



Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Vårsemesteret, 2018

Åpen / Konfidensiell

Konstruksjoner og materialer

Forfatter: Jon Gunnar Nøvik

(signatur forfatter)

Fagansvarlig: Kjell Tore Fosså

Veileder(e):

Tittel på masteroppgaven:

Hvilke parametere har størst innvirkning på friksjonen ved glidestøp

Engelsk tittel:

Which parameters have the greatest impact on friction by slipforming

Studiepoeng: 30

Emneord:

Glidestøp

Løftefrekvens/ løftehøyde

Friksjon

Sidetall: 68

+vedlegg/annet: 21

Stavanger, 15.06/2018

dato/år

## Forord

Denne oppgaven er skrevet våren 2018 og markerer slutten på et toårig masterstudium i konstruksjoner og materialer ved Det teknisk- naturvitenskaplige fakultetet ved Universitetet i Stavanger.

Jeg vil benytte anledningen til å takke min veileder Kjell Tore Fosså for all akademisk veiledning og forslag til emne. Hans doktoravhandling og kunnskap om temaet har vært meget nyttig, da mengden med litteratur er begrenset om glidestøp.

Jeg må også takke Jarle Berge og Samdar kakay som alltid har bidratt med arbeidet på laboratoriet, uten deres hjelp ville ikke alle forsøkene vært mulig å gjennomføre.

Til slutt må jeg takke Glenn Østreim Levang og Ole Emil Karlsen for grunnleggende opplæring i programvaren Matlab.

## Sammendrag

Glidestøp er en forskalingstype som gjør det mulig å støpe høye konstruksjoner uten at det oppstår horisontale skjøter. Når forholdene ligger til rette, er det en effektiv byggemetode.

Teknikken benytter en lav form som stadig forflyttes oppover konstruksjonen. I takt med at den beveger seg oppover, blir forskalingen stadig fylt med fersk betong. Det er ved forflytningen av forskalingen friksjon oppstår mellom veggene i forskalingen og betongen. Dersom denne friksjonen blir for høy, kan skader i konstruksjonens overflate oppstå.

I denne oppgaven studeres det hvorvidt forskjellige parametere innvirker på den oppståtte friksjonen mellom betong og glidepanel, formulert som følgende forskningsspørsmål: Hvilke parametere har størst innvirkning på friksjonen ved utførelse av glidestøp?

I forsøk på å besvare forskningsspørsmålet ble det først foretatt en gjennomgang av så mye relevant litteratur og tidligere forskning gjort rundt temaet som var mulig å oppdrive. Deretter ble det satt opp et laboratorieprogram, som ble utført på betonglaboratoriet ved Universitetet i Stavanger. Her ble det gjennomført ti forskjellige glideforsøk. Disse ga data som ble behandlet og analysert.

På bakgrunn av laboratorieresultatene, kan det dessverre ikke konkluderes med at noen av variasjonene som ble foretatt har noen distinkt påvirkning i noen bestemt retning. Riktignok viser noen av resultatene en tendens til at stor løftehøyde virker positivt med tanke på friksjonen.

## Innhold

1	Innledning.....	1
1.1	Mål med oppgaven.....	1
2	Metode.....	3
2.1	Litteratursøk.....	4
2.2	Validitet og reliabilitet.....	5
3	Teori.....	6
3.1	Betongteori.....	6
3.1.1	Volumendringer og porer i betong.....	6
3.1.2	Plastisk svinn.....	6
3.1.3	Plastisk setning.....	7
3.1.4	Autogent svinn.....	7
3.1.5	Uttørking.....	9
3.1.6	Temperaturbevegelser.....	10
3.1.7	Temperatur til omgivelser.....	10
3.2	Poretrykk.....	11
3.2.1	Effektivt trykk.....	12
3.3	Friksjon.....	14
3.3.1	Friksjonskoeffisient:.....	14
3.3.2	Statisk friksjon.....	15
3.3.3	Kinetisk friksjon.....	16
3.4	Faktorer som spiller inn på friksjonen.....	19
3.4.1	Løftefrekvens og løftehøyde.....	19
3.4.2	Effekt av silikastøv.....	21
3.4.3	Effekten av betongens luftinnhold.....	22
3.5	Glideformens oppbygning.....	23
3.5.1	overflateskader.....	25
3.5.2	Utglidning / valker.....	26
3.5.3	Glidestøp i praksis.....	26
3.5.4	Utførelse.....	27
3.5.5	Konstruksjonens geometriske utforming.....	28
3.6	Glidehastighet.....	29
3.7	Glideform sammenlignet med mer tradisjonelle forskalingsmetoder.....	30
4	Laboratoriearbeid.....	32
4.1	Betongblanding.....	32
4.1.1	Sement.....	33

4.1.2	Pozzolaner .....	33
4.1.3	Tilslag .....	34
4.1.4	Tilsetningsstoffer .....	36
4.2	Blandeprosess.....	36
4.2.1	Testing av fersk betong .....	37
4.2.2	Prøving av herdet betong .....	38
4.2.3	Testing av poretrykkmåler.....	38
4.2.4	Proporsjonering.....	38
4.3	Gliderigg .....	40
4.3.1	Oppbygning av glideriggen .....	40
4.3.2	Glidepanelet .....	41
4.3.3	Løftekraft og posisjon .....	41
4.3.4	Temperaturmåler .....	41
4.3.5	Normaltrykk.....	42
4.3.6	Poretrykk .....	42
4.3.7	Datainnsamling.....	44
4.3.8	Figurforklaring .....	44
4.3.9	Testprogram .....	46
4.4	Betong benyttet i glidestøp.....	49
5	Resultater og drøfting .....	51
5.1	Feilkilder .....	56
5.2	Diskusjon .....	61
6	Konklusjon .....	67
7	Referanser .....	68
8	Vedlegg.....	69

## Figurligste

Figur 1.....	7
Figur 2.....	9
Figur 3 Development of pore water pressure in fresh cement paste [5].....	11
Figur 4.....	13
Figur 5.....	14
Figur 6.....	16
Figur 7 Friksjonskoeffisienten beregnet.....	17
Figur 9.....	19
Figur 10.....	20
Figur 11.....	21
Figur 12.....	21
Figur 13.....	22
Figur 14.....	22
Figur 15 Glideform, basert på [9]......	24
Figur 16.....	25
Figur 17 eksempel på konisk utført glidestøp [1].....	28
Figur 18 hydrostatisktrykk i fersk betong [4].....	31
Figur 19.....	35
Figur 20 siktekurve 0/8.....	35
Figur 21 siktekurve 8/16.....	36
Figur 22 [13].....	40
Figur 23 [13].....	43
Figur 24 et løft.....	44
Figur 25 løfteintervall.....	45
Figur 26 Statisk friksjon ved strekk.....	45
Figur 27 Graf for kraften som på virker Glidepanel.....	52
Figur 28 Graf for glidepanelets posisjon.....	52
Figur 29.....	57
Figur 30.....	58
Figur 31.....	59
Figur 32.....	60

## Tabbeliste

Tabell 4.....	33
Tabell 2.....	39
Tabell 3.....	39
Tabell 1.....	47
Tabell 5.....	53
Tabell 6.....	55

# 1 Innledning

Betong er i dag et av de mest benyttede byggematerialene vi har. Betongens egenskaper gjør den svært attraktiv i mange sammenhenger, og gjør bruksområdet favner bredt. De forskjellige bruksområdene, gjør at det finnes mange forskalingsmetoder egnet for hvert sitt bruk. kostnad, tid og kvalitet på ferdigstilt produkt er faktorer som står høyt på prioriteringslisten når forskalingstype velges.

Vertikal glidestøp er hovedsakelig benyttet i høye konstruksjoner med relativt enkel geometrisk utforming; brutårn, siloer og offshore plattformer er eksempler hvor forskalingsteknikken blir brukt.

Betongen støpes lag på lag i en lav forskaling, gjerne under en 1,5 meter høy. Forskalingen løftes kontinuerlig etter hvert som betongen herder. Når glideformen er satt i gang, er det ofte en prosess som pågår uten stopp, døgnet igjennom, fram til det aktuelle produktet er ferdigstilt. Stans eller pause under støpning bringer ofte med seg konsekvenser. Dette gjør sitt til at planlegging og prosjektering er utfordrende i forhold til mer tradisjonelle forskalingstyper, der pause i utstøpningen ikke sjeldent er skadelig, men ofte nødvendig. Feil og mangler i prosjektets planlegging eller logistikk kan resultere i økt friksjon mellom den glidende formen og betongen. Økt friksjon foringer ofte kvaliteten på ferdigstilt konstruksjon i form av overflateskader. Dette er svært uønsket. Varige skader kan forringe kvaliteten og levetiden til konstruksjonen. Hvis feilene kan repareres er utbredelser i alle fall kostbart.

På betonglaboratoriet ved Universitetet i Stavanger ble det i 2016 bygget en gliderigg. Denne riggen er kan måle friksjonen som oppstår mellom betong og glidepanel, trykk skapt av betongen, temperaturforløp og poretrykk. Riggen åpner for mange testmuligheter og problemstillinger i forbindelse med glidestøp, noe som har inspirert til denne masteroppgaven.

## 1.1 Mål med oppgaven

I denne oppgaven vil fokuset ligge i å undersøke hvilken effekt variasjon i forskjellige parametere har på friksjon. Parametere vil bli endret er; betongens v/c- tall, løftehøyde og løftefrekvens.

Formulert som følgende forskningsspørsmål:

Hvilken parameter har størst innvirkning på friksjon ved glidestøp?





## 2 Metode

### Metode og forskningsdesign

Når forskningsspørsmålet som ønskes besvart er klart, må det legges en plan for hvordan forskningsprosjektet skal gjennomføres. Det må tas stilling til hvilken framgangsmåte som skal benyttes for å innhente nødvendig datamateriell for videre analyse.

Den aktuelle problemstillingen er avgjørende for hvilken framgangsmåte som bør velges, det må velges en måte som er hensiktsmessig og egner seg for å belyse det stilte spørsmålet.

I denne oppgaven benyttes det som kalles for kausalt design for å undersøke årsak-virkning av de ulike variablene knyttet til utførelse av glidestøp. Kausalt design betyr årsakssammenheng, det vil si at noe forårsaker noe annet. Dette forskningsdesignet benyttes når det strebes etter å finne en statistisk årsakssammenheng mellom to variabler. Sammenhengen mellom påvirkning og effekt er ofte kompleks og uklar, da forskjellige påvirkninger kan virke sammen og også påvirke hverandre. Resultateffekten vil ofte være summen av mange påvirkninger.

Utfordringer som er viktige å være klar over ved bruk av kausalt design er derfor vanskelighetene rundt det å slå fast om det er noen sammenheng mellom de ytre påvirkningene og resultatet. Det er viktig å ikke konkludere for raskt, på grunn av at det tilsynelatende ser ut som det finnes en sammenheng mellom en gitt påvirkning og utslagsgivende resultat, viser det seg ofte at det er en annen, mellomliggende påvirkning, som har minst like stor innflytelse på det målte resultatet.

Spørsmålet et kausalt design skal besvare er med andre ord om det er en årsak- og/eller et virkningsforhold mellom to eller flere variabler.

I et kausalt design benyttes en eller annen variant for et eksperiment. Hovedmålet eksperimentet er å manipulere de uavhengige variablene for å på den måten kunne bedømme hvorvidt de har noen påvirkning på de resulterende dataene.

I et laboratorieeksperiment forsøkes det å skape en så virkelighetstro situasjon som mulig, i kontrollerte omgivelser. Blant annet blir usikkerhet knyttet til vær, vind og temperaturforskjeller eliminert her. I et forsøk gjennomført på laboratorium, har man også avhengig av tilgjengelig testutstyr flere muligheter til å manipulere, endre og isolere de variablene man er interessert i langt

større grad enn hva man normalt har mulighet til ute ved en reel støpeprosess ved bruk av en glideform laget med tanke på produksjon som formål.

God kontroll over mulige bias er essensielt for å oppnå god intern validitet. Intern validitet, også kalt indre validitet, er holdbarheten av betingelser for å trekke slutninger om årsakssammenheng mellom den antatte årsaksfaktoren og den tilhørende virkningen av denne. Det vil si i hvilken grad vi kan konkludere med at en effekt faktisk kan tilskrives årsaken som var spådd i forkant.

[2]

En forskningsmetode er en fremgangsmåte brukt i forskning for å innsamle informasjon for å forhåpentligvis kunne besvare en aktuell hypotese eller problemstilling. Definisjonsmessig er en metode betegnet som en planmessig fremgangsmåte, og viser hvordan datainnsamling blir utført og etterbehandling av innsamlet data.

Det finnes mange forskjellige måter å samle inn informasjon på. I dette kapitlet vil de ulike metodeformene bli kort presentert og diskutert. En begrunnelse på hvorfor de spesifikke metodene som er benyttet i denne oppgaven, blir også gitt.

## 2.1 Litteratursøk

Litteratursøk er nødvendig for å samle inn nok informasjon for å tilegne seg nødvendig kunnskap om aktuelt tema. God litteratur er den enkleste måten å danne seg et teoretisk grunnlag.

Dessverre er tilgjengelig litteratur som omhandler glidestøp begrenset. Mye av det som er å finne ute på internett, er fra bedrifter som driver med salg av glidestøptjenester. I mange tilfeller skinner det gjennom at mye av det som blir sagt er farget (forståelig nok) av ønske om salg. Det betyr uansett at man må være kritisk til informasjonen som gis via nevnte kanaler. Det skal også nevnes at slike aktører ofte «sparer» en potensiell kjøper av tjenester, for veldig innadgående og detaljert informasjon om hva som foregår. Her ligger fokuset på ferdig resultat, og hva en kjøper kan forvente.

Mangelen på gode kilder om temaet, fører som regel til at jeg støtter meg til tekster og rapporter gitt av veileder ved Universitetet i Stavanger.

Når det gjelder informasjon angående generell betongteori, stiller tilgangen til teori helt annerledes. Her bugner det av god litteratur.

## 2.2 Validitet og reliabilitet

Det å skulle verifisere og forsikre seg om validiteten og reliabiliteten til oppsøkte kilder kan være en utfordring. I den grad det er mulig, er det klokt kryssjekke flere uavhengige kilder for å kunne styrke troverdighet til innhentet informasjon.

## 3 Teori

I dette kapitlet vil det gjennomgås det som anses som mest relevant teori for denne oppgaven. Det går ikke gått inn i dybden på betongteknologi i denne oppgaven. Teorikapitlet fokuserer mer på det som påvirker glidestøpingen, ikke hvilke egenskaper de forskjellige tilsetningsstoffene har som gjør at de påvirker betongen.

### 3.1 Betongteori

#### 3.1.1 Volumendringer og porer i betong

Endringer av volumet i betong er i praksis ikke til å unngå. Denne endringen springer ut fra en rekke sammensatte mekanismer. Prosessene utspiller seg på forskjellige tidspunkt av betongens livsløp. Noen skjer så tidlig at betongen fremdeles befinner seg i plastisk fase, mens andre inntreffer i herdet tilstand av betongen.

Vi har:

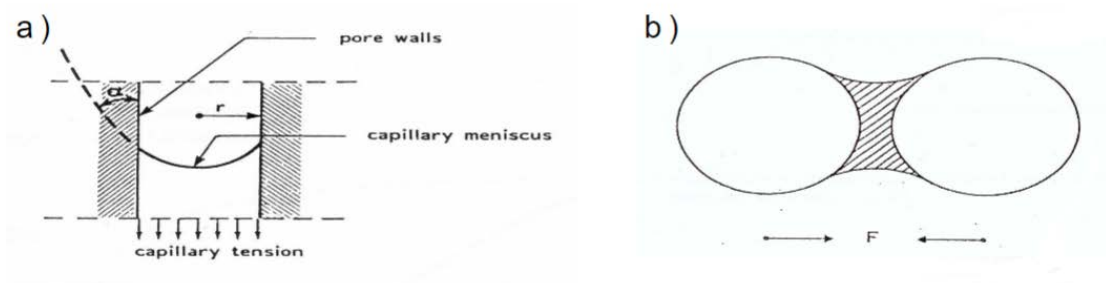
- Plastisk svinn
- Plastiske setninger
- Autogent svinn
- temperaturbevegelser
- Uttørkingssvinn

#### 3.1.2 Plastisk svinn

Når vann fordamper fra betongens overflate i fersk fase, oppstår fenomenet plastisk svinn. Betongen vil tørke ut hvis fordampningshastigheten fra betongoverflaten er høyere enn betongens evne til å transportere vann til overflaten, kalt bleeding (vannutskillelse). Dette leder til at det dannes vannmenisker ved betongoverflaten. (se figg) noe som igjen gir kapillært undertrykk i porevannet og kontraksjonskrefter mellom partiklene(figb). Gjennomsnittlig avstand mellom partiklene vil avta og betongen vil trekke seg sammen- plastisk svinn har oppstått.

Vi ser altså at vannets fordampning fra betongoverflaten er drivkraften ved plastisk svinn.

Fordampningshastigheten til det aktuelle vannet er avhengige av mange faktorer. Betongens temperatur, temperatur til omgivelsene, vind og relativ luftfuktighet er eksempler på viktige faktorer som spiller inn. [3]



Figur 1

### 3.1.3 Plastisk setning

Drivkreftene bak setningen er kompleks og sammensatt. Tradisjonelt har fenomenet blitt forklart ved densitetsforskjeller mellom vannet og betongens faste partikler. Denne forskjellen gjør at i plastisk fase beveger partiklene seg nedover mens vannet blir presset opp, eller står i ro. Når vann samler seg på toppen kalles det også bleeding. En betong med mye bleeding vil derfor ha større setning. Hvis betongen ikke er stabil med tanke på luft, vil luftbobler kunne unnslippe ved at de beveger seg oppover til overflaten. [3]

### 3.1.4 Autogent svinn

Her er det snakk om et svinn betongen produserer selv, uten ytre påvirkning. Dette bunner i at reaksjonsproduktet, altså faststoffet som dannes når reaktantene sement og vann reagerer har et mindre volum enn de to ingrediensene utgjorde før den kjemiske prosessen tok til. Fenomenet går derfor unner navnet kjemisk svinn. Det kjemiske svinnet starter når vann tilsettes og pågår så lenge den kjemiske prosessen finner sted. Dette kan vedvare i flere måneder.

Faststoffet denne prosessen resulterer i, antas å ha et redusert volum på 25,4% sammenlignet med vannets og sementens utgangspunktet. Det kjemiske svinnet anslås å være  $0,06 \text{ cm}^3$  pr. gram reagert sement, noe som utgjør et tapt volum på omtrent 8% ved full hydratisering for en sementpasta med

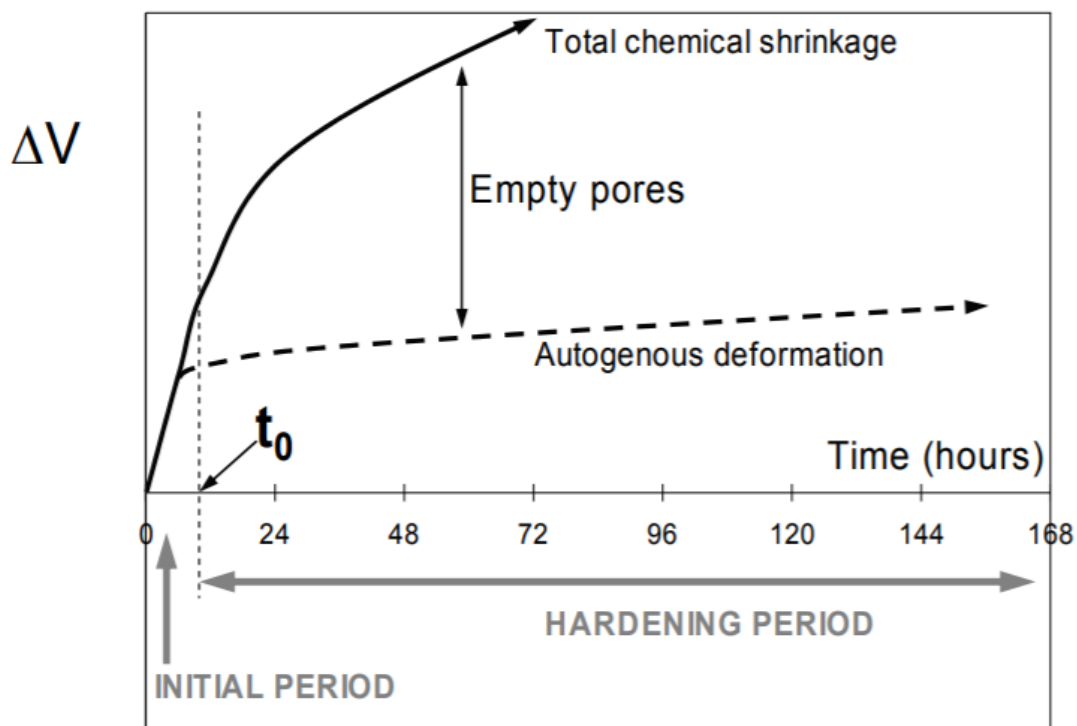
v/c-tall på 0,4. Volumtapet som her har oppstått, skaper porer i bindemidlet. Her skal det presiseres at det er det ytre svinn som kalles autogent svinn.

Porene det kjemiske svinnet nå har skapt i bindingsmidlet kalles gjerne for kjemiske svinnporer, og kan betraktes som en integrert del av faststoffets gel- og kapillærporestruktur. Vannmetningsgraden til denne porestrukturen som nå har oppstått under hydratiseringen, vil reduseres gradvis etter som at vannet forbrukes i hydratiseringsprosessen. Fenomenet kalles selvuttørking. Konsekvensen av dette er at fuktigheten i poresystemet synker. Selvuttørkingen skaper vannmenisker og kapillært undertrykk i bindemidlets porer.

En prinsipiell sammenheng mellom kjemisk svinn og autogent svinn er gitt i figuren under. Kjemisk svinn opptrer fra tidspunktet sementen kommer i kontakt med vann. Før betongen stivner til, i den plastiske fasen er kjemisk og autogent likt på grunn av at det kjemiske svinnet kun resulterer et ytre volumkollaps. Da betongen avbinder, altså mister sin støpelighet og opparbeider seg et selvbærende skjellet, ved tidspunkt  $t_0$  utvikler bindemidlet styrke og stivhet nok til at porer dannes.

Hydratiseringen fortsetter derimot, det fører til at innholdet i betongen fortsetter å krympe selv om det ytre volumet nå er satt. Etter hvert utvikles det også kapillært undertrykk på grunn av at porene som oppstår ikke fylles med noe, det blir vakuum. Med andre ord kan det ikke dannes undertrykk i porene før etter avbindingen har funnet sted.

Betong med lavt v/c-tall utvikler mange små og få store porer, slik porekorrelasjon gir ofte høyere kapillært undertrykk og dermed større autogent svinn. [3]



Figur 2

Differansen mellom den heltrukne og stiplede kurven på figuren over uttrykker porene i bindemidlet som har oppstått av det kjemiske svinnet. Selv om svinnet etter  $t_0$  kan se relativt lite ut, kan det og tilhørende undertrykk være betydelig.

### 3.1.5 Uttørking

Herdet betong som eksponeres for luft vil tørke ut og utvikle uttørkingssvinn. I likhet med plastisk svinn, er det her de kapillære spenningene og undertrykket i porevannet som er hoveddrivkraften, men kalles uttørkingssvinn når det er snakk om herdet betong.

For å få sementpasten fullstendig hydratisert, kreves en vannmengde tilsvarende et v/c-tall på 0,25. I tillegg vil vann tilsvarende et vektforhold v/c-tall lik 0,15 fysisk binde seg til sementpastaens overflate. Sementpasten kalles også gel, derfor har dette oppbunede vannet fått navnet gelvann. Hvis det blir tilsatt mer vann enn dette ( $0,25 + 0,15 = 0,40$ ) vil overskuddet fordeles jevnt i pastaen og kalt kapillærvann.

Etter en viss tid vil betongen i mer eller mindre grad tørke ut. Det fordampede vannet etterlater seg relativt grove porer, kapillærporer. Jo mer vann som tilføres under blanding, desto flere porer vil

oppstå når betongen tørker ut. Når vannet har fordampet, vil betongen forsøke å trekke seg sammen. Dersom sammentrekningskreftene blir større enn betongens strekkfasthet, vil sprekker oppstå. [3]

### 3.1.6 Temperaturbevegelser

I likhet med alle andre materialer utvider betong seg når temperaturen stiger, tilsvarende trekker den seg sammen under avkjøling.

Alle de her nevnte formene for svinn er i hver sin spesifikke situasjon av betydning og må tas hensyn til på sin respektive måte, om det være seg tildekning, oppfukning av overflate eller tilføring av tilsetningsstoffer med egenskaper som motvirker det. Selv om alle fenomenene som på sin måte bidrar til svinn, er det i sammenheng med utførelse av glidestøp noen formene vi er spesielt opptatte av. Her er det tilfellene som tiltrer tidlig, som er av størst interesse. Det vil si fenomenene som gir utslag før betongen er ut av glideformen, altså plastisk svinn og autogent svinn. [4]

### 3.1.7 Temperatur til omgivelser

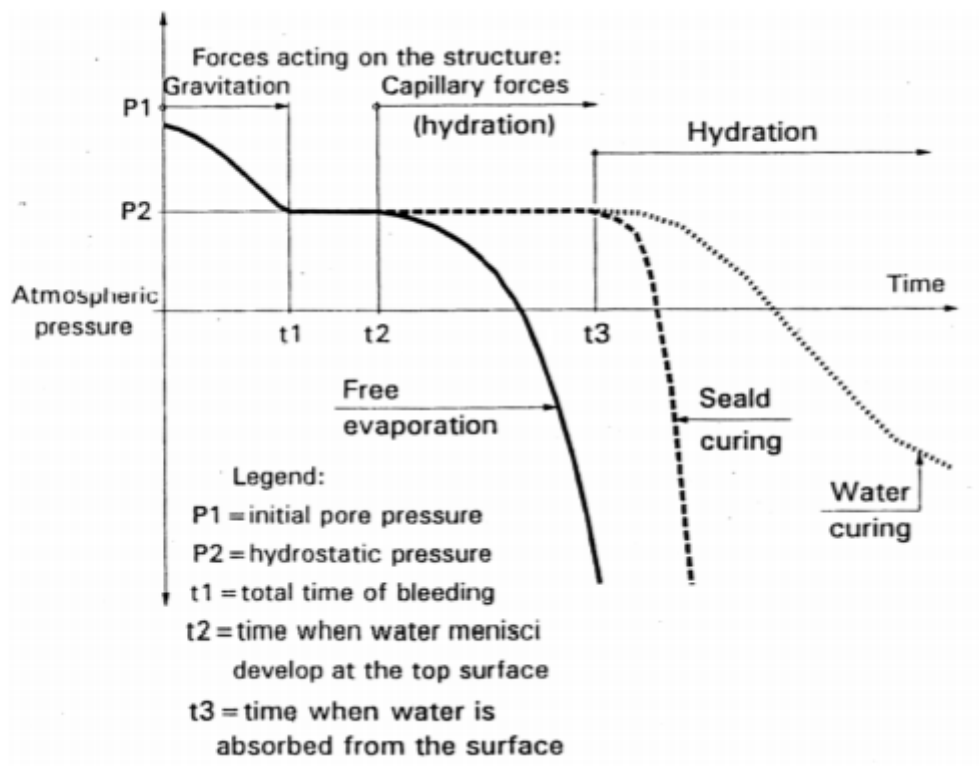
Så å si alle kjemiske reaksjoner går fortere i høy temperatur, hydratiseringen i betong er i så måte intet unntak. Høy temperatur på omgivelsene vil føre til at varmeutviklingen skjer raskere. Den maksimale temperaturen vil også kunne bli høyere, da potensialet for nedkjøling fra omgivelsene er redusert.



### 3.2 Poretrykk

Poretrykket generert fra betongens porer vil altså variere fram til betongen er herdet. I flytende fase (pastisk form) er det settinger av de tyngre partiklene og blødninger i betongen som påvirker hvor stort trykk som oppstår.

Etter hvert som herdningen tar til, er det hydratiseringen av sementen, absorbering av vann fra porevann og overflatetørring som styrer dette presset. I figuren under kan vi se hvordan vannporetrykket utvikler seg fram mot herding.



Figur 3 Development of pore water pressure in fresh cement paste [5].

Fallet i poretrykket fra P1 til P2 skyldes settingen av betongens tyngre partikler. I den samme perioden oppstår også blødning på overflaten. Trykket ved oppstart (P1) er avhengig av betongens densitet og dybden hvor den aktuelle målingen utføres. Overflaten er dekt av vann fra blødningen i tidsrommet mellom t1 og t2, her vil poretrykket derfor forholde seg stabilt. Ved t2 begynner, takker være fordampning, overflaten å tørke ut. Dette fører til at poretrykket synker. Grunnen til dette

poretrykkfallet vi her ser, er dannelsen av vannmenisker på overflaten og hydratiseringen av sementen.

Effekten av hydratiseringen er tydeliggjort ved å ta med tilfeller hvor betongen herder forseglet eller i vannbad. Ved å se ser vi ved t3. Her ser vi at poretrykket synker selv om prøven er forseglet, og fordamping gjort umulig. Det er også tatt med en linje som viser hvordan poretrykket vil oppføre seg for en vannherdet prøve. Hastigheten til trykkfallet vil reduseres fordi vann grunnet undertrykket vil bli sugd inn i prøven.

### 3.2.1 Effektivt trykk

Betongens egenskaper forandres mye fra den blir ført inn i glideforskalingen, til den ser dagens lys i et den kommer frem under glideformen. Med faseovergangen betongen er igjennom i løpet av sin ferd gjennom forskalingen, følger det også andre effekter. I den plastiske fasen her betongen en flytende konsistens og tilhørende lav skjærstyrke. Grunnen til dette er at det enda er oppnådd liten kohesjon og lav indre friksjon mellom partiklene. I takt med at betongen nå beveger seg mer mot semi-plastisk fase øker skjærstyrken. Hvis vi nå, som tidligere nevnt, deler betongen opp i kategoriene; partikkelfase og matriksfase, ser vi at det er kun partikkelfasen som kan overføre. Matriksfasen kan overføre trykk, både negativt og positivt, men ikke skjærkrefter. Effektivt trykk transporteres igjennom kontaktpunkter, i mellom partikler. Ettersom det kun er de faste partiklene i denne stadiet av betongen som kan motstå skjærkrefter, kan effektivt trykk kalkuleres ut fra følgende uttrykk:

$$\sigma' = \sigma - u \left( \frac{A - A_c}{A} \right)$$

Hvor

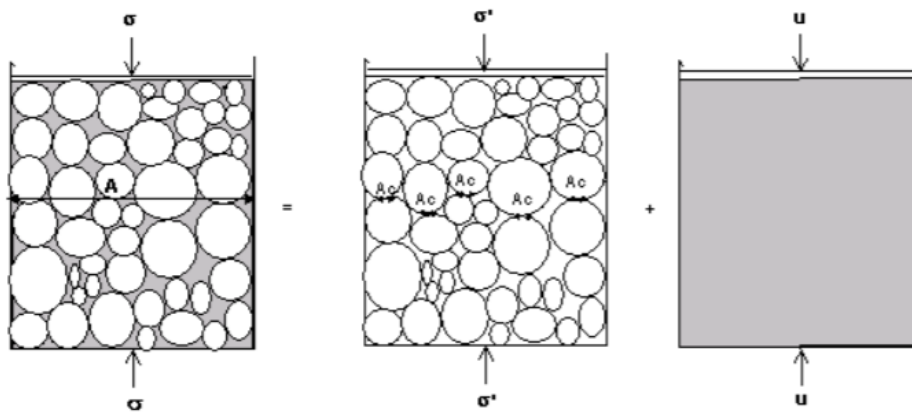
$\sigma$  = Totalt trykk

$\sigma'$  = Effektivt trykk

u = Porevanntrykk

A= Totale areal

$A_c$  = Arealet hvor partiklene har kontakt



Figur 4

Kontaktflatearealet,  $A_c$  antas å være så liten sammenlignet med det totale arealet ( $A$ ) at det uten nevneverdig feil kan settes lik null. Takket være denne antagelsen, kan formelen forenkles til

$$\sigma' = \sigma - u. [6]$$

Denne formelen beskriver forholdet mellom det totale trykket ( $\sigma$ ) og det effektive trykket ( $\sigma'$ ). Det totale trykket er trykket som består av effektivt trykk, det som overføres via partiklene og poretrykket. Når det oppstår negativt poretrykk, vil det effektive trykket være positivt, å presse partiklene sammen. For enkelthetskyld kan vi se for oss vakumpakking av erter. Trykket mellom partiklene vil bidra med styrke og stabilitet i den ferske betongen. Et positivt poretrykk vil redusere det effektive trykket. Når poretrykket er lik null, er skjærstyrken i fersk betong så lav at betongen ikke vil være i stand til å motstå noen form for krefter.

I overflaten mellom glideform og betong er det antatt at poretrykket har en effekt på det effektive trykket. Med økt effektivt trykk vil trolig partiklene i betongen tvinges med høyere kraft mot glidepanelet.

### 3.3 Friksjon

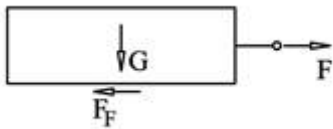
For en kloss liggende på et underlag gjelder de generelle friksjonsreglene. Friksjon er tilnærmet proporsjonal med normalkraften som virker mot underlaget. Vi kan sette opp uttrykket;

$$F = \mu * N$$

Hvor F: friksjonskraften

N: Normalkraften

$\mu$ : friksjonskoeffisienten



Figur 5

#### 3.3.1 Friksjonskoeffisient:

Friksjonstallet, eller friksjonskoeffisienten, er et forholdstall som sier noe om forholdet mellom friksjonskraften og normalkraften. Friksjonstallet avhenger av overflatestrukturen, altså hvor glatt eller ru, smurt eller ikke smurt overflatene på de legemene som er i kontakt med hverandre er.

De generelle lovene innen friksjon brukes for å beskrive korrelasjonen mellom friksjon og normalkraft mellom to faste materialer. Friksjonsloven kan også overføres til å gjelde i betong, men siden den ferske betongen består av en partikkelmasse i et flytende material, må normaltrykket erstattes med effektivt trykk. Det effektive trykket representerer trykket mellom partiklene, det er bare de faste partiklene i betongen som kan motstå skjærspenning og bidrar til friksjon. Det effektive trykket beregnes ved å trekke fra poretrykket fra normaltrykket. Normaltrykket, som er betongens trykk mot glidepanelet, holdes under utførelsen av forsøkene konstante. Dermed varierer poretrykket. Det går fra et positivt trykk i starten, til negativt nivå ved et senere stadium etter hvert som hydratiseringen finner sted. Primært er det derfor variasjonen i poretrykket som bidrar til variasjonen i det effektive trykket. [7]

Innen glidestøp gjelder følgende ligninger.

- $\sigma' = \sigma - u$
- $\sigma'$ : effektivt trykk [Pa]
- $\sigma$ : normaltrykk [Pa]
- $u$ : Poretrykk [Pa]
- $F = \mu * \sigma' \rightarrow F = \mu * (\sigma - u)$
- $\mu = \frac{F}{\sigma'}$

Av dette får vi:

$$\mu_s = \frac{Fs}{\sigma'}$$

$$\mu_g = \frac{Fg}{\sigma'}$$

$\mu_s$  = Statisk friksjonskoeffisient

$\mu_g$  = glidefriksjonskoeffisient

Statisk friksjonskoeffisienten gjelder ved overgangen fra hvile til bevegelse.

Glidefriksjonskoeffisienten er gjeldene først når bevegelse er oppnådd.

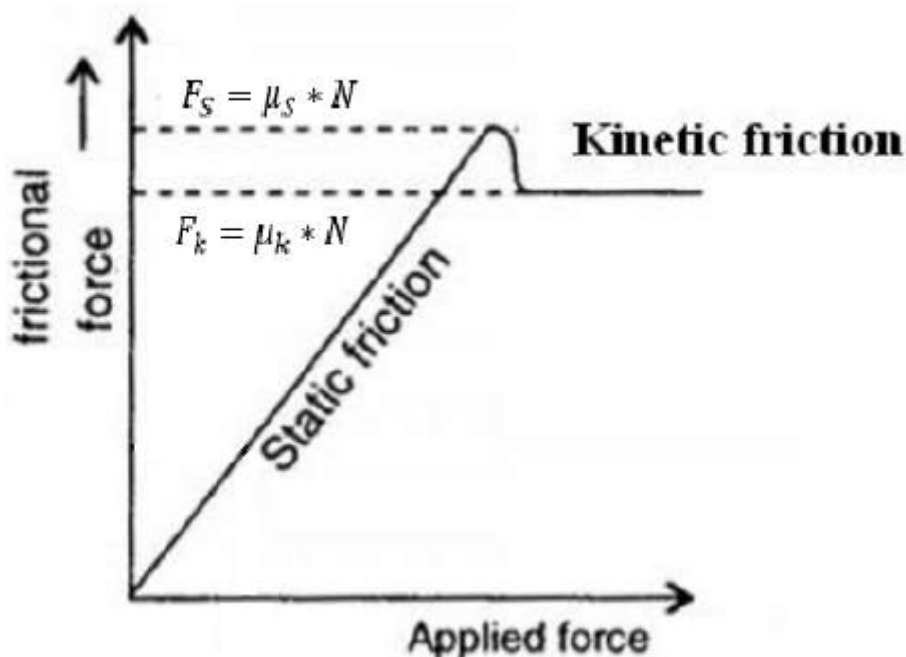
### 3.3.2 Statisk friksjon

Statisk friksjon virker mellom legemer som er i kontakt, men ikke beveger seg i forhold til hverandre. Statisk friksjon er vanligvis noe større enn den kinetiske friksjon og er kraften som må "overvinnes" for å få en gjenstand i bevegelse. I glidestøpsammenheng, gjelder altså denne formen for friksjon fra det tidspunktet fra de hydrauliske gjekkene på glideformen starter å bygge opp trykk, til formen slipper og begynner å gli langs betongoverflaten.

### 3.3.3 Kinetisk friksjon

Denne formen for friksjon oppstår når det allerede har oppstått bevegelse mellom to flater. Kinetisk friksjon er typisk lavere enn statisk friksjon. Dette gjelder altså når glideforskalingen er satt i bevegelse.

Forskjellen mellom statisk -og glidefriksjon illustreres av grafen nedenfor:



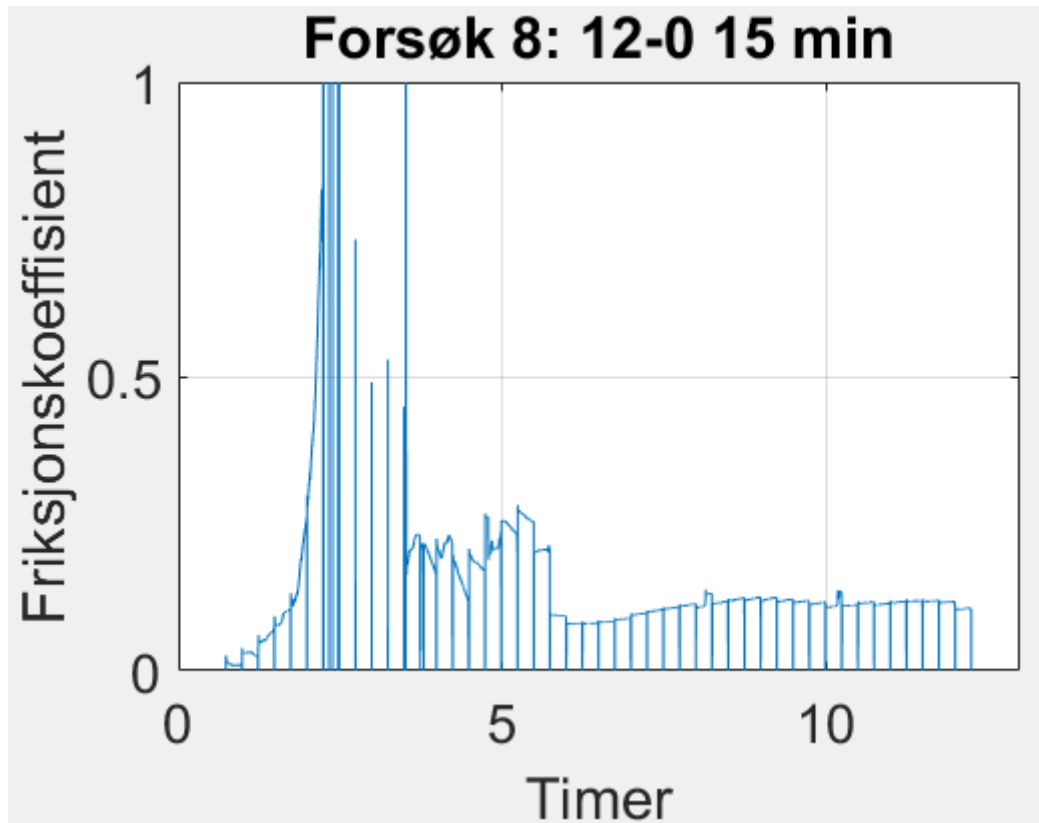
[8]

Figur 6

Her ser vi statisk friksjon langs den skrå linja, mens kinetisk friksjon er representert etter droppet på grafen. Når objektene glir i forhold til hverandre, stabiliseres friksjonen på et nivå under toppnoteringen av hva den statiske friksjonen oppnår.

Både statiske og kinetiske friksjonskoeffisienter er varierende, spesielt i første fasen av herdingen. Dette skyldes hovedsakelig små variasjoner i det effektive trykket. Små variasjoner her, vil ha stor effekt på kurven til den beregnede friksjonskoeffisienten. Etter maksimal (tension wall) nås (statisk og glidende), reduseres friksjonskoeffisienten.

Det antas at maksimal løftebelastning oppstår når poretrykket begynner å øke ved grensesnittet.



Figur 7 Friksjonskoeffisienten beregnet

Her er friksjonskoeffisienten beregnet ut fra  $\mu = \frac{F}{\sigma'}$  etter hvert som forsøket går.

Det antas at både den statiske og glidende friksjonskoeffisienten er konstant for hver test. [6]  
Verdien av friksjonskoeffisienten vil være avhenge av variasjoner i slipformteknikken, paneloverflate og type betong. Vi kan merke oss at små variasjoner i løftebelastningen vil resultere i relativ stor variasjon i friksjonskoeffisienten. Etter at poretrykket har bidratt til disse voldsomme svingningene i starten, ser vi at friksjonskoeffisienten legger seg på et relativt stabilt nivå.





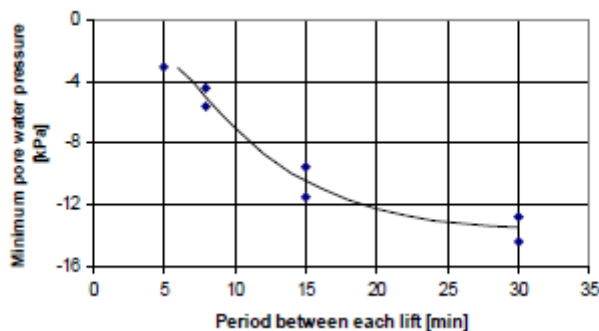
### 3.4 Faktorer som spiller inn på friksjonen

I forsøk på å forstå hvilke faktorer som spiller inn på friksjonen under en glidestøpprosess, må vi støtte oss undersøkelser gjort i forbindelse med temaet tidligere. Det finnes ikke mye Litteratur som omhandler justeringer av forskjellige parametere angående løftehøyde, løftefrekvens, betongens luftinnhold osv. dette delkapitlet støtter seg derfor utelukkende til undersøkelser og tanker Kjell Tore Fosså har gjort i doktoravhandlingen hans.

#### 3.4.1 Løftefrekvens og løftehøyde

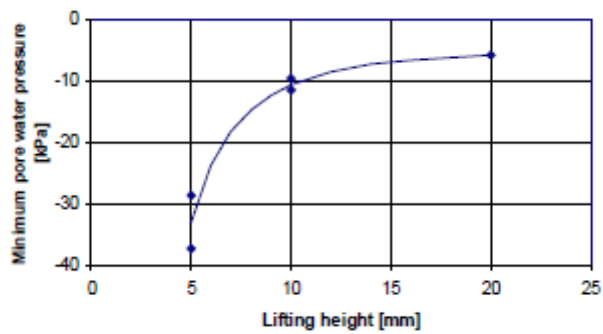
Med løftefrekvens, menes tiden som går mellom to løft. Det er rimelig å anta at undertrykket i betongens porer påvirkes av hvor ofte et løft forekommer. Det er grunn til å tro at bevegelse av formen vil forstyrre glidesonen av betong for hvert løft. Med glidesonen mener vi det ytterste betonglaget, det som ligger aller nærmest glideformen. Når dette laget blir forstyret av et løft synker poretrykket i dette området.

På samme måte er det observert at poretrykket har høyere reduksjon ved høye løft enn ved lave, her er også teorien at glidesonen blir mer forstyret ved et langt løft sammenlignet med et kort løft. Samtidig kan en tendens av at effekten avtar når man går i fra et løft på 20 mm til 10 kontra når det går fra 10mm til 5mm, ses. Løftemotstanden reduseres ved begge tilfellene av økningene av løftehøyde, men den reduseres ikke like mye ved den siste.



Figur 8

Som vi kan se ut fra grafen, synker poretrykket jo lengre det er mellom hvert løft. Med en frekvens på 5 minutter ser vi at det negative poretrykket er på rundt 3 kPa, mens det ved en løftefrekvens på 30 minutter ligger rundt 13-14 kPa.



Figur 9

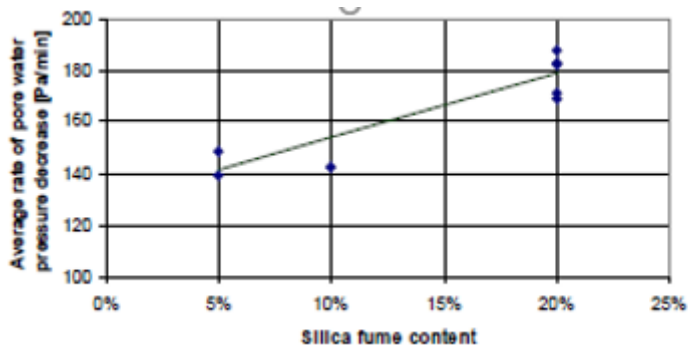
Her ser vi at ved en løftehøyde på 5 mm har et negativt poretrykk på omtrent 33 kPa. Ved 10 min er tilsvarende rundt 10 kPa. For løftehøyde på 20 mm er vi nede i omtrent 5 kPa. Vi ser tydelig at reduksjonen av poretrykk avtar med tilsvarende økning i høyde. Hvor 5 mm utgjorde en reduksjon på 23 kPa når vi økte fra 5 til 10mm, er tilsvarende reduksjon kun under 5 kPa når løftehøyden økes med 5 mm fra 10 til 15.

I litteraturen lanseres flere teorem om årsaken til dette. Det er valgt å ikke gå nærmere inn på hva mulig årsak til dette er i denne oppgaven.

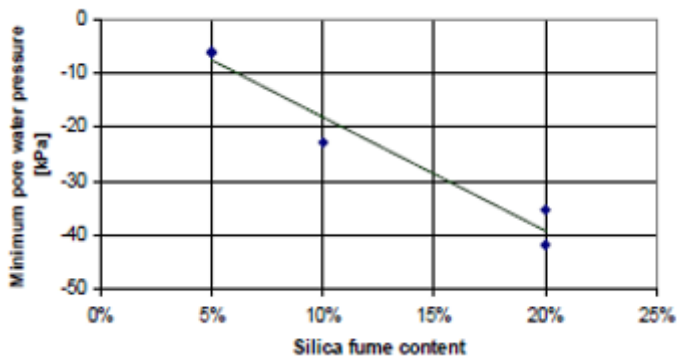
### 3.4.2 Effekt av silikastøv

Silikastøv er meget finkornet. Gjennomsnittlig diameter på et korn ligger rundt  $0,1 \mu\text{m}$ , det tilsvarer omtrent et hundredel av et gjennomsnittlig sementkorn. Finere struktur gir flere vannmenisker med liten radius. Dette medfører et lavere poretrykk og høyere friksjon.

Tilsetning av silika vil derfor ha påvirkning på partikkeldistribuering og konsentrasjonen av partiklene. Økt silikamengde resulterer i hurtigere retardering av poretrykket. Laveste oppnådde poretrykk antas å bli lavere med økt mengde silika.



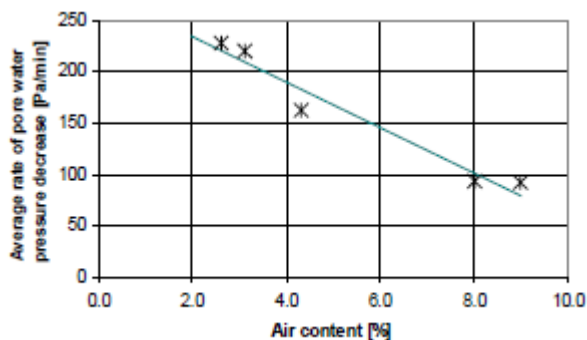
Figur 10



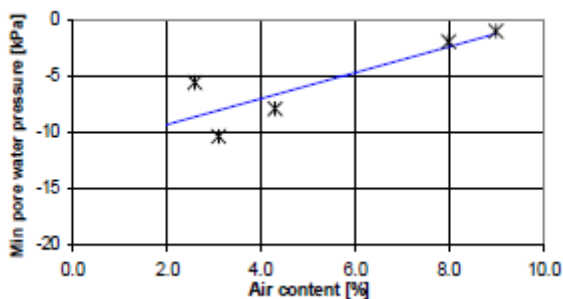
Figur 11

### 3.4.3 Effekten av betongens luftinnhold

Når det autogene svinnet oppstår vil det på grunn av at reaktantene i utgangpunktet opptok et større volum enn det nye produktmaterialet gjør, oppstå kontraksjonsporer. Dersom det ikke er noe luft i betongblandingen, vil det autogene svinnet resultere i et umiddelbart undertrykk i disse porene. Undertrykket her er som kjent det negative trykket vi snakker gjennomgående om i denne oppgaven. Derimot, om det finnes luft i betongen (noe det normalt, i varierende grad gjør), vil denne luften trekke inn til porene når kontraksjonsporene oppstår. Dette vil redusere effekten autogent svinn har på poretrykket, og føre til redusert oppbygging av poretrykket. Noe av vakuemet som ville ha oppstått under det autogene svinnet, blir nå fylt av luft.



Figur 12



Figur 13

[6]

### 3.5 Glidformens oppbygning

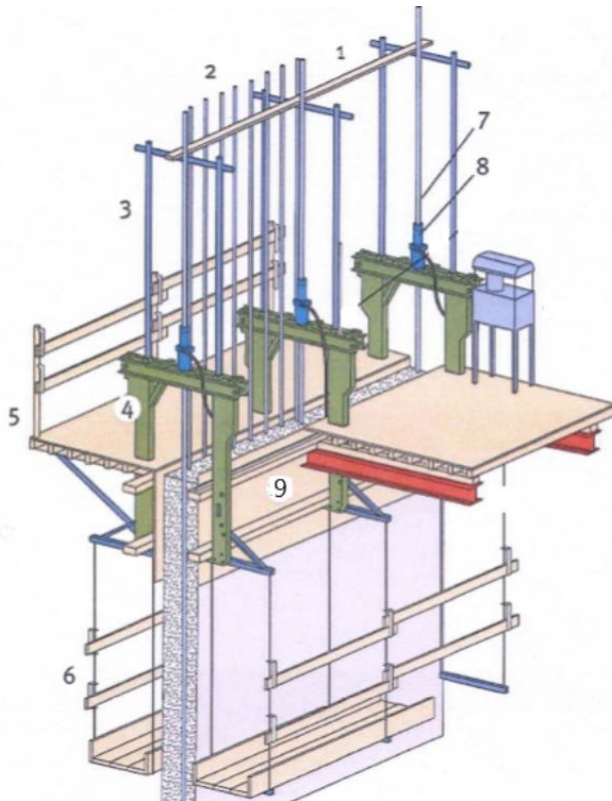
En gildestøp er som nevnt en bevegelig forskaling med begrenset høyde. Normal høyde på en typisk glideform måler ofte mellom 1- 1,2 meter. For å sikre at glidesidene, eller glidepanelene går parallelt når de blir dratt oppover, er de bundet sammen av en gaffellignende stålkonstruksjon gjerne kalt åk. Hydrauliske jekker som sørger for forskalingens bevegelse, er koblet til åkene som fordeler kreftene jevnt til begge sidene av formen. Åkene med tilhørende jekker, monteres normalt med 1,5 – 2 meters mellomrom. I tillegg til å dimensjoneres for å kunne fordele krefter slik at glidepanelene glir parallelt på begge sider, må de også motstå det hydrostatiske trykket som skapes når den ferske betongen som fylles i formen slik at de ikke glir ut i forhold til hverandre.

Jekkene klatrer i sin tur på det som blir kalt klatrestål. Klatrestålet kan eten bli støpt inn, eller trekkes opp etter endt støpning. Ofte ønskes det gjenbruk av dette spesialtilpassede klatrestålet. Det er da viktig at det lages en utsparring ved hjelp av gliderør, slik at stålet ikke blir tilgriset og gjort ubrukelig av betongsøl.

For å avlaste jekkene og det hydrauliske systemet i tiden mellom løftene, er systemet utstyrt med bremsere eller kiler for å holde igjen formen. Etter endt løftesekvens slippes det hydrauliske trykket i jekkene opp, og bremsene kobles inn. Bremsene eller kilene trenger litt tid før de holder, derfor vil formen på grunn av tyngdekraften bli dratt litt ned etter hvert løft. Det er imidlertid kun snakk om få millimeter, sjeldent over to.

Ved formens overkant monteres det en arbeidsplattform for armering, utstøping, komprimering og montering av eventuelle utsparringer. En slik plattform finnes som oftest på begge sider av formen. I tillegg til innlysende funksjon, med å muliggjøre forskjellige arbeidsoppgaver, sørger også arbeidsplattformen for avstivning i horisontalplanet som skal sikre at fasongen holdes som opprinnelig tenkt. Arbeidsplattformen bør utformes slik at vanntilsig etter eventuell nedbør unngås. Av sikkerhetshensyn, bør også plattformen utformes slik at betongsøl, verktøy og lignende ikke kan falle ned og forvolde skader på personell som befinner seg under.

Under selve formen henges det et hengestillas. I likhet med arbeidsplattformen, blir også dette stillaset ofte montert på begge sider av formen. Dette stillaset benyttes til inspeksjon av den ferdigstilte betongoverflaten i takt som den kommer til syne under formen, frigjøring av eventuelle innstøpningsgoods og utbedre eventuelle skader. I og med at hengestillaset henger under selve glideformen, må disse monteres etter at prosessen har pågått, slik at tilstrekkelig med høyde er oppnådd. Rasjonelt sett bør det heller ikke ventes for lenge, men gjøres på et tidspunkt som tillater montering fra bakkeplan.

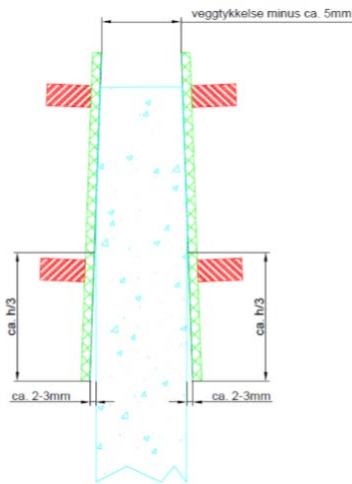


Figur 14 Glideform, basert på [9].

- 1) Styring for armering
- 2) Armering, skjematisk
- 3) Holder, armeringstyring
- 4) Løfteåk
- 5) Arbeidsplattform
- 6) Hengestillas
- 7) Klatrestål
- 8) Hydraulisk jekk
- 9) Glidepanel

Alle glideforskalingsformer bør lages med det som betegnes som slipp. Det betyr at glidepanelene monteres noe skråstilt, slik at det oppnås større åpning i bunn enn i toppen av formen. Det er ikke snakk om mye, kun 2-3 millimeter. Dette er viktig for at formen skal påvirke den nystøpte konstruksjonen i minst mulig grad under løftesekvensene. Det motsatte, altså «negativt slipp» må

unngås, da dette vil trigge løfteriss. Slippet bør heller ikke overstige nevnte mål, da dette øker faren for valker og utglidning på overflaten under utstøpning.



Figur 15

### 3.5.1 overflateskader

Overflateskader er en av hovedbekymringene ved utførelse av glidestøp. Ikke koster eventuelle utbedringer utført fra hengestillaset både tid og penger, sluttresultatet kan også forringes. Ved tilfeller av løfteriss kan dybden av overdekningen til armeringsstålet reduseres, og konstruksjonens evne til å motstå miljøpåkjenninger over tid vil naturlig nok lide samme skjebne. Tilsvarende kan også oppstå om betongklumper brenner seg fast til glideformen og gir vertikale striper etter forskalingen.

Løfteriss vises i form av horisontale riss på overflaten, vinkelrett på løfteretningen. Fenomenet forekommer om løftefrekvensen blir for lav. Ved rivning av tradisjonell forskaling, kan forskalingsnekken av og til kjenn at forskalingsplatene er sugd fast til betongen om rivningen tar til for kort tid etter støpningen. Dette skyldes det negative poretrykket som har oppstått i betongen. Hvis man da er for ivrig, kan deler av ytterste lag av betongen følge med forskalingen. Det samme skjer om man løfter for sjeldent i en glideforskaling, slik at betongen rekker å suge seg fast til glideforskalingen. Hyppigere løftefrekvens vil sørge for at disse bindingene mellom forskaling og betong reduseres. Slik reduseres også faren for løfteriss. For å hindre dette, er det viktig å sørge for at herdefronten til betongen lavt i formen. På denne måten oppnår vi at brorparten av betongen som befinner seg i formen blir berørt når den befinner seg i plastisk fase. Dette er fordelaktig da løfteriss ikke opptrer i denne fasetilstanden av betongen.

Begroing av betong på glidepanelene er så å si umulig å unngå. Omfanget av problemet er avhengig av egenskapene til glidepanelene, klimatiskeforhold, betongresept, plassering av innstøpningsgods, løftehastighet også videre. Uansett forutsetninger vil glidepanelene være mer utsatt for begroing ved høye temperaturer og sterk sol. Friksjonen vil øke i takt med at begroingen tiltar. Når begroingen har nådd et visst nivå, vil den etterlate seg spor i overflaten. Disse sporene vil fremstå som vertikale striper etter glideformen. Problemet reduseres ved at herdefronten holdes på et konstant nivå og ved at formen til enhver tid holdes tilnærmet full. Ved høye temperaturer kan også betongen nedkjøles ved å fukte overflaten.

Om tilstrekkelig alvorlig begroing har funnet sted, må glidepanelene renses eller byttes ut med tilsvarende rene panel.

### 3.5.2 Utglidning / valker

Valker og utglidning av betong i glideform kan inntreffe som følge av for åpning mellom glidepanel og den ferske betongen. den ferske betongen kan ved slike tilfeller gli ut og sette i forhold til underliggende sjikt med eldre betong. Om formens slipp blir for stor, herdefronten kommer for lavt eller at formen kommer ut av vater, kan også problemet oppstå.

### 3.5.3 Glidestøp i praksis

Når forholdene er gode og nødvendige forberedelser er gjort, anses glidestøping som en effektiv støpningsteknikk. Teknikken kan med fordel benyttes for å spare tid og oppnå gode resultater på gitte konstruksjoner. Størst mulig gevinst oppnås ved støpning av relativt enkle vertikale konstruksjoner. Siloer, plattformfundament, trappetårn, heissjakter og tanker er eksempler på konstruksjoner som typisk har blitt ansett som hensiktsmessig og utføre ved hjelp av teknikken.

Sammenlignet med mange andre produksjonsteknikker er glidestøp en mer krevende og komplisert prosess, og det er ofte spesialiserte aktører som tar oppdragene. Når forberedelsene er gjort, og støpningen tar til, er det ofte en døgkontinuerlig arbeidsoperasjon. Prosjekteringer og forberedelser bør være gjort så grundig at utilsiktet produksjonsstopp i størst mulig grad unngås. Dette hardkjøret og avhengigheten av kontinuitet i arbeidet, krever ikke bare at det er bemanning på plass til enhver tid, men også at de er godt samkjørte og vet hvilken rolle de har i prosessen. Det døgkontinuerlige arbeidet, stiller ikke bare høye krav til mannskapet på byggeplass, men også når det gjelder logistikk og levering av materialer. Materialene i seg selv, stilles det også høye krav til.



### 3.5.4 Utførelse

I korte drag kan utførelsesmåten oppsummeres slik. Kontinuerlig tilføring av betong er vanskelig. Dette skyldes praktiske utfordringer ved så lav utmating med pumper osv. Det støpes derfor ofte ut tynne betongsjikt. Nytt sjikt, når ny forsyning planmessig ankommer. Høyden på hvert lag er avhengig av avlevert mengde og størrelse på støpen. Etter at 4-5 sikt er utstøpt, og det nederste sjiktet er avbundet kan løftingen ta til. Forskalingen løftes nå mer eller mindre kontinuerlig oppover i små trinn. Løfthastigheten må tilpasses betonglevering, armeringsarbeid fra arbeidsplattform og betongens avbindingstid. Hvis leveranse av betong er uproblematisk, og nok kapasitet er satt inn til binding av armering og eventuell montering av innstøpningsgods over støpeformen, er hastigheten kun styrt av betongens avbindingstid. Løftes det for raskt, slik at betongen ikke har oppnådd tilstrekkelig fasthet, risikeres det at utvalkinger oppstår, eller i verste fall at betongen raser ut når den forlater glideforskalingen. Løftes det derimot for sakte i forhold til avbindingen, kan det forårsake begroing på glidepanelene med tilhørende skader på betongoverflaten. Når glidingen er kommet i ønsket gjenge, ønskes det med hensyn til høyest mulig hastighet, å holde formen til enhver tid full. Avbindingsfronten skal normalt ligge 20-30 cm over underkanten av glideformen. For å holde kontroll på hvor avbindingsfronten befinner seg, kan dette sjekkes ved å stikke en tynn jernpinne ned i betongen for å kunne lese av hvor motstand påtreffes. Om det oppdages uønsket samsvar mellom avbindingen og glidehastighet må tiltak iverksettes. Her er det betongtemperatur og stilsetningsstoffer som har størst innflytelse. Undervarme fra nedenforliggende betong har betydelig innvirkning, men ofte vanskelig å påvirke i særlig grad underveis. Retarderende eller akselererende tilsetningsstoff blir ofte den benyttede løsningen.

Når betongen herder, vil det oppstå bindinger mellom betong og glidepanelene. For å bryte bindingene før de rekker å klebe sterkt nok til å utgjøre fare for skader, må formen med jevne mellomrom løftes. Ved lav løfthastighet er det fordelaktig lav løfthøyde. Det sikrer flere avrivninger av bindingene.

Det må alltid strebes for å unngå skjevhet i form. Skjevhet i glideform vil fremprovosere tilløp av fastkiling som øker kraftbehovet med tilhørende økt påkjenning av utstyret og ikke minst sannsynligheten for overflateskader. Viktige tiltak her er å sikre så jevn avbindingsfront som mulig, blant annet ved at hele lag støpes ut samtidig, samt å sørge for at start- og stoppested ved hver utstøpning er på samme plass for hvert sjikt. Det må forsikres at det blir levert nok betong ved hver leveranse i forhold til valgt sjiktdybde, slik at man lykkes i ta seg en hel runde rundt konstruksjonen.

Feillasting av arbeidsplattformen er også en mulig årsak til skeivgang. Oppretting av glidefor krever spesielle prosedyrer, det må forsikres at årsaken til problemet er oppklart før man fortsetter utstøpingen.

I hengestillaset under selve glideformen foregår kontrollering og utbedringer av eventuelle skader. Utbedringstiltakene betyr ofte filsing av overflaten. Filsing vil si pussing av overflaten med tilførsel av ekstra mørtel der dette er nødvendig.

Om klatrestålet skal tas vare på til gjenbruk, må de dras opp etter endt gliding. Hullet som blir stående igjen må sikres for frostsprengning. Enten ved hjelp av tilstrekkelig drenering, eller at hullene må injiseres i ettetid.

### 3.5.5 Konstruksjonens geometriske utforming

I hovedsak er det høye, enkle utforminger hvor glidestøp har sin forse og peker seg spesielt positivt ut. Med enkel utforming menes konstruksjonsdeler med konstant tverrsnitt.

Selv om dette er tilfellet hvor metoden oppstår størst fordel sammenlignet med mer tradisjonelle forskalingstyper, har teknikken fleksibilitet nok til at en del geometriendringer kan finne sted. Blant annet finnes teknikker for å variere veggtykkelse og diameter på det som støpes. Dette muliggjør blant annet å støpe koniske konstruksjoner. Ved å installere spesiallagde kassetter, kan også tverrsnittet reguleres i avtrappende form. Utsparinger kan også monteres om åpninger ønskes i den aktuelle konstruksjonen.



Figur 16 eksempel på konisk utført glidestøp [1]

Hjørner er utfordrende i glidesammenheng. Dette skyldes at arealet for mulig klebing blir større i forhold til betongens egenvektvekt. Den får da lettere for å bli dratt med oppover med forskalingen. Jo spissere vinkler, jo større sannsynlighet for løfteriss. Avrundede hjørner er derfor foretrukket form ved utførelse av glidestøping. Smale søyler/ pilarer og tynne vegger kan få tilsvarende problem.

Når man først blir kjent med bruk av denne teknikken, er det nærliggende å tenke at naturlige føringer på hvordan geometrien blir er gitt. Vi har over sett at det ikke alltid er rett, og at mulighetene for endringer er mange. Det er likevel lurt å involvere spesialfirmaet som hyres inn for jobben i et tidlig stadium av planleggingen. Slike aktører har gjerne erfaring og kompetanse som bidrar med tanker og innspill på hvordan en glidestøpoperasjon best pares med øvrig konstruksjonsvirke på samme prosjekt. Som oftest kommer man bedre ut med denne tilnærmelsen, sammenlignet med å forsøke å implantere en glidestøp i et allerede godt fastsatt prosjekt. [9]

### 3.6 Glidehastighet

Som nevnt ovenfor er den tillatte glidehastigheten avhengig av flere parametere. Den må planlegges med hensyn til konstruksjonens kompleksitet, tilgang til opplært mannskap, begrensninger i forsyninger av nødvendig material og grad av nødvendig utbedring av eventuelle skader. Hvis ingen av overnevnte faktorer er utslagsgivende med tanke på hastigheten, er oppnåelig glidehastighet avhengig av avbindingstiden. Avbindingstiden er avhengig av betongtemperaturen, betongens sammensetning og sementens egenskaper. Forholdet mellom avbinding og glidehastighet er gitt ved følgende formel;

$$V_s = \frac{h_1 - h_2}{t_s - t_t}$$

Her betegnes  $h_1$  som gjennomsnittlig avstanden fra toppen av formen ned til avbindingsfront.  $h_2$  er avstand fra toppen av formen ned til gjennomsnittlig posisjon av fersk betong. tiden fra betongen ble blandet til støpning er gitt ved  $t_t$ .  $t_s$  er avbindingstidspunktet. Ved beregning av avbindingstidspunktet må faktorer som undervarme fra underliggende lag og eventuelle tilsetningsstoffer tas i betraktning og medregnes. Ved for høy hastighet kan som tidligere nevnt

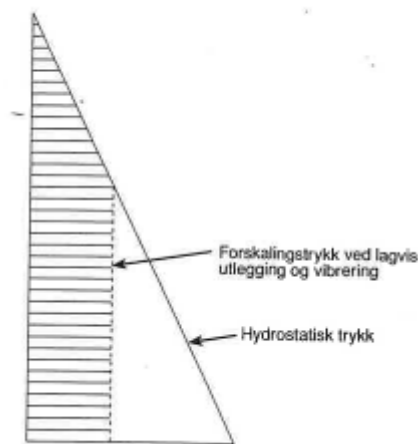
problematikk rundt utvalking eller utrasing forekomme. Lav hastighet øker derimot faren for begroing. Glidehastigheten kan variere fra rundt fire centimeter i timen opp til nærmer 90. Gjennomsnittlig hastighet for prosjekter av en viss størrelse ligger gjerne rundt 30 centimeter i timen.

Anbefalt minimumshastighet er rundt 2 meter pr døgn. Lavere glidehastighet, krever spesielle tiltak for å kompensere for den økte risikoen for løfteriss. [6]

### 3.7 Glideform sammenlignet med mer tradisjonelle forskalingsmetoder

Forskjellene på glideforskaling og mer tradisjonelle former for forskaling er mange og innlysende. På høye konstruksjoner hvor glidestøping er mest aktuelt, er det naturlig å sammenligne med klatreforskaling. Vanlig fast forskaling i mest tradisjonelle form, blir det merkelig å sammenligne med. Grunnen er det enormt hydrostatisk trykket ved høye utstøpninger ville ha krevd brutale dimensjoner på forskalingen for å ikke bli sprengt ut av trykket.

[1]



Figur 17 hydrostatisktrykk i fersk betong [4]

I teorien er det jo fullt mulig å bygge en forskaling i konstruksjonenes fulle høyde, for deretter å fylle den litt etter litt. På den måten hadde man unngått det ekstreme hydrostatiske trykket som ville ha oppstått i bunnen. I praksis gjøres ikke dette, andre forskalingsmetoder foretrekkes.

Der glideforskalingen glir sakte men sikkert oppover langs konstruksjonen etter hvert som betongen støpes ut, flyttes en klatreforskaling etappevis oppover. Forskalingen kan ha egen klatresystem, som gjør den selvhjulpne i forflytningsjobben, eller den er avhengig av eksterne kraner som løfter den opp når det er klart for neste trinn.

Denne metoden går kort fortalt på at formen, som er en god del høyere enn en glideforskaling, fylles så å si full. Slik blir den stående til betongen har oppnådd tilstrekkelig styrke. Når betongen er klar for neste etappe, frimonteres forskalingen og blir løftet et godt stykke oppover langs den nystøpte konstruksjonen. Her monteres den fast igjen, før den på ny blir fylt med fersk betong. Slik fortsetter prosessen til ønsket høyde er oppnådd. [1]

Som alle andre løsninger, har også denne metoden sine fordeler og ulemper. Sammenlignet med glideforskaling, er den største ulempen alle de horisontale støpeskjøtene som oppstår for hver støpeteppe og at det er en langsommere metode.

Fordeler denne teknikken har sammenlignet med glidestøp er:

- Overdekningsbetongen får ligge i ro under utstøpning

- Kan bestemme støpetidspunkt, større slingring om noe uforutsett opp står. (vær, betongleveranse osv.)
- Generelt mindre tidspress under utstøpning.

[10]

## 4 Laboratoriearbeid

For å undersøke hypotesene rundt hvilke effekter variasjon i v/c-tallet, løftefrekvens og løftehøyde har på glideformen, har det blitt gjennomført laboratoriearbeid. Totalt innebar dette arbeidet ti betongblandinger med tilhørende forsøk i glideriggen.

### 4.1 Betongblanding

Betong tiltenkt bruk i glidestøp er avhengig av å ha god støpelighet for å sikre en tilfredsstillende utstøping og komprimering. I et reelt prosjekt må det tas hensyn til konstruksjonens geometri og armeringsmengde. Normalt bør aldri betongens synkmål ved utstøping være under 150 mm.

Praktiske tilfeller har vist synkmål på 200 mm eller mer er å foretrekke, spesielt ved høy armeringsmengde. Med dette som bakgrunn, ble det derfor besluttet å gå for en selvkomprimerende betong (SKB). Definisjonen på selvkomprimerende betong er som kjent krav om synkmål på 250 mm eller mer, samt et utbredelsesmål på minimum 650 mm.

Betongen brukt i denne oppgaven ble proporsjonert for å tilfredsstille skb-kravene. I utgangspunktet er alle blandinger like med samme sementtype, tilslag, silikainnhold og matriksmengde. Det som skiller de fra hverandre er forskjellig vanninnhold. Slik ble det oppnådd blandinger med v/c-tall på henholdsvis 0,35, 0,40 og 0,45. Alle ble blandinger ble laget tre ganger, unntatt den med v/c-tall på 0,40. den ble blandet fire ganger, der en av blandinger skiller seg ut ved at det ble tilsatt dobbel mengde silikastøv (10%). I utgangspunktet ble alle blandinger tilsatt to vektprosent av sementinnholdet med superplastiserende stoff, utfra produsentens maksimumsanbefaling. I og med at egenskapene forandrer seg med betongens sammensetning angående vann og silikamengde, ble det nødvendig å øke denne mengden på flere av blandinger for å komme nær kravene som er satt for SKB. Videre tilsetning av superplastiserende middel over de fastsatte to prosentene, ble tilsatt etter visuell betraktning av ferdig utblandet betong. Betraktingen ble gjort ved øyemål og ved utbredelsesmål. På noen av blandinger ble mengden med superplastiserende nesten doblet.

Når blandingen oppnådd tilfredsstillende målinger på synk og utbredelse, ble blandingens luftinnhold målt og tre testterninger støpt. Blandingens ble så ført inn i laboratoriets gliderigg for måling og testing av mer glideforskalingsrelevans.

#### 4.1.1 Sement

Det ble brukt av sementen Norcem Anleggsement FA i alle blandingene. Det er en portland-flygeaskeement spesielt tiltenkt anleggskonstruksjoner. Sementen kan brukes i alle eksponering-, bestandighet- og fasthetsklasser. Sementen er godt tilpasset for bruk i konstruksjoner hvor det settes høye krav til sluttfasthet. Sementen har relativt lav varmeutvikling og er velegnet for bruk i massive konstruksjoner, den har også gode støpelighet- og bestandsegenskaper.

Tabell 1

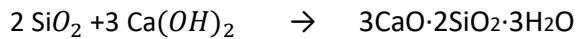
<b>Anleggsement FA (CEM II/A-V 42,5N)</b>	
<b>Fysiske egenskaper:</b>	
Spesifikk vekt [ $\text{kg}/\text{dm}^3$ ]	3,02
Begynnende størkning [min]	165
Finhet (Blaine) [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]	390
<b>Innhold:</b>	
Sulfat ( $\text{SO}_3$ ) [%]	$\leq 3,5$
Klorid ( $\text{Cl}^-$ ) [%]	$\leq 0,085$
Vannløselig krom (ppm Cr 6+) [%]	$\leq 2$
Alkalier ( $\text{Na}_2\text{O}_{ekv}$ ) <sup>2</sup> [%]	0,5
Klinker [%]	81
Flygeaske [%]	15
Kalkmel	4

[11]

#### 4.1.2 Pozzolaner

Materialer som har egenskaper til å under gitte forhold inngår i kjemiske forbindelser med reaksjonsprodukt etter vann/sement – reaksjonen, kalsiumhydroksid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , kalles Pozzolaner. I Norge brukes stort sett flygeaske eller silikastøv som pozzolan. Flygeaske er et biprodukt filtrert ut fra røykgassene til kullfyrte kraftverk. Silikastøv blir også filtrert ut fra røykgasser, men her er det snakk om gasser i forbindelse med produksjon av silisium- og ferrosilisium. Det som i hovedsak skiller disse to fra hverandre er innholdet av  $\text{SiO}_2$  og finheten. Vanligvis har silikastøv høyest innhold og har høyere finhet.

Selv om det er detaljer som skiller de er prinsippet for reaksjonen de forårsaker like:



reaksjonen fører altså til mer C-S-H – gelé, det vil si mer bindemiddel og derav bedre egenskaper med tanke på styrke og bestandighet.

Jeg har benyttet Elkem Microsilica i alle betongblandingene, selv om Anleggsement FA i utgangspunktet inneholder flygeaske. Dette er et meget reaktivt pozzolan, og bidrar til å gi betongen en tett mikrostruktur og lavere permeabilitet.

Pozzolanreaksjonen genererer en del ekstra varme i tillegg til vann/sement – reaksjonen. Da denne reaksjonen likevel er avhengig av reaksjonsstoffer fra vann/sement – reaksjonen kommer ikke denne varmen vanligvis i tillegg når sement/ vann – reaksjonen pågår for fullt, denne reaksjonen finner sted i ettertid. Slik sett skånes betongen for en større varmpåkjønning, med alle belastninger det bringer med seg, men heller gjør at varmeutviklingsperioden blir noe lengre. Ved normal tillatt dosering (opp til 10 %) påvirker i liten grad avbindingstidspunktet for betongen.

[4]

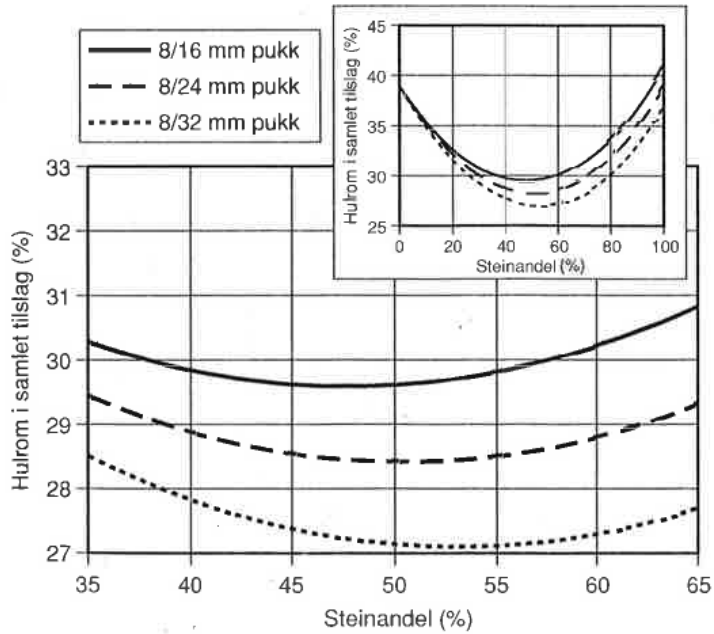
#### 4.1.3 Tilslag

Hovedingrediensen faller innenfor det vi kaller for tilslag. Tilslag er en betegnelse på sand – og steinmaterialer brukt i betongen. Ofte utgjør tilslaget så mye som 65-75% av det totale volumet til betongen. Valg av tilslag utgjør derfor naturligvis en betydelig forskjell angående prisen på betong, et argument som vanligvis veier tungt. Det ses bort i fra i denne oppgaven, da tilslaget også har innvirkning på betongens egenskaper i en glideform. Her ble det lagt vekt på at de benyttede tilslagene var velgraderte og uten store sprang. (Nr.25)

I blandingene brukt i denne oppgaven er alt av tilslag levert av Årdal. Det ble benyttet tilslag i to forskjellige størrelsesordener. Den første besto av et diameterspenn på 0-8 millimeter, den andre 8-16 millimeter.

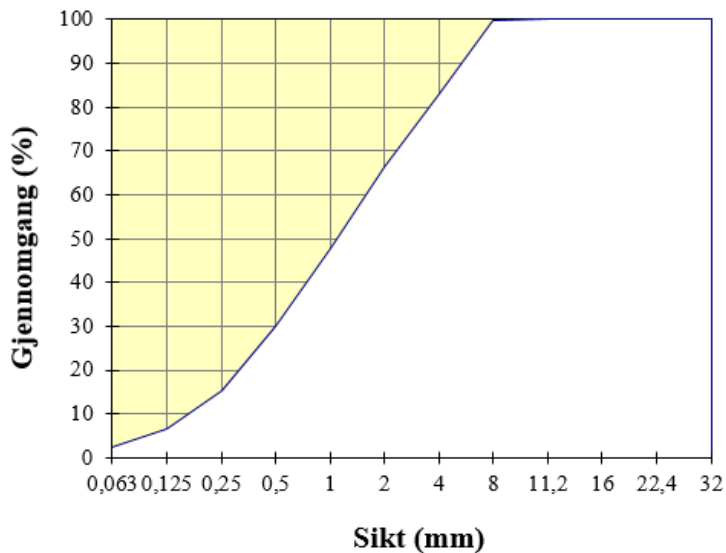


Hulromsmålinger som er gjort, viser at minimalt med hulrom i det sammensatte tilslaget oppnås med en steinandel på 47 % når største steinstørrelse er 16 mm. Disse opplysningene føres også inn i excelarket. [4]



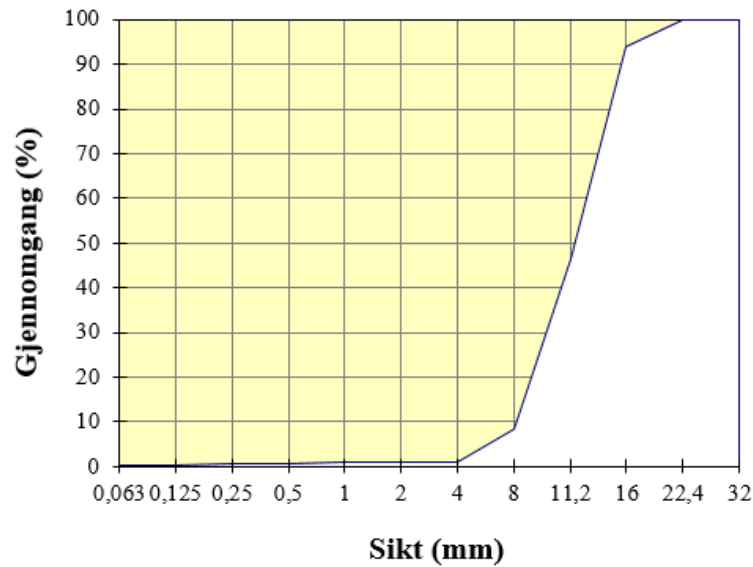
Figur 18

### Årdal 0/8



Figur 19 siktekurve 0/8

## Årdal 8/16



Figur 20 siktekurve 8/16

### 4.1.4 Tilsetningsstoffer

Tilsetningsstoff er definert som materialer tilsatt betongen under blandingsprosessen, i en mengde som ikke overstiger 5 % av vekten av sementen. Tilsetningsstoffers oppgave er å endre egenskapene til betongen i fersk og/eller herdet betong. Her ble kun overnevnte Dynamon SX-N [12] benyttet, doseringen ble begrenset av produktets egen maksimalgrense. NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017

### 4.2 Blandeprosess

Alle materialer og tilsetningsstoffer ble veid opp i henhold til den spesifikke resepten den aktuelle forsøksdagen. For å få mye igjen av dagen til å kjøre glidetest, ble denne oppmålingen helst gjort dagen før. Tilslagets fuktinnhold, ble også målt før oppmålt mengde ble plassert i lukkede beholdere for å sikre mot uttørking og dermed forandring i løpet av natten.

Fuktinnholdet på sanden ble gjort på følgende måte;

Først ble sanden rotet rundt i sekken etter beste evne for best mulig jevnt fordelt fukt i prøven (og senere det som blir brukt til blandingen, og derfor gir best bilde). 300 gram av denne sanden ble veid opp og plassert i skål med kjent vekt. Skålen ble så varmet opp slik at absorbert vann i sanden fordampes. Etter at sanden hadde tørket opp, fikk den stå til avkjøling. Den ble så veid opp på ny. Differansen, altså massensom har forsvunnet i løpet av tørkeprosessen deles så på vekten av tørr sand.

$$\frac{m_v - m_t}{m_t} * 100 = \text{fuktprosent}$$

Til selve blandingen ble laboratorieblenderen benyttet. Alle blandingene unntatt én, besto av 80 liter. Blandingene som skilte seg ut her, besto av 100 liter.

Prosedyre for blanding:

- Etter at alt det tørre (tilslag, sement og silikastøv) var ført i formen, ble disse tørrblandet i tre minutter.
- Vann og 2 % dynamon SX-N ble tilsatt, deretter ble blanderen kjørt i to minutter.
- Tester av synkmål og utbredelse ble utført, før eventuell mer Dynamon SX-N ble tilsatt.
- Blandingene med endelig mengde Dynamon SX-N, blandes i ytterligere ett minutt før blandingen blir ført til gliderigg.

#### 4.2.1 Testing av fersk betong

Når betongblandingene var i fersk fase, ble det gjennomført to prøver av blandingene. Formålet med prøvene var i hovedsak for å kunne gjøre seg opp en formening om hvor betongen som akkurat var blandet

Testene som ble utført i fersk fase var

- Synkmål og synkutbredelsesmål
- Luftinnhold

Ut fra disse to testene fikk vi fire svar; synkmål, synkmålutbredelse, luftinnhold og betongens densitet.

Synkmål og synkmålutbredelse fås direkte ved hjelp av måling. Densiteten av betongen må beregnes. Dette gjøres når betongen fylles i luftinnholdmåleren. Den har kjent vekt, og rommer akkurat 8 liter

når den er fylt til randen. Beholder med betong blir derfor veid, egenvekt av beholder trekkes fra før det blir delt på 8.

Begge testene og de fire resultatene de ga, ble gjennomført og tolket i henhold til NS-EN 12350.

#### 4.2.2 Prøving av herdet betong

I tillegg ble det samtidig støpt ut tre testterninger med målene 100mm x 100 x 100mm for testing av trykkfastheten. Terningene lå det første døgnet i smurt form. For å forhindre uttørking, ble prøvene tildekt av plast. Etter et døgn ble prøvene avformet, og lagt i vannbad for videre herding. Etter 28 dager ble trykkfastheten målt i henhold til NS-EN 12390.

#### 4.2.3 Testing av poretrykkmåler

Etter å ha gjennomført forsøk og studert resultater, oppsto det noe undring rundt poretrykkmåleren. Flere av resultatene ga merkelige målinger. Med dette som grunnlag, ble det derfor bestemt å utføre en enkel forsøkstest av poretrykkmålingsutstyret.

Testingen ble gjennomført ved at den ble gjort klar i henhold opplæring. Det innebærer at den blir montert under vann for å unngå luftbobler i systemet. Deretter ble den ført ned i et kar med vann. Her ble den plassert på avmålte avsatter. På disse kjente vanddybdene, ble resultatene registrert.

Forsøket kvalifisere neppe til noen standard i utførelse, med det ga oss som benytter oss av måleren i alle fall noen svar.

#### 4.2.4 Proporsjonering

Proporsjoneringen av betongen ble utført ved hjelp av et excelark utarbeidet av Skanska. Sementtype, ønsket v/c-tall, matriksvolum, siktekurve på aktuelt tilslag ble også lagt inn

Tabell 2

Materialer	Resept 0.35 [kg/m <sup>3</sup> ]	Resept 0.40 [kg/m <sup>3</sup> ]	Resept 0.45 [kg/m <sup>3</sup> ]	Resept 0.40 10% [kg/m <sup>3</sup> ]
Norcem Anlegg FA	443,9	413,4	386,8	391,4
Elkem Microsilika	22,2	20,7	19,3	39,1
Fritt Vann	172	182,5	191,6	181,1
Årdal 0/8	941,5	941,5	941,5	941,5
Årdal 8/16	834,9	834,9	834,9	834,9
Dynamon SX-N	11,1	12,4	10,5	13,7

Selv om produsenten bak Dynamon SX-N, Mapei ikke anbefaler å gå for høyere dosering enn 2% på grunn av fare for separasjon/ blødning ble strikken noe tøyd på dette området for å oppnå/ tilnærme oss kravene som gjelder for selvkomprimerende betong. Alle blandinger ble i første omgang forsøkt med Mapeis egen maksimale dosering. Blandinger som etter disse to prosentene ikke oppfylte kravene for sump eller utbredelse ble supplert med mer. Dette ble varsomt utført med flere stopp i blanderen underveis for å fortløpende kunne følge med på tendenser til separasjon. På enkelte av blandinger ga vi oss med tilsetningen før vi nådde kravene på grunn av frykt for separasjon. [12]

Total mengde Dynamon SX-N vi til slutt landet på var:

Tabell 3

Forsøk	v/c-tall	Dynamon SX-N [kg/m <sup>3</sup> ]		% i forhold til sementmengde
1	0,35	885	11,06	2,5
2		842	10,53	2,4
3		836	10,45	2,4
4	0,40	727	9,09	2,2
5		993,3	10,05	2,4
6		798	9,97	2,4
7	0,45	645	8,06kg	2,0
8		630	7,88	2,0
9		640	8,0 kg	2,1
10	0,40 10%	1092	13,65	3,5

### 4.3 Gliderigg

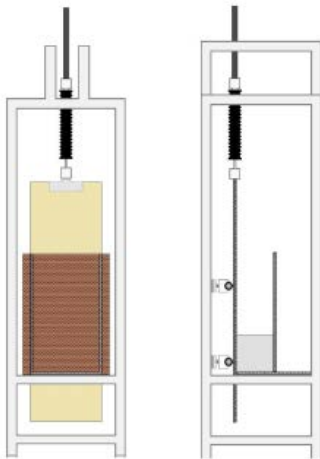
Glideriggen som er tilgjengelig for gjennomføring av forsøkene er konstruert og bygd ved universitetet i Stavanger. Glideriggen er oppbygd med utgangspunkt i tanker og kunnskap hentet fra Kjell Tore Fossås spesialkompetanse innen feltet.

Formålet med riggen er simulere laster som oppstår for hvert utstøpte betongsjikt ved en reel glidestøp.

Simulering blir aldri helt autentisk faktiske situasjoner, det samme er tilfelle med denne riggen.

I motsetning til de fleste glideforskalingene som benyttes, har testriggen kun glidepanel på én av sidene. Alle kommersielle glideformer er også bygd med slipp, noe testriggen ikke er konstruert med. Her er glidepanelet i lodd.

Parameterne som styrer friksjon, temperatur og trykk er derimot de samme som i en virkelig støp. Riggen burde derfor være velegnet for å kunne isolere og endre noen av disse påvirkningene hver for seg, for så å studere effekten de har etter hvert som går.



Figur 21 Gliderigg [13]

#### 4.3.1 Oppbygning av glideriggen

Glideriggen er kraftig dimensjonert av kvadratiske RHS med målene 100mm x 100mm. Denne stålrammen er formen med tilhørende glidepanel montert. Formen er oppbygd av forskalingsplater. Formen måler en bredde på 0,6 m og dybde på 0,3 m. I teorien er det mulig å fylle opp med en høyde på nærmer en meter. Noe som utgjør et volum på rundt 180 liter. I praksis blir ikke dette gjort, da

glidestøping i praksis skjer sjiktvis. Formen blir derfor fylt med et sjikt med en høyde på mellom 0,3 og 0,4 meter.

#### 4.3.2 Glidepanelet

Glidepanelet består av en 22 mm tykk forskalingsplate med 0,9 mm tykk stålhud. Glidepanelet settes i bevegelse ved at det er koblet til en motor som overvinner friksjonskraften som oppstår mellom betongen og panelet.

Kraften motoren må yte for å overvinne friksjonskraften registreres av en lastsensor montert mellom motor og glidepanel. Lastsensoren er av typen HBM U2B, og registrerer kraften motoren må yte for å løfte panelet under hele testperioden. Sensoren er kapabel til å registrere last opp til 20 kN, samtidig som den har en nøyaktighet på 0,1 kN. Data registrert i denne sensoren kan utnyttes til å beregne friksjonskoeffisienten. Ved løftmotoren er det også montert en sensor til, denne måler glidepanelets posisjon [14].

#### 4.3.3 Løftkraft og posisjon

Kraften motoren må yte for å overvinne friksjonskraften registreres av en lastsensor montert mellom motor og glidepanel. Lastsensoren er av typen HBM U2B, og registrerer kraften motoren må påføre panelet for at forflytting skal finne sted under hele testperioden. Sensoren er kapabel til å registrere last opp til 20 kN med en nøyaktighet på 0,1 kN. Data registrert i denne sensoren kan utnyttes til å beregne friksjonskoeffisienten. Før hvert forsøk ble vekten glidepanelet kalibrert bort. Det blir gjort før formen blir fylt. Ved å nullstille sensoren når den kun er belastet av glidepanelet som henger, blir all kraft som registreres underforsøket generert som følge av friksjon, ingenting kommer av tyngdekraftens påvirkning av panelet.

Ved løftmotoren er det også montert en sensor til, denne måler glidepanelets posisjon.

#### 4.3.4 Temperaturmåler

Betongens temperaturutvikling ble overvåket ved hjelp måleinstrumentet Type T Thermocouple. (kobber/konstant) Denne måleren er oppgitt med et målespektra mellom -200 C og 350 C. I hvert

forsøk ble det benyttet to av disse målerne. Begge ble dyttet omtrent 10 cm inn i betongen og plassert midt på prøven med omtrent 20 cm mellomrom. Det finnes ingen logisk forklaring på hvorfor disse skal gi forskjellig utslag. På samtlige forsøk observerer vi at de to temperaturgrafene spriker noe i forhold til hverandre, men de har alltid samme kurve og utvikling. Det er derfor grunn til å tro at dette spriket skyldes litt forskjellig kalibrering, noe som gir litt forskjellige grafer i og med at de da muligens har litt avvikende referanser. Oppgitt temperaturresultater er et gjennomsnitt av disse to.

[15]

#### 4.3.5 Normaltrykk

Bak glidepanelet er det plassert fire lastsensorer av typen HBM C2. her registreres trykket betongen virker på glidepanelet med. De fire sensorene er plassert i to høyder for å gi et bilde av fordelingen av oppstående krefter, med to sensorer på hvert nivå. Det er 40 cm avstand mellom sensorene i bredden og 58 cm som skiller de i høyden. For at det skal oppstå minimalt med friksjon mellom de fire sensorene og glidepanelet som kan forstyrre målingene av løftekraften, er de utrustet med hjul som triller langs glidepanelet når det dras oppover.

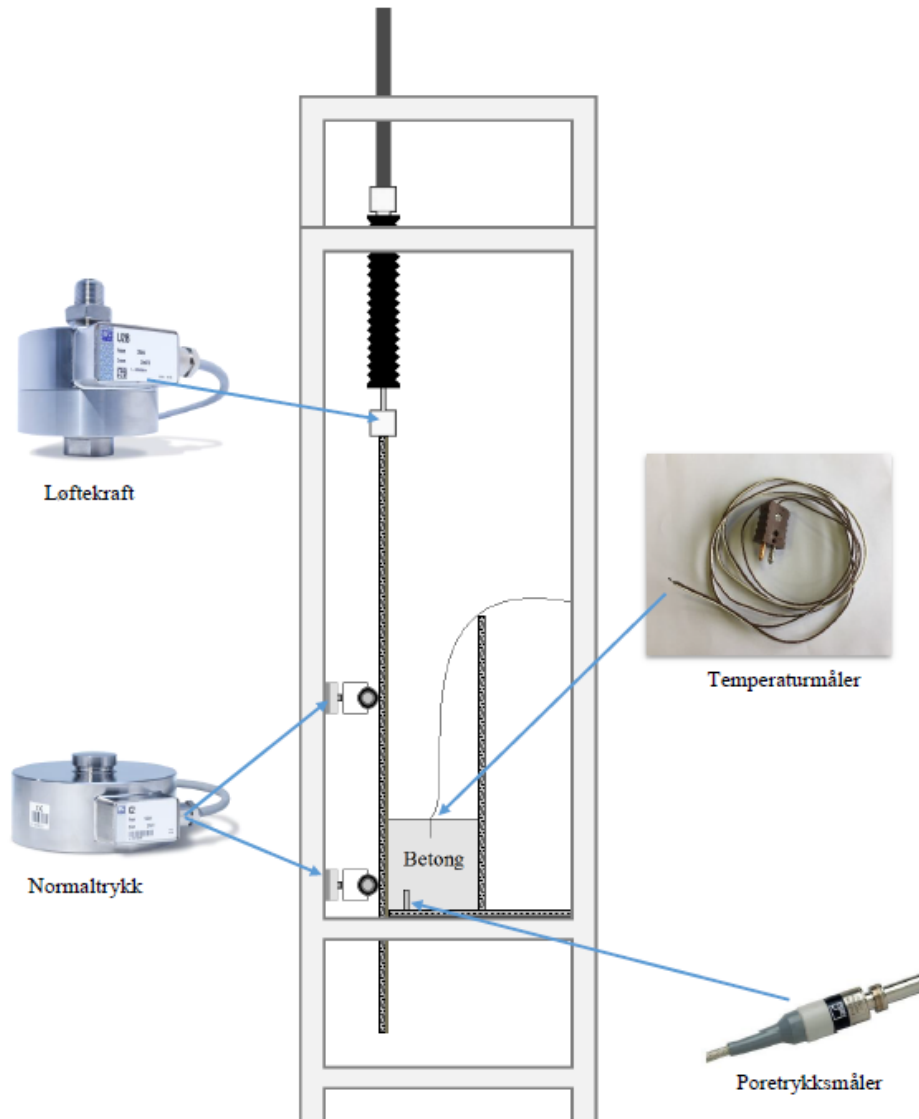
Lastsensorene har evnen til å registrere både positivt og negativt trykk. Altså drakrefter og trykkrefter. Hver sensor kan registrere en kraft opp til 5kN med en nøyaktighet på 0,1 kN.

#### 4.3.6 Poretrykk

Poretrykket i prøven ble også kontinuerlig overvåket i testperioden. Denne målingen ble gjort ved hjelp av en poretrykksmåler av typen HBM P8AP som registrerer poretrykk opp til 10 bar. [16]

Måleren består av et 10 cm avmålt stålrør med innvendig diameter på 3 mm. systemet er avhengig av å være fritt for luft for å registrere korrekte avlesninger. Den monteres derfor under vann, før den blir ført inn i prøven. Måleren blir ført inn i prøven i 20 cm høyde over formens gulv, og 9 cm fra glidepanelet. Avstanden til glidepanelet skal være tilstrekkelig for at målingene ikke skal forstyrres av eventuell poretrykkforandring som følge av at glidepanelet settes i bevegelse.





Figur 22 Sensorenes plassering [13]

Glideriggens reproduserbarhet ble dessverre ikke testet, dette burde ha vært gjort ved å kjøre samme forsøk flere ganger. Frambragte resultater skulle så ha blitt sammenlignet. I teorien skulle da disse resultatene blitt like om.

Selve glideriggen og avlesningsutstyret kjøres separat i forhold til hverandre. Fast prosedyre ble da til at avlesningen av de målbare parametrene ble startet umiddelbart etter at betongblandingen ble fylt i formen, omtrent en halv time etter at vannet hadde blitt tilsatt i blanderen. Glideriggen ble derimot, av praktiske årsaker ikke startet før etter ytterligere 45 minutter. Dette for å la betongen få

sette seg litt før glidningen tar til. Tanken bak dette er at betongen trenger seg lettere inn på uønskede plasser f.eks. mellom form og glidepanel, om den er helt fersk når løftingen starter.

#### 4.3.7 Datainnsamling

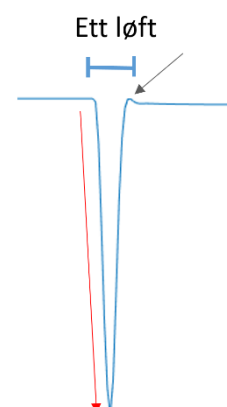
Testriggen er utstyrt med utstyr for å registrere data kontinuerlig under glideprosessen. All registrerte data blir avlest ved hjelp av catman DAQ software som viser en visuell representasjon kontinuerlig igjennom testprosessen i form av grafer og tabeller. Den innsamlede dataen kan senere lagres som matlabfil, og bearbeides etter ønske og intensjon der. Parameterne som blir registrert i riggen er:

- Normaltrykk generert av betongen
- Tid
- Poretrykk
- Betongens temperatur
- Glidepanelets posisjon
- Løftkraft

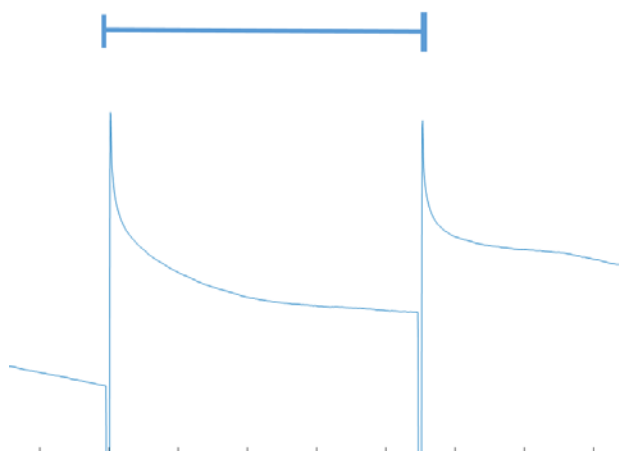
#### 4.3.8 Figurforklaring

Etter å ført dataen registrert i Catman inn i Matlab, får vi rådataen presentert som grafer. Det tar tid å sette seg inn i de forskjellige grafene. For enkelhetsskyld er noen tatt med for oppklaring. Ved første møte ser grafene ut som vertikale rette strek. Går vi nærmer, ser vi at hvert strek er en kløft som representere et løft.

Den røde pilen på figuren er området elmotoren begynner å dra i glidepanelet. Glidepanelet «slipper» taket i betongen i bunnen av hver kløft. Rød pil viser derfor hvor den statiske friksjonen fungerer. Bunnen er maksimale statiske friksjonsverdi. Egentlig skulle vi ha sett at grafen hadde flatet noe ut etter at panelet er satt i bevegelse og nådd glidefriksjonen som er noe lavere. Dataregistrering hvert sekund er for sjeldent til at dette blir med på grafene.

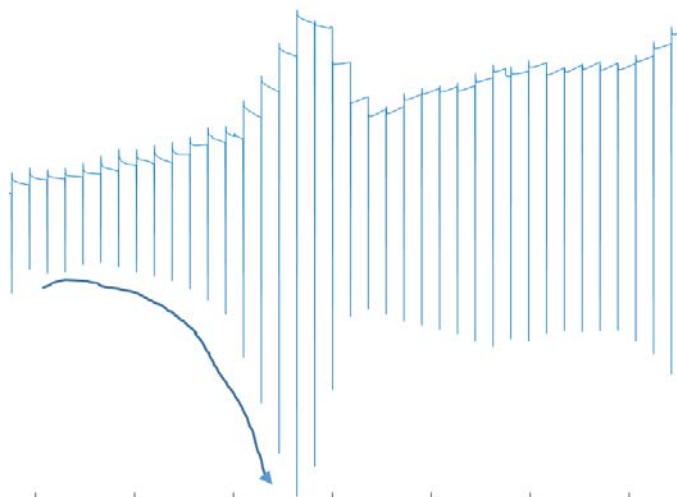


## Tid mellom hvert løft



Figur 24 løfteintervall

Der hvor hvert løft er en kløft, er opprommet mellom disse tiden som går fra et løft til neste.



Figur 25 Statisk friksjon vist ved strekk

Pilen på bildet over viser utviklingen for maksimal løftekraft. Tilsvarende kurve på oversiden viser kraften elmotoren må yte for å dytte glidepanelet ned to millimeter etter at løftet er over.

Figuren over gir oss kraften motoren bruker på å sette glidepanelet i bevegelse. Vekten av panelet er nullet ut før hvert forsøk tar til. Det betyr at denne kraften representerer friksjonen mellom betong og glidepanel. Det denne grafen derimot ikke sier noe om, er hvor stort klossen er, og dermed hvor

stort arealet som genererer friksjonen er. For å ta hensyn til dette, er kraften som drar i glidepanelet delt på arealet for hvert forsøk. Den nye grafen får samme form og utvikling, men litt andre verdier. Denne kraften er kalt løftekraft pr.  $m^2$ .

#### 4.3.9 Testprogram

Oppgavens mål er å studere ulike effekter som oppnås på friksjonen mellom glidepanelet og betongen ved å endre henholdsvis løftehøyde, løftefrekvens og betongens v/c-tall. Det søkes alltid mot så lav friksjon som mulig. Lav friksjon gjør at hele prosessen går lettere. Påkjeningen på alt benyttet utstyr blir mindre og sannsynligheten for at overflateskader skal oppstå reduseres.

Det ble det foretatt forsøk av betong som i utgangspunktet var lik, men med forskjellig v/c-tall; 0,35, 0,40 og 0,45. I tillegg ble en betong med v/c-tall på 0,40 men dobbelt så mye silikastøv utført.

Hver respektive betongblanding ble testet tre ganger. Unntaket var den med 10% silika, den ble bare testet en gang.

De tre forskjellige testene besto av forskjellig løftefrekvens og/eller løftehøyde. Først ble hver betongblanding testet med et løft på 12mm etterfulgt av at panelet ble ført ned to mm umiddelbart etter at hvert løft nådde sitt toppunkt. Det ble altså en netto løftehøyde på ti millimeter for hvert løft. Her frekventerte løftene med 7.5 minutters mellomrom.

Neste test besto av samme løftehøyde som ved første gjennomkjøring, men her ble løftefrekvensen forandret til hvert 15. minutt.

Siste testforløp hver av betongblandingen ble testet i var et nettoløft på 20 millimeter, 22 millimeter opp etterfulgt av to ned. Her ble det også kjørt med en løftefrekvens på 15 minutter.

Betongblandingen med v/c-tall på 0,40 og silikainnhold på 10% ble kun kjørt i testen hvor nettoløftet for hver gang var ti millimeter og løftefrekvensen var 15 minutt.

Glidepanelet ble alltid kjørt ned igjen etter hvert løft for å simulere virkeligheten i størst mulig grad. I den virkelige verden vil egenvekten av en stor glideform være såpass høy at tyngdekraften trekker den litt ned igjen før bremsesystemet eller kilene som skal avlaste hydraulikksystemet mellom hvert løft rekker å gripe inn. Dette resulterer i at formen synker en millimeter eller to før den står helt stille i påvente av neste løft. Glidepanelet på testtriggeren er ikke tungt nok til at tyngdekraften ville ha oversteget friksjonskraften og dratt det ned. Derfor er det den elektriske motoren som her sørger for å dra panelet opp, innstilt slik at like etter at løftet er gjennomført, dytter det ned igjen med en kraft rettet motsatt vei. På denne måten oppnår vi et tilfelle litt nærmere virkeligheten.

Skjematisk oversikt:

Tabell 4

Betong (v/c-tall)	Forsøk	Løftfrekvens (minutt)	Løftehøyde (Netto) millimeter
0,35	1	7,5	12-2=10
	2	15	12-2=10
	3	15	22-2=20
0,40	4	7,5	12-2=10
	5	15	12-2=10
	6	15	22-2=20
0,45	7	7,5	12-2=10
	8	15	12-2=10
	9	15	22-2=20
0,40 (10% silika)	10	15	12-2=10

Vi merker oss at første og siste forsøk med en løftfrekvens og netto løftehøyde på henholdsvis 7,5 og 15 minutter og løftehøyde på 10 og 20 millimeter får tilsvarende løfterate. Med det menes hvor mye panelet blir løftet per time. Vi ser at disse oppnår 80 mm/t. Forsøket gjennomført mellom disse to, med løftfrekvens på 15 minutter og netto løftehøyde på 10 millimeter ligger på halvparten, 40 mm/t.

Når at betongblandingen var fylt i formen, ble trykket mot glidepanelet forsøkt holdt konstant gjennom testen. Dette gjøres ved å manuelt justere belastningen på de fire sensorene ved panelets bakside. Tanken bak dette kan enklest belyses ved å se til de aktuelle formlene angående friksjon og effektivt trykk nok en gang.

Friksjon har vi følgende formel

$$F = \mu * N$$

Hvor:

- F: friksjonskraften
- N: Normalkraften
- $\mu$ : friksjonskoeffisienten

Effektivt trykk uttrykkes på følgende måte

$$\sigma' = \sigma - u$$

Hvor:

- $\sigma'$ : effektivt trykk [Pa]
- $\sigma$ : normaltrykk [Pa]
- $u$ : Poretrykk [Pa]

Som vi ser er det effektive trykket differansen mellom normaltrykket og poretrykket. Hvis normaltrykket blir manipulert ved justering av sensorene, til å holde seg konstant, vil det effektive trykket bli styrt av poretrykket.

Omformet fra formelen for generell friksjon, kan vi da erstatte normalkraften med det som vil virke på glidepanelet. Ut fra formelen for effektivt trykk ser vi at vi kan sette;

$$F = \mu\sigma'$$

Som kan uttrykkes:

$$F = \mu(\sigma - u)$$

Da vi samtidig går ut i fra at friksjonskoeffisienten, holder seg konstant, kan den utelukkes som en påvirkende faktor. Da står vi igjen med at friksjonen avhenger av poretrykket. Som vi så ut fra betongteoridelen, forandrer betongens poretrykk seg i løpet av herdeprosessen.

#### 4.4 Betong benyttet i glidestøp

Det stilles ingen særskilte krav til betong brukt ved glidestøp. Grunnleggende krav til betongsammensetningen er den samme som for hvilken som helst annen utstøpingsmetode. Betongen må tilfredsstillere krav som fremgår i standardene NS-EN 206:2013+NA:2014. Det omfatter blant annet krav til trykkfasthetsklasse, bestandighetsklasse, levetid osv. Disse forutsetningene blir imøtekommet ved hjelp av tradisjonelle og etablerte metoder og tilsetningsstoffer.

Like fullt har egenskapene til betongen stor innvirkning på hvor vellykket en glidestøpprosess blir. Det er derfor viktig at prosjekterende i prosjektet tar stilling og vurderer situasjonen og forholdene som gjelder den for den spesifikke utstøpingen. Her må hensyn til glidehastighet, vær, betongens pumpbarhet, finstoffinnhold, støpelighet osv. vektlegges.

Som det ble påpekt i avsnittet om glideforsalingsformen og utførelsesmetode, er god støpelighet viktig for å oppnå gode resultater i glideforsalning med armering, utsparinger og andre utfordringer. Har derfor valgt å kun bruke selvkomprimerende betong (SKB) i denne oppgaven.

Selvkomprimerende betong skiller seg fra ordinær konstruksjonsbetong (OKB) ved at den skall fylle forskalingen og omslutte armeringen med liten eller minimalt med komprimeringsarbeid. I praksis betyr dette krav om synkmål større enn 250 mm og synkutbredelsesmål på minst 650 mm. Betongen må derfor ha stort matriksvolum. Selvkomprimerende betong beskrives som en matriksdominert betong, det vil si betongen har en stor og relativt viskøs matriksfase, og effekten av kontakten mellom partiklene (partikkelinterferens) er liten. [9]





## 5 Resultater og drøfting

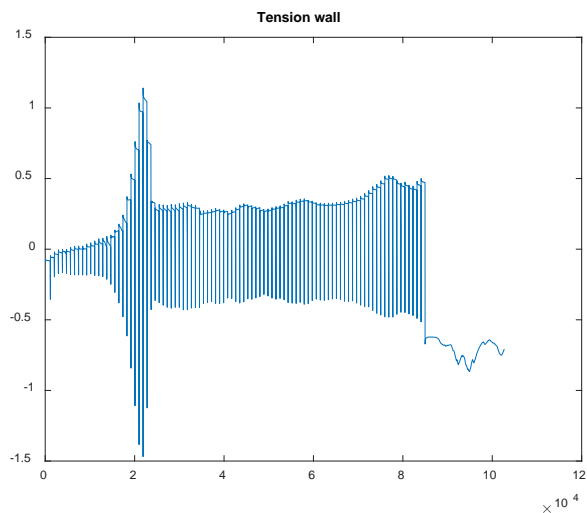
Fra glideriggen, via programvaren catman får vi alle observasjonen som er målt i løpet av forsøket. Dette presenteres i form av dataregistreringer hvert sekund. Disse tallene bearbeides i MatLab. Enkleste måte å sikre seg overblikk om hva som foregår, oppnås om vi presenterer resultatene i grafer. Som rådata kan vi da få ut 11 grafer totalt.

Vi har:

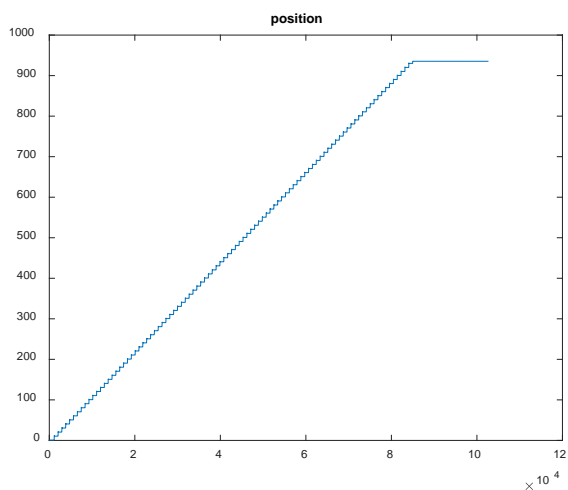
- Tension wall. Som er kraften motoren må virke på glidepanelet med til enhver tid.
- Poretrykket
- To temperaturmålinger
- Posisjonen til glidepanelet
- Kraften sensorene bak glidepanelet registrer. Det er totalt snakk om fire individuelle registreringer. I tillegg er det også lagt opp slik at de to øvre slås sammen til en graf som viser det øre trykket på glidepanelet. Det samme er gjort med de to nederste sensorene.

Totalt kan seks grafer hentes ut her, alle i forhold til tiden.

Under har jeg lagt ved to grafer som viser eksempler på hvordan resultatene blir presentert direkte fra CatMan.



Figur 26 Graf for kraften som på virker Glidepanel



Figur 27 Graf for glidepanelets posisjon

Mer interessant, blir det derimot hvis vi kombinerer flere av de innsamlede dataene i samme diagram. Dette gjør det enklere å sammenligne forskjellige variabler og hvilken innvirkning de måtte ha på hverandre.

Særlig interesse er tatt der hvor kraften som trengs for å sette glidepanelet, kalt løftekraft[kN] pr  $m^2$  er presentert i samme figur som trykket på glidepanelet og temperaturutviklingen . Alle med felles tidsforløp.

En annen interessant kombinasjon er poretrykkets utvikling i forhold til temperaturutviklingen. Også disse blir også sett i et felles tidsforløp.

I følgende tabeller blir forskjellige resultater fra de forskjellige testene og forsøkene gjennomført på laboratoriet presentert. Korte forklaringer vedrørende noen av resultatene blir gitt.

## Måledata

Tabell 5 måldata

	v/c-tall	Superplastiserende [%]	Synkutbredelse [cm]	Synkmål [cm]	luftprosent	Densitet [kg/dm <sup>3</sup> ]	Trykkfasthet [Mpa]
1	0,35	885	71 x 70	27	1,25	2,444	109,65
2		842	65 x 65	26	1,3	2,443	108,50
3		836	67 x 71	26	1,3	2,443	112,6
4	0,40	727	66 x 68	26	1,1	2,422	99,0
5		993,3	52 x 52	23	1,7	2,454	
6		798	64 x 65	25	2,0	2,425	99,9
7	0,45	645	65 x 65	25	1,4	2,418	89,7
8		630	63 x 63	25	1,3	2,412	82,6
9		640	52 x 52	24	2,0	2,401	70,46*
10	0,40	1092	63 x 62	24	1,5	2,431	112,61

I tabellen over er alle betongresultatene jeg har fått av de gjennomførte testene skjematisk oppført.

Alle resultatene av trykkfasthet representerer et gjennomsnitt av de tre testterninger til den respektive blandingen. Grunnet av misforståelse på laboratoriet ble det gjennomført rydding av hylleseksjonen der hvor noen av mine terninger lå til herding i vannbad. Dette resulterte i at terningen fra forsøk 5 gikk tapt. Trykkfastheten av tilsvarende betong i forsøk 4 og 6 ligger veldig jevnt i verdi, det antas derfor at blanding 5 ikke skiller seg vesentlig fra disse.

Ellers ser vi at forsøk 9 er merket med en stjerne. Grunnen til dette er at de tre testresultatene fra trykkfastheten ga sprikende resultater. Dermed gir gjennomsnittet som her er notert, et noe forvrengt bilde. To av testterningene hadde tydelige porer, antagelig som følge av dårlig støpelighet. Den siste så grei ut, den plasserte seg resultatmessig også nærme klossene med tilsvarende betong fra forsøk 7 og 8.

Trykkfasthetstesten og betongens styrke ferdigherdet, har ingen direkte interesse knyttet til forsøket, hvor fokuset ligger på glidingen. Det er like vel greit å se at betongen faktisk leverer gode resultater hva gjelder styrke, slik at man kan føle seg mer komfortabel ved bruk i konstruksjoner som blir utsatt for stor påkjenning. Siloer, plattformfundament og høye konstruksjoner generelt stilles det krav om god styrke, det er også i slike konstruksjoner glideformforskaling primært blir benyttet.

## Nøkkeldata

Tabell 6 nøkkeldata

	v/c - tall	Poretrykk , u [kPa] ved max løftekraft	Normaltrykk , N [kPa]	Løftekraft[ kN] pr m <sup>2</sup> (strekk)	Tid [timer]	Løftrkraft[kN] pr m <sup>2</sup> (trykk)	Tid [timer]	Avbinding [timer]
1	0,35	-6,01	3,08	-5,236	5,064	3,865	5,191	7,7
2		1,33	3,5	-3,73	4,284	2,228	4,286	8,2
3		4,51	3,4	-3,755	5,058	2,119	5,06	8,0
4	0,40	1,06	3,2	-5,343	5,542	4,847	5,544	8,0
5			4,05	-15,63	4,841	6,068	4,343	6,9
6		6,02	3,3	-3,251	4,93	2,59	5,12	8,3
7	0,45	5,83	3,81	-4,384	6,282	3,86	6,284	8,5
8		0,86	3,76	-5,993	6,65	5,463	6,651	7,8
9		1,36	3,5	-4,28	5,24	3,09	5,242	8,0
10	0,40	2,54	3,75	-7,2	6,08	5,6	6,081	8,4

Avbindingstidspunktet er beregnet ut fra temperaturforløpet. Ser på hvor temperaturen har steget to grader i forhold til utgangstemperaturen. I tillegg til tiden som angis ved målingene, er tiden som gikk fra vannet ble tilsatt i blanderen, til betongen var flyttet til glideriggen lagt til.

Tiden det tar for å oppnå maksimalt Løftekraft for å sette glidepanelet i bevegelse følger hverandre når det gjelder strekk og trykk. Det vil si at når det kreves høyt kraftbehov for å løfte glidepanelet oppover, vil vi også se toppnotering på påfølgende trykk for få dyttet panelet ned igjen. Trykket som kommer etterpå, skapes av at elmotoren er programmert til å skyve panelt 2 millimeter ned igjen for å simulere virkeligheten. Dette kraftbehovet følger altså hverandre. Poretrykket og normaltrykket som er listet opp i tabellen er registrert når kraftbehovet er størst.

Forsøk fem ble gjennomført uten tilgjengelig poretrykksmåler.

## 5.1 Feilkilder

Det er alltid muligheter for at feil skal oppstå ved utførelse av forsøk. Er man flink og strukturert i planleggingsfasen og ikke minst utførelsen, kan mange muligheter for feil elimineres, men man er aldri sikret. I tillegg skal datamengder som forsøkene frambringer, tolkes og bearbeides på korrekt måte. Det er med andre ord stor sannsynlighet for at noe ikke går helt som planlagt på det ene eller andre området.

En av feilkildene i dette forsøket dreier seg om fuktmålingene av sanden. Sanden ble fuktmålt før hvert forsøk for å sikre mest mulig korrekte proporsjoner og derav korrekte v/c- tall. Om andre som jobbet på laboratoriet hadde gjennomført fukttest før meg den aktuelle dagen, hendte det at disse resultatene ble brukt. Senere viste det seg, at der hvor jeg fant fuktinnhold ved å tørke ut sanden og notere vektsvinn, benyttet andre Speedy Moisture Tester. Da jeg ble oppmerksom på dette, ble et sammenligningsforsøk gjennomført. Resultatet her var nedslående. Speedy Moisture Tester ga en fuktprosent nesten dobbelt så høy. Der jeg noterte 3,46 % med uttørkingsmetoden, ga speedy Moisture Tester 6,14%. Alle fukttester etter dette ble gjort med uttørkingsmetoden, men noen av forsøkene har antagelig blitt tilsatt noe mindre vann, enn hva som hadde vært tilfelle om jeg utelukkende hadde holdt meg til uttørkingsmetoden. En annen mulig feilkilde ved fuktprosenten er at den kan variere noe internt i hver sekk. Her er det uttørking i overflaten osv. det tenkes på.

Største kilde til feil i denne oppgaven, mistenkes imidlertid å ligge i selve glideriggen og måleutstyret tilknyttet denne. Her har jeg merket meg flere forhold jeg tror kan påvirke resultatene.

Det er spesielt fire forskjellige faktorer jeg har lyst til å nevne;

Før hvert forsøk ble formen tapet i alle hjørner. Dette ble gjort for å forhindre at betongen skulle trenge inn i sprekker og skjøter. Spesielt viktig er dette der hvor formen møter glidepanelet.

Etter de fleste forsøkene viste det seg at denne tapen, hadde blitt med glidepanelet oppover når det ble satt i bevegelse.



*Figur 28 tape*

Når tapen blir med oppover som vist på dette bildet, er det nærliggende å tro at friksjonen mellom betongen og glidepanelet, som vi er ute etter å få målt, blir påvirket.

Selv om forskjellige forhåndsregler, som overnevnte tapeingen og at det ble ventet noe før glidepanelet ble startet etter oppfyllingen av formen, evnet vi ikke å komme problemet med at betongen trenger seg inn hvor den helst ikke burde være, til livs.

På bildet under kan vi se betong som har kommet mellom formen og glidepanelet etter at tapen har blitt med glidepanelet oppover og ikke gjort jobben den var tiltenkt.



*Figur 29 stein/ grus fastkilt mellom form og glidepanel*

Betong mellom glidepanel og form påvirker naturligvis måleresultatene til sensorene som ligger bak glidepanelet og registrerer horisontal trykk på panelet. Friksjonen som måles i form av kraftbehovet som trengs for å sette glidepanelet i bevegelse påvirkes også.



Etter hvert forsøk var det begroing på glidepanelet



Etter hvert som flere forsøk var gjennomført ble det også lagt merke til at sidepanelene i formen hadde fått en større glippe ned mot formens bunn. Det tyder på at betongen har klebet seg så sterkt til formens sideplater, at når glidepanelet har dratt betongen oppover, har den gjennom egen treghet fordelt noe av kreftene til sidepanelene.



*Figur 30 glippe under sidevegger*

I forsøk på å motvirke dette ble tvinger montert for å holde sidepanelene på plass.



*Figur 31 Tvinger holder formen sammen*

Det at sidepanelene har blitt forskjøvet oppover betyr at noe av kreftene som har blitt registrert som den kraften som trengs for å forflytte glidepanelet, i realiteten har gått til å dra formen fra hverandre.

Tilslutt må poretryksmåleren nevnes. Mange av resultatene skaper spekulasjoner, og tvil om troverdigheten oppstår.

Forsøket gjennomført med poretryksmåleren i vannbad, forsterker i grunn dette. Selv om oppnådde resultater fra vanntestingen ikke var helt ute, gjorde vi oss forskjellige observasjoner. Da denne måleren ble testet i vannbad, kunne vi fortløpende følge med på målingene som dukket opp og sammenligne med det som ville være fornuftig med tanke på dybden vi til enhver tid opererte i. Vi kunne ta måleren opp å starte på ny, om resultatene ikke ga mening.

Denne muligheten finnes ikke når vi har et reelt forsøk med betong på gang. Under forsøket i vannbadet, observerte vi også hvor ømfintlig måleren var ovenfor luftbobler i systemet. Måten måleren ble holdt på, viste seg å være utslagsgivende. Helning av målerens rør, kunne være nok til at feilaktige resultater oppsto. Flere ganger måtte den også tas opp, åpnes og klargjøres på nytt før den ga resultater med troverdighet.

Målerens spesifikasjoner sier også at den har et målespekter som strekker seg fra 0 til 10 bar. Ofte er jo vi interesserte i undertrykk, altså negativt trykk. Det er usikkert hvordan dette spiller inn på resultatene.

## 5.2 Diskusjon

Ut fra kunnskap tilegnet fra litteratur og samtaler med Kjell Tore Fosså, sitter man med noen tanker og forventinger om hvordan resultatene kommer til å fortone seg.

Første tanker var at forsøket gjennomført med lavest frekvens og lavest løftehøyde er de resultatene som burde gi høyst løftekraft pr  $m^2$  for å få satt panelet i bevegelse. Naturlig tanke rundt dette vil være; hyppigere løft, fører til mindre adhesjonskrefter oppstår mellom glidepanelet og betongen før nytt løft tar til. Likeså, er det nærliggende å tenke at samme effekt vil oppnås ved stor løftehøyde. Høyere løft gjør at flere av bindingene betongen kleber seg fast med, brytes og resulterer i lavere kraftbehov ved forflytning av glidepanelet.

Poretrykket er i henhold til litteratur viktig og må drøftes. Det er kjent at det er partiklene som skaper friksjon når betongen er i kontakt med glidepanelet. Væskens bidrag er så lite, at det kan neglisjeres. Ved positivt poretrykk ser jeg for meg at partiklene er omkranset av blandingens matriks/væske. Selv om det i denne situasjonen er mye trykk på forskalingen, er det effektive trykket lavt ( $\sigma'$ ). Partiklene får lite kontakt med panelet, da de er omsluttet av matriks. Derimot, når hydratiseringen i betongen gir negativt trykk, suges glidepanelet mot panelet. Matriksen omslutter de større partiklene også etter hydratiseringen har startet for fullt, men fungerer dårligere som glidelag siden partiklene klemmes mot hverandre pga. undertrykket. Ut fra dette resonnementet forventes størst friksjon rett etter betongen har avbundet og dannet dette selvbærende skjelettet som gjør det mulig for poretrykket å bli negativt. Effektivt trykk representerer trykket mellom partiklene, som bidrar til friksjon. Det effektive trykket finnes ved å trekke poretrykket fra normaltrykke, se formel. Normaltrykket er trykket betongen genererer mot glidepanelet. Et trykk som ved manuell justering prøver å holdes konstant gjennom forsøkene. Når poretrykket beveger seg fra positivt til negativt trykk gjennom et forsøk, er det primært da variasjonen i det effektive trykket skjer. Da avbinding er tett knyttet til temperatur, er det også interessant og studere de forskjellige temperaturforløpene. Siden det antas at friksjonen blir høyest jo lavere poretrykket blir. Poretrykket blir ikke negativt før etter betongen er avbundet, og det er her vi kan sammenligne med grafen for temperatur i tolkningen.

Når det kommer til løftehøyde og frekvens skal det heller ikke her se bort ifra at poretrykket spiller en rolle. Tanken er at spesielt ved høye løft, unnslipper mer av undertrykket som kan ha bygd seg opp mellom betongen og glidepanelet. Resultatet av dette kan være at friksjonen reduseres når høye løft gjennomføres.

Et annet punkt som skiller forsøkene fra hverandre er betongens v/c-tall. Høyere vanninnhold gir betongen mer kapillærporer. Hvis vi holder oss til tanken om at det er partiklene som skaper friksjon, vil dette føre til at løftfriksjonen går ned når v/c-tallet øker. Flere kapillærporer gir partiklene mindre kontakt med glidepanelet.

Det ble også kjørt også et forsøk med dobbel mengde silikastøv sammenlignet med de øvrige forsøkene. Teorien er at silikastøv sin finehet (1/100-del av et gjennomsnittlig sementkorn i størrelse). Medfører dette til at kontaktarealet mellom partiklene i betongen og glidepanelet øker? Hvis ja, skulle man tro at friksjonen følger med. Det som kanskje er minst like sannsynlig, er at den finere strukturen silika bidrar med gir flere menisker med liten radius, og dette medfører et lavere poretrykk eller høyere friksjon tidligere.

Dobbel silikastøvmengde gjør at den ferskebetongen føles langt seigere, mer tyktflytende og mer klebrig. Noe som tilsier at adhesjon og dermed friksjonen tiltar. I tillegg bidrar høyere silikastøvinnhold til at poretrykket blir lavere, noe som i sin tur bidrar med å øke den totale friksjonen.

Dette til tross, forsøk utført av fra litteraturen viser at silikastøvet bidrar mindre i friksjonsøkningen.

Starter med å se litt på hver betongblanding isolert.

For blandingen med v/c-tall på 0,35 ser en at for det første forsøket (12-2mm, 7,5min) har høyere normalkraft på glidepanelet og derav høyere løftekraft pr. m<sup>2</sup> enn hva som er tilfelle på samme blanding med 12-2mm, 15 min og 22-2mm, 15 min. Andre og tredje forsøk er her relativt nærme hverandre i maks løftekraft. Tidsmessig inntreffer de maksimale verdiene innen den samme halvtimen, i alle tre forsøkene.

For blandingen med v/c-tall på 0,40 (se tabell) ser en at det er det andre forsøket som skiller seg markant ut. Her er løftekraft pr. m<sup>2</sup> nærmere treganger så stor som for det første forsøket, og fem ganger sammenlignet med det tredje. Tidspunktene maksimumsverdiene inntreffer, spriker noe mer enn ved 0.35.

Resultatene fra forsøkene med v/c-tall på 0,45 viser at løftekraften reduseres i testene utført med høyest hastighet pr time. Forsøket utført med løfthøyde på 12-2mm og frekvens på 7,5 min og løfthøyde på 22-2mm og frekvens på 15 min, har omtrent samme maksimale løftekraft og begge er en del lavere enn samme blanding kjørt med lavest løfthøyde og frekvens. Dette resultatet er mer som forventet. Her har det andre gjennomførte forsøket høyest løftekraftbehov pr. m<sup>2</sup>. Både første forsøk, med høyere frekvens og tredje forsøk med høyere løfthøyde viser at løftekraften er en del mindre. Tredje forsøk med størst løfthøyde krever minst av de to.

Det tiende forsøket havner litt utenom bolken med de ni foregående forsøkene, ved at det bare er gjennomført ett forsøk med 10% silika. Det blir naturlig å sammenlikne med forsøk nr fem, da disse har like v/c-tall 0,40, løftefrekvens på 15 min og løfthøyde på 12-2 mm. Det vi her ser, er at det tiende forsøket med dobbel mengde silika har under halve av løftekraften(maks). Dette er uventet av flere årsaker. Ved observasjon av begge blandingene, vil man se og kjenne at en økning på 5 % silika gjør betongen mer seigtflytende og lettere for å klebe. Noe som bidrar til at det motsatt forventning. I følge observasjoner fra litteraturen, nevnt i kapitlet vedrørende høyde og frekvens peker også i samme retning. Mye tyder på at noe har forstyrret resultatene på forsøk nr fem.

Studerer resultatene blandingene imellom, er det også vanskelig å dra klare konklusjoner. Det er ingen tydelig tendens til at høyere v/c- tall gir lavere friksjon i disse resultatene. Det første forsøket med frekvens på 7,5 min og løfthøyde på 12-2 mm viser riktignok at friksjonen går opp i det vi går fra 0,45 til 0,40. Men friksjonen reduseres fra 0.40 til 0,35.

Ser vi på forsøket med lavest glidehastighet pr time, 15 min i frekvens og 12-2 mm i løftehøyde er det vanskelig å konkludere rundt spørsmålet hvilken effekt v/c-tallet har. Her er det mulig at 0,40 forsøket kan ha blitt forstyrret av utilsiktet friksjon pga. fastkilte partikler eller lignende. Selv om vi velger å se bort fra dette 0,40-forsøket, kan likevel ikke resultatene sies å bygge opp under teorien. Forsøket med 0,35- betong oppnår lavere løftekraftbehov enn 0,45.

Målingene gjennomført på forsøket med frekvens 15 min og løftehøyde på 22-2mm peker heller ikke i bestemt retning. Løftekraften går ned ved v/c-tall 0,40 i forhold til 0,45 Ved v/c-tall 0,40 til 0,35 øker maks løftekraft, men ikke over det som ble notert for 0,45. maksimal Løftekraft for v/c- tall 0,35 viser et resultat mellom forsøk med v/c-tall 0,45 og 0,40.

Sammenlignes resultatene for løftefrekvens og løftehøyde på kryss av v/c-tallene, kan en tendens observeres. 0,40 og 0,45 har begge lavest kraftbehov på testen som ble gjennomført med høyest løftehøyde. For 0,35 er det også nesten tilfelle. Noe annet som er forstyrrende her, er at det er forsøket med laveste løftehastighet per time som har lavest løftekraft. På v/c tall på 0,4 og 0,45 derimot er de her høyest, noe som rimer bedre med teoriene.

Poretrykkresultatene viser også et resultat som ikke er helt som forventet. Den eneste gangen hvor det faktisk er målt et negativt poretrykk ved maksimal løftekraft, er på det første forsøket. Ser vi på diagrammet hvor poretrykket og løfterkraften er presantert for dette forsøket, ser dette diagrammet logisk ut og som forventet ut. Vi ser at i det fallraten til poretrykket er størst begynner løftekraftbehovet å øke. Avbindingsprosessen til betongen er i gang, det effektive trykket øker. For at det effektive trykket skal kunne øke, må som kjent betongen ha skapt dette selvbærende skjelettet som står imot når betongens indre fortsetter og krympe og det oppstår porer med vakuum. Altså, når poretrykket er lik null, indikerer det at avbiningen er i ferd med å starte. I diagrammet hvor poretrykket og temperaturener vist, ser vi at disse er bra samstemte.

Dessverre inneholdt det første diagrammet det eneste av mine poretrykkmålinger, som virker fornuftig. Studeres noen av de andre diagrammene, observerer vi at poretrykket ofte faller veldig langsomt, og passerer ikke null før gjerne 12 -15 timer ut i forsøket. Langt etter antatt avbindingstidspunkt. På andre forsøk starter med en positiv stigningsrate, som også er uventet da det er forventet at kun det hydrostatiske trykket i betongen som påvirker. Det blir aldri større enn det er i utgangspunktet, da det er skapt av betongens egenvekt som ikke øker i verdi.

Temperaturprofilet er målt helt uavhengig av alle andre målinger og er i seg selv langt mer pålitelige målinger. Hvis vi ser i grafene hvor temperatur og løftkraft er plottet sammen ser vi at der betongtemperaturen øker med to grader. Dette er omtrent i konsekvent samsvarer med der hvor den maksimale løftkraften opptrer.

Det er vanskelig å se klare bastante resultat basert på gjennomførte målinger. Bortsett fra at avbindingstidspunktet i henhold til tempermåleren samsvarer godt med hvor maksimalt løftkraft inntreer. Er det vanskelig å tyde og finne andre gode sammenhenger.

Antall gjennomførte forsøk skulle vært langt høyere. Flere identiske forsøk skulle vært gjennomført for å finne glideriggens reproducerbarhet. På denne måten kunne resultatene blitt vurdert opp mot hverandre og vi hadde fått sett testriggens evne til å reproducere de samme resultatene med like forutsetninger.

Grafene presentert i diagrammene over viser hvordan normaltrykket og behov for løftekraft varierer forsøket igjennom. Blå graf representerer utviklingen til de fire sensorene bak glidepanelet summert. Hvis vi hadde latt denne variabelen gå sin naturlige gang hadde vi trolig observert en annerledes utvikling. Antagelig hadde vi da fått en graf som hadde hatt utgangspunkt i det hydrostatiske trykket betongen hadde generert mot glidepanelet. Deretter skulle vi med teorien i bakhodet tenke oss at den ville ha dalt på grunn av krympingen i forbindelse med svinnet som forekommer under hydratiseringsprosessen. Samtidig som normaltrykket ville ha blitt redusert på grunn av volumreduksjon av klossen, ville det ha blitt forsterket av det negative poretrykket som oppstår etter avbindingstidspunktet av betongen. Ved å manipulere normaltrykkavlesningen ved å manuelt å korrigere sensorene underveis i forsøket, er tanken at normaltrykket skal holde seg konstant. Dette ser vi ut fra grafene er bare delvis vellykket.

Grafene over viser hvordan normaltrykket og kraften som må til for å overvinne friksjonen som oppstår mellom betong og glidepanel for å sette panelet Blå graf viser utviklingen til de fire sensorene bak glidepanelet summert. Det er denne summen av normaltrykk, vi ideelt sett skulle ha sett at jeg ved hjelp av manuell justering hadde holdt stabil gjennom hele testsyklusen. Slik ville all variasjon i den røde grafen, som beskriver variasjonen i det nødvendige kraftbehovet for å sette glidepanelet i bevegelse kunne blitt tilskrevet poretrykkforandringer.



## 6 Konklusjon

Utgangspunktet for denne oppgaven var å utforske forskjellige forandringer med betongen og glideprogrammet. Forskningsspørsmålet som skulle belyses; hvilken parameterforandring har størst innvirkning ved glidestøp. Effekter det ble sett etter var friksjonsforskjeller mellom glidepanel og betong. Formålet med oppgaven og tilhørende laboratoriearbeid har vært å styrke forståelsen av glidestøp som produksjonsteknikk.

Det er fire parametere som har blitt justert i løpet av forsøkene; v/c-tall, løftefrekvens, løftehøyde og mengde silicastøv. Silicastøvmengde har riktignok fått begrenset fokus.

Ved sammenligning av resultatene er det vanskelig å trekke klare konklusjoner verken den ene eller andre retningen. Av de svarene det ble jaktet på, er det for mange avvik til at det kan trekkes slutninger og konkluderes.

Ser vi først på resultatene hvor det varieres med v/c-tallet er vanskelig å trekke ut tydelig nok informasjon til å hverken støtte opp under, eller motsi teorien. Enkelte målinger styrke teorien om at laft v/c-tall gir høyere friksjonstall, andre målinger sier det motsatte. Resultatene rundt dette er så vage, at selv det å peke på en tendens er utfordrende.

Variasjon rundt løftehøyde og løftefrekvens tenderer i litt tydeligere grad at høy løftehøyde er det som gir lavest friksjon. For betonglandingene med v/c-tall på 0,40 og 0,45 gir også testen som har lavest høyde og frekvens høyest friksjon. Disse observasjonene støtter i så måte at lav løftehastighet er ugunstig med tanke på friksjon.

Dobbel silikamengde blir det også vanskelig å si mye om, når det ene forsøket det er mest naturlig å sammenligne med, har det desidert høyeste friksjonstallet og på den måten indikerer at noe ikke er som det skal med sammenligningsgrunnlaget.

Sett i ettertid, når man er klar over pågangen av universitetets betonglaboratorium, synes det som en god idé og redusere antall varierende parametere. På den måten kunne flere identiske forsøk vært gjennomført. Dette hadde gitt en pekepinn om riggen har tilfredsstillende reproduserbarhet eller ikke. Det hadde også vært færre usikkerheter å holde styr på underveis. Noe som også hadde gjort resultatene mer interessante å studere, er om mer en ett av ti forsøkene hadde gitt troverdige poreresultater. Mer tid burde vært viet til å forstå, plassere og gjøre denne klar til testing.

## 7 Referanser

- [1] Forskalingseksperter, Klatreforskaling K, docplayer.me: doka, 2014, p. 60. [Online]. Available: <http://docplayer.me/15682321-999715018-04-2014-no-forskalingseksperter-klatreforskaling-k-brukerinformasjon-monterings-og-bruksanvisning-9715-244-01.html>.
- [2] *Metode og forskningsdesign*. Available: <https://www.holbergprisen.no/holbergprisen-i-skolen/metode-og-forskningsdesign.html>
- [3] B. Øyvind, "Volumendringer og risstendens i betong," 2009, Available: [https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/194017/volumendringer\\_og\\_risstendens\\_i\\_betong.pdf?sequence=1](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/194017/volumendringer_og_risstendens_i_betong.pdf?sequence=1).
- [4] P. I. Gjerp, M. Opsahl, and S. Smeplass, *Grunnleggende betongteknologi*, 2. utg. ed. (Betongkompetanse). Lillestrøm: Byggenringens forl., 2004.
- [5] V. M. Malhotra, "The Influence of Superplasticizers on the Degree of Flocculation of Cement Grains," presented at the Fourth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Natural Resources Canada, 405 Rochester Street, October 1994, 1994.
- [6] K. T. Foss, "Slipforming of vertical concrete structures : friction between concrete and slipform panel," [2001:61], Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2001.
- [7] *Meccanica. Friksjon*. Available: <http://meccanica.no/statikk/friksjon.htm>
- [8] J. T. Busterud, "Slipforming - Materials effect on friction," ed: University of Stavanger, Norway, 2016.
- [9] N. N. Betongforening, "Veiledning for prosjektering og utførelse av konstruksjoner utstøpt med glideforskaling," 2017, Art. no. 25.
- [10] S. Vegvesen, "Bruk av glideforskaling kontra klatreforskaling," 1994.
- [11] *Norcem Anleggsement FA*. Available: [https://www.norcem.no/no/anleggsement\\_FA](https://www.norcem.no/no/anleggsement_FA)
- [12] D. SX-N, "Superplastiserende tilsetningsstoff," p. 2 Available: [http://www.mapei.com/public/NO/products/dynamon\\_sx-n\\_no.pdf](http://www.mapei.com/public/NO/products/dynamon_sx-n_no.pdf)
- [13] S. B. Bjerkestrand and K. T. Foss, "Glidestøp - løftefrekvensens effekt på friksjon," ed: University of Stavanger, Norway, 2017.
- [14] HBM, "C2 Load Cell: Reliable Compressive Force Measurement From 0.5 to 200 kN," 2017. Available: <https://www.hbm.com/en/2407/u2b-highly-versatile-load-cell-for-tensile-and-compressive-forces/>
- [15] Thermocouple, "Type T Thermocouple," 2011. Available: <http://www.thermocoupleinfo.com/type-t-thermocouple.htm>
- [16] HBM, "P8AP," 2017. Available: <https://www.hbm.com/en/2484/p8ap-for-static-and-dynamic-liquid-and-gas-pressures/>

# 8 Vedlegg

