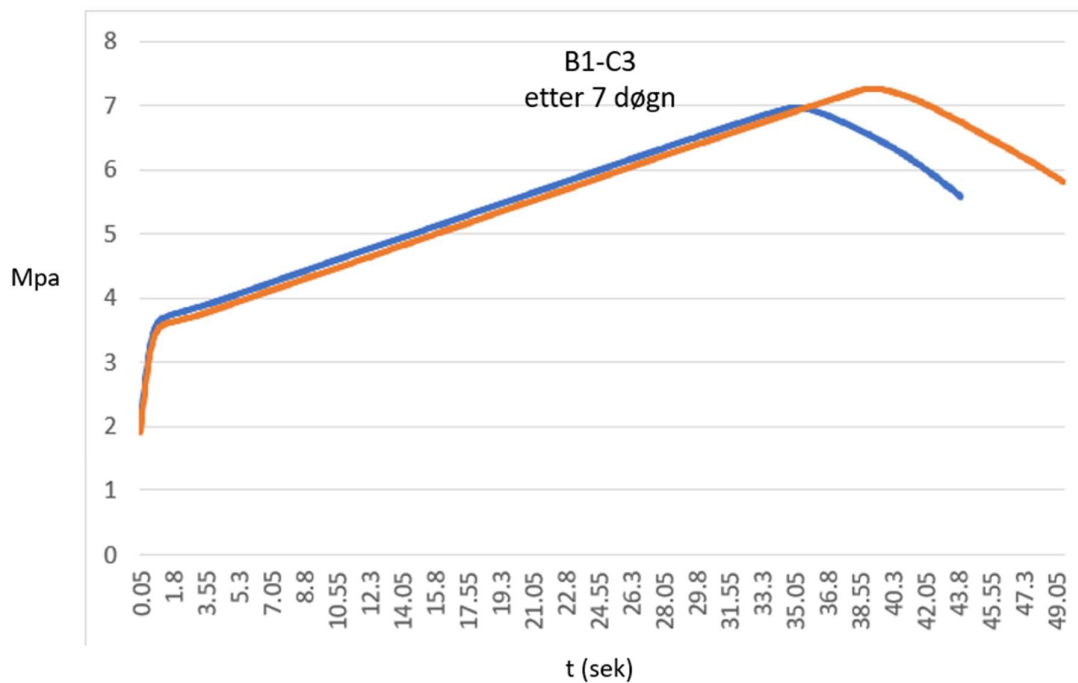
Figur 34 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-C1 etter 7,28 og 56 dager



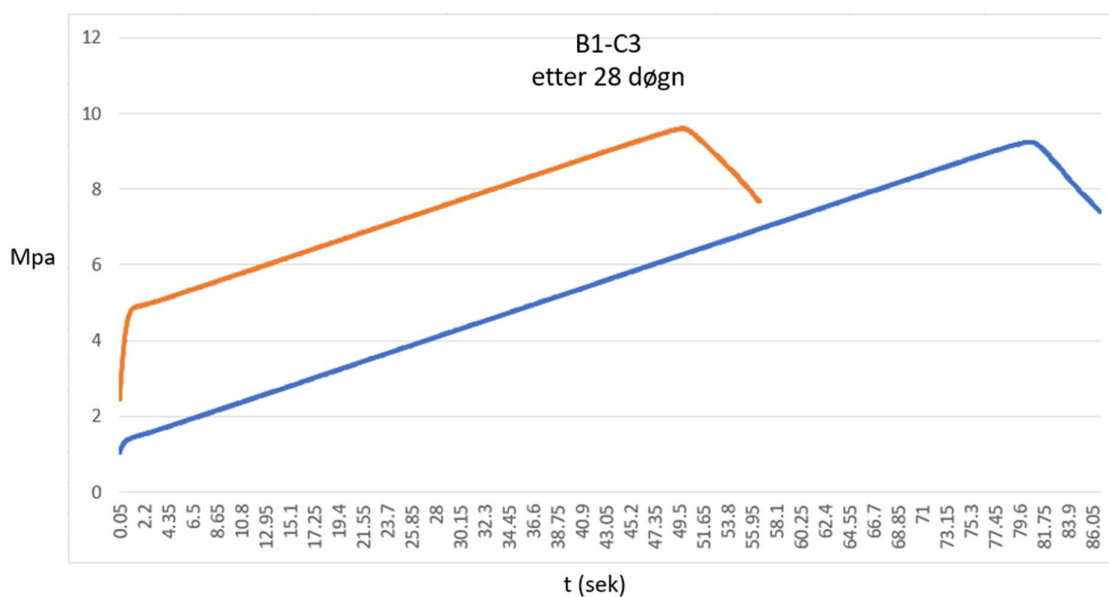
Figur 35 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykke B1-C2 etter 7,28 og 56 dager

Vedlegg C

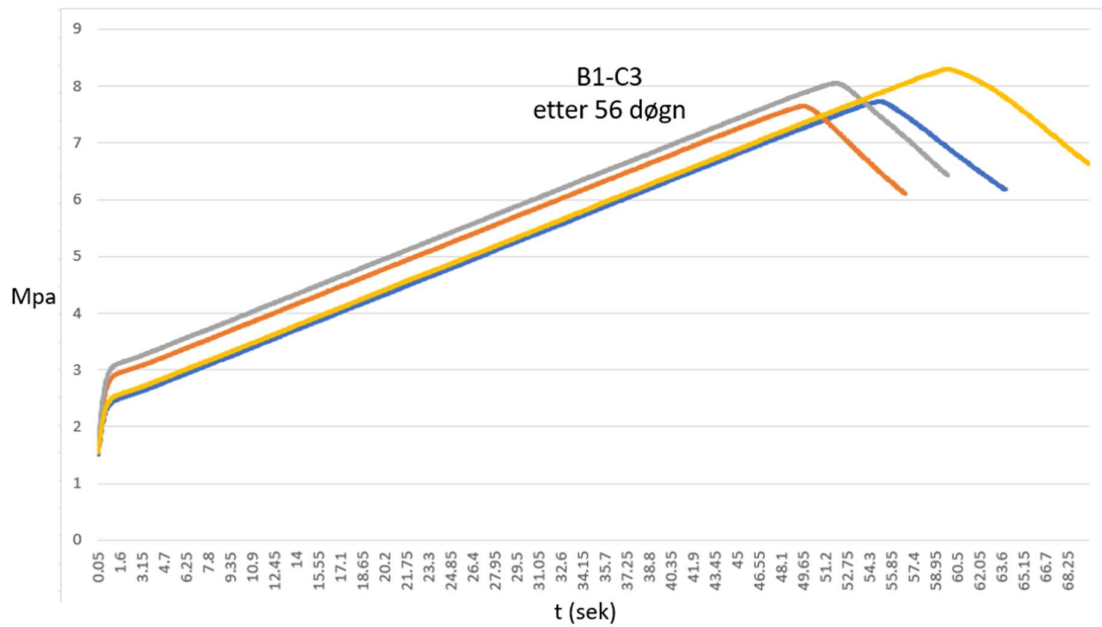
Figurer illustrerer trykkfastheten frem til brudd for hver enkelt terning. Y-aksen viser MPa og X-aksen sekunder



Figur 36 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykkene etter 7 dager.



Figur 37 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykkene etter 28 dager.



Figur 38 Graf som viser resultater fra trykkfasthetstestene utført på prøvestykkene etter 7 dager.