

Diplomingeniørprojekt 2018

Cirkulering af affald til produktion af byggematerialer *- Anvendelse af glasuld i tegl*



Studerende: Christian Brandt Østerby, s133761

Vejledere: Lisbeth M. Ottosen

Gunvor Marie Kirkelund

Forord

Dette diplomingeniørprojekt er skrevet og udført af Christian Brandt Østerby, Diplom Bygningsdesign på Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg. Med vejledning fra Professor, Lisbeth M. Ottosen og teknisk assistance fra Laborant, Malene Grønvold og Ebba C. Schnell, som jeg skylder stor tak.

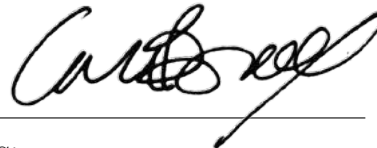
Afgangsprojektet er vægtet med 20 ECTS-point og er skrevet og udført i perioden 22-05-2018 til 07-09-2018.

Afhandlingen er skrevet til aktører med interesse og teknisk forståelse og tager afsæt i vidensgrundlaget som studerende på DTU, Diplom Bygningsdesign. Ydermere henvender opgaven sig til en markedsideologi om genanvendelse og ressourcebesparelse.

Opgaven gør overvejende brug af referencer og citationer i overensstemmelse med formatet fastlagt af Modern Language Association (MLA).

07.09.2018

Dato



Signatur

Abstract

This Bachelor Thesis examines the possibility of utilizing glass insulation waste in bricks. The project is of experimental nature, expressed through laboratory investigations of the properties of brick and glass wool. Furthermore, the project discusses the potential of glass wool as a waste product, that can be part of a circular value chain where it is recycled as a valuable resource.

Wastes are a significant resource that can be an important part of the work to reduce the building's resource consumption and environmental impact. In spite of this, 4 % annually is landfilled, corresponding to approx. 450 thousand tons of Denmark's total waste production. The use of glass wool in bricks is an example of utilizing a waste for value creation.

Glass wool waste was added in bricks up to 15 wt-% in two studies using different sample sizes; pill and cube samples - both types of samples burned at 1000 °C.

First, pellets samples were produced and tested to assess the possibility of interfering with glass wool and the immediate properties of the material. The pellets were subsequently measured and weighed on properties such as shrinkage, density and porosity. Based on the test results for the pellet samples, three cube samples were produced for each percentage of 0% - 5% - 10% - 15%, respectively. The cubes were formed under a pressure of 4 kN and dried by a custom program to avoid drying cracks. Subsequently, all samples were measured and weighed on properties such as shrinkage, density, porosity, capillary suction (water absorption) and compressive strength.

The addition of glass wool resulted in reduced drying shrinkage, which can have a particularly beneficial effect on the production and spillage of bricks, and possibly contribute to new design of the material. The bricks visual character also gradually changes with glass wool - as the surface becomes rougher and colour tinted green. Density is reduced and porosity increased by using glass wool, and at the expense of this the water absorption increases while the compressive strength reduces.

Based on the experimental results found, it is concluded that the use of glass wool, as a pore-forming agent in bricks, shows promising properties and suggests new relevant experiments that can further help determine the opportunities of glass wool as additive in bricks.

Resume

Dette diplomprojekt undersøger potentialerne i at bruge isoleringsaffald, mere specifikt glasuld, i produktionen af tegl. Igennem eksperimentelle laboratorieforsøg undersøges tegl og glasulds egenskaber hver for sig og sammen for at komme nærmere hvilke potentialer og udfordringer, der ligger i at genanvende glasuld i teglproduktion.

Projektet baserer sig på grundtankerne i den cirkulære økonomi, hvor affald anskues som betydningsfulde ressourcer, der kan bruges i nye produkter - igen og igen. Det er en vigtig brik i arbejdet med at reducere byggeriets ressourceforbrug og miljømæssige belastning. I Danmark deponeres årligt 4 % af vores samlede affaldsproduktion, det svarer til ca. 450 tusind ton. Brugen af glasuld i tegl, kunne blive et eksempel på udnyttelsen af dele af denne affaldsfraktion. Projektets forsøgsresultater viser, at der er lovende potentialer i dette.

Forsøgene med at indblende glasuld i tegl er udført på op til 15 vægt-% i to forskellige størrelsesordner, pille- og kubeprov - begge prøvetyper brændt ved 1000 °C. Først blev der udført forsøg på pilleprøver for at vurdere muligheden for indblanding af glasuld og materialets egenskaber som følge heraf. Teglpillerne blev efterfølgende målt og vejede på egenskaber som svind, densitet og porøsitet. Med afsæt i forsøgsresultaterne for pilleprøverne blev tre kubeprov for hver indblandingsprocent på 0% - 5% - 10% - 15% produceret. Kuberne blev formet under et tryk på 4 kN og tørret ved et tilpasset program for at undgå tørringsrevner for alle prøvetyperne. Efterfølgende blev samtlige prøver målt og vægtet på egenskaber som svind, densitet, porøsitet, kapillarsugning (vandabsorption) og trykstyrke.

Tilsætningen af glasuld resulterede i et reduceret tørringssvind, der kan have en særlig gavnlig effekt på produktion og spild af tegl, og muligvis medvirke til nye udformninger af materialet. Teglets visuelle karakter ændres ligeledes gradvist med glasuld - da overfladen bliver ru og grønne farvenuancerne toner frem. Densiteten reduceres, og porøsiteten øges ved brug af glasuld, og som følge heraf øges vandabsorptionen, mens trykstyrken reduceres.

Med udgangspunkt i de fundne forsøgsresultater konkluderer rapporten, at brugen af glasuld som poredannende tilslag i tegl viser lovende egenskaber, og der peges i retning af nye relevante forsøg, der yderligere kan bidrage til at afgøre glasulds potentialer for tegl - ikke mindst, når det handler om at tage produktionen fra laboratorie til teglværksproduktion.

Indhold

1. Introduktion	1
1.1. Problemformulering	3
1.2. Tidligere studier	4
1.3. Introduktion til rapporten	5
2. Materialer	6
2.1. Tegl	6
2.1.1. Tegls æstetiske variationer	7
2.1.2. Tegls egenskaber	8
2.2. Glasuld	12
3. Metode	13
3.1. Karakterisering af glasuld	14
3.1.1. Mikroskopi	14
3.1.2. Glødetab	14
3.2. Oparbejdning af teglprøver	15
3.2.1. Forberedelse	15
3.2.2. Blanding og formning	16
3.2.3. Tørring og brænding	18
3.3. Tekniske egenskaber af teglprøver	20
3.3.1. Svind	20
3.3.2. Porøsitet og densitet	20
3.3.3. Kapillarsugning	21
3.3.4. Trykstyrke	21
4. Resultater	22
4.1. Glasuld	23
4.1.1. Mikroskopi	23
4.1.2. Glødetab	24
4.2. Teglpiller	25
4.2.1. Svind	25
4.2.2. Porøsitet og densitet	26
4.3. Teglkuber	27
4.4. Synlig vurdering	27
4.4.1. Svind	29

4.4.2. Porøsitet og densitet	30
4.4.3. Kapillarsugning	31
4.4.4. Trykstyrke	33
5. Diskussion	35
5.1. Glasuld har gavnlig indvirkning på tegl	37
5.2. Glasuld fremmer isoleringsevnen	38
5.3. Glasuld forringer trykstyrken	39
5.4. Glasuld er et tilslagsmateriale med gode potentialer	40
6. Videre studie	43
7. Konklusion	45
Appendiks	48
I. Appendiks - Øvelsesvejledninger	49
II. Appendiks - Blanding	55
III. Appendiks - Tørring og brænding	56
IV. Appendiks - Trykprøvning	57
V. Appendiks - Forsøgsdata	61

Figurer

2.1.1. Teoretisk kapillarsugning i materialer, herunder tegl.	10
3.2.1. Glasuld før og efter det er blevet optrævlet	15
3.2.2. Pillepresse og dens tilhørende specifikationer, til formning af pilleprøver	17
3.2.3. Kubepresse og dens tilhørende specifikationer, til formning af kubprøver	18
3.2.4. Brændingsprogram for samtlige teglprøver, i programmerbar Nabertherm ovn.	19
4.1.1. Billeder fra mikroskop <i>FEI Quanta 200</i> , af to typer glasfibre, tilfældigt udtaget fra samme glasuldsprøve.	23
4.1.2. Glasuld i tre forskellige stadier, fra venstre; 1) uopvarmet 2) opvarmet til 550 °C, 3) opvarmet til 950 °C.	24
4.2.1. Teglpilleproduktionens stadier; blanding, formning og brænding.	25
4.2.2. Forsøgsresultater for teglpillers tørrings- og brændingssvind (venstre) og samlet svind (højre).	26
4.3.1. Teglkuber i produktionstadiet; blanding, formning og brænding.	27
4.4.1. Overblik over producerede teglkuber, hvor B og C er kontrolprøver (0 %) og yderligere indblandingsmængder er angivet D (5 %), E (10 %), F (15 %). 27	
4.4.2. Forsøgsresultater for kubprøvers tørrings- og brændingssvind (venstre) og samlet svind (højre).	29
4.4.3. Sammenligning mellem teglkubers porøsitet (venstre) og tørdensitet (højre).	30
4.4.4. Sammenligning mellem faststoffdensitet for teglpiller (venstre) og teglkuber (højre).	30
4.4.5. Graf over kapillarsugningen for teglkuber.	31
4.4.6. Diagram der viser den stigende minutsugning, ved øgede mængder glasuld.	32
4.4.7. Diagram der viser trykstyrken for teglkuberne, hvoraf det ses at der er en umiddelbar styrkereduktion i kubprøver med glasuld.	33
4.4.8. Billedet illustrerer den ydre revnedannelse, på en teglprøve med 0 % glasuld, der kan karakteriseres som let timeglasformede.	34
4.4.9. Billedet illustrerer den indre revnedannelse, på samme prøve med 0 % glasuld, hvor timeglasformen tydeligt kommer til udtryk. Lignende illu- strationer kan findes i <i>IV. Appendiks</i>	34

Tabeller

1.2.1.Overblik over tidligere studier der gør brug af fiberlignende materialer i tegl.	4
4.1.1.Resultat for glasulds glødetab, ved opvarmning til hhv. 550 °C og 950 °C	24
4.2.1.Resultater for svind og afvigelser, for teglpiller.	25
4.2.2.Resultater for teglpillers porøsitet og densitet med afvigelser.	26
4.4.1.Resultater for svind og afvigelser, for kubeprov.	29
4.4.2.Forsøgsresultater teglkubers for porøsitet, tørdensitet og faststoffdensitet.	30
4.4.3.Kapillaritetstal, k , beregnet på baggrund af aflæste værdier, Q_{kap} og $\sqrt{t_{kap}}$	32
5.0.1.Sammenligning med standardværdier, grænseværdier og andre studier.	36

1. Introduktion

Det byggede miljø efterlader et enormt aftryk på klimaet og miljøet. Bygningsmassen står for 40 % af vores samlede CO2 emissioner, et voldsomt materialeforbrug og skaber en stor del af vores affald. Samtidig lever vi i en tid med stigende befolkningstal og en vedvarende flytning fra land til by, hvilket øger presset på vores byggeri og ressourcer. I Danmark alene får vi brug for 20.000 nye boliger om året frem til 2025 [1]. Bygge- og anlægssektoren spiller derfor en nøglerolle i bestræbelserne på at sikre et bæredygtigt samfund med en klog og miljøbevidst anvendelse af ressourcer og minimal klimabelastning til følge.

I dette er affald en betydningsfuld ressource, der kan blive en vigtig i brik i arbejdet med at reducere byggeriets ressourceforbrug og miljømæssige belastning. 36,8 % af alt affald i Danmark i 2015 kom fra bygge- og anlægssektoren, svarende til 4,16 mio. ton, hvilket er en tilvækst på 13 % fra 2013. Heraf blev 87 % (3,6 mio. ton) genanvendt, mens der afbrændes 6 %, deponeres 6 % og 1 % sendes til særlig behandling [2]. En væsentlig sidebemærkning er også, at der i de 87 % genanvendelse i vid udstrækning er tale om en forringelse af materialets originale værdi, eksempelvis når det afbrændes til varmforsyningen, nedknuces til vejfyld eller nedbrydes til flis.

Fra Miljøministeriet lyder en målsætning, at der skal være *“bedre kvalitet i genanvendelsen af bygge- og anlægsaffaldet”* [3]. Det skal ske samtidig med, at der opretholdes en høj genanvendelsesprocent. Her spiller den cirkulære økonomis principper om genanvendelse forstået som genbrug og upcycling en vigtig rolle.

Erfaringer viser, at nogle materialer med potentiel værdi deponeres på grund af manglende muligheder for genanvendelse eller forbrænding. Heriblandt findes glasuld i iøjnefaldende store mængder, og det mister signifikant, potentiel værdi ved bortskaffelsesmetoden, deponi, taget i betragtning. I 2002 blev 25 ton deponeret [4], men mængden skønnes at være meget højere, da den samlede affaldsmængde isolationsmaterialer i 2015 var 14 tusind ton og blandet nedrivningsaffald udgjorde 452 tusind ton [2].

Produktionen af glasuld blev i 2000 opgjort til ca. 40 tusind ton (Isover, 2001), hvoraf halvdelen skønnes at være brugt på det danske marked. Den akkumulerede mængde frem til idag, kan derfor anslås til at være på mere end 350 tusind ton glasuld frigivet på det danske marked. Ifølge Miljøstyrelsens materialestrømsanalyse fra 1991 er der dog grund til at tro, at der er anvendt flere millioner ton mineraluld (heraf en andel glasuld) på det danske marked, inden denne tidsafgrænsning. Produktion og anvendelsen af glasuld

taler for, at der fortsat vil være en strøm af glasuldsaffald, der kræver affaldshåndtering, i fremtiden.

Årsagen til, at så mange ton glasuld ryger til deponi, er, at glasuldsproduktionen i Danmark ikke har et etableret og bæredygtigt genanvendelsessystem, der kan muliggøre at anvendt glasuld kan indgå i produktionen af nyt. Det skyldes først og fremmest, at produktionsovnene til glasuldfremstilling beskadiges, hvis der kommer de mindste fremmedlegemer med i processen. Selv rene afskæringer fra byggepladser med ganske lidt forurening, f.eks. i form af stenuld, søm og skruer, kan ikke tages ind i produktionen af glasuld. Tilsvarende er der *ikke* arbejdet med andre former for genanvendelse af glasuld, eksempelvis i produktionen af andre, nye materialer.

Teglindustrien anses som en industri med særlig mulighed for at anvende affald i produktionen, da lerbaseret keramik, som teglsten, er heterogene materialer, der kan sammenblandes med en bred vifte af råmaterialer uden at forringe de tekniske egenskaber [5]. Denne egenskab har gjort tegl til et særlig interessant materiale i sammenhæng med affaldshåndtering og har resulteret i studier og afprøvning af dette på verdensplan [6].

En rapport publiceret i 2000 af Miljøstyrelsen har i samarbejde med en række parter analyseret de miljømæssige forhold i alle faser af tegl- og mørtelprodukters livscyklus. I den forbindelse har Kalk- og Teglværksforeningen af 1893 undersøgt brugen af mineraluld som tilslag i produktionen af teglsten. Tilslag karakteriserer i denne forbindelse tilsætningen af et materiale til teglet. Her fremgår det, at brugen af mineraluldsfibre har en positiv indvirkning på tørringsprocessen, fordi fibrene reducerer risikoen for revner. Dog vurderedes det, at fibrene mister deres styrke ved brænding og herefter må betegnes som et magringsmateriale, der næppe bidrager til lermolekylernes sammensmeltning. Tilsætningen af mineraluld reducerer dertil trykstyrken for teglet, dog først efter andele på over 1 % [7] [8].

Af rapporten fremgår det hverken hvilke mineraluldsprodukter, der er blevet undersøgt eller de egentlige forsøg, der er blevet udarbejdet eller deres resultater. Det må forventes, at mineraluldsprodukterne sten- og glasuld opfører sig meget forskelligt ved brændingsprocessen i teglproduktionen og dermed også påvirker teglets tekniske egenskaber forskelligt. Det danner derfor grundlag for dette projekts problemformulering og genstandsfelt, der fokuserer specifikt på glasuld fremfor fællesbetegnelsen mineraluld.

1.1. Problemformulering

Projektets formål beror på en målsætning om at *genanvende glasuld*, ved at bruge det i teglproduktionen og undgå de miljøproblemer afskaffelse af glasuld er årsag til. Ligeledes er det en målsætning at *vurdere forandringen af tegls tekniske egenskaber*, og opnå *besparelse af råmateriale* ved tilsætning af glasuld som alternativt materiale.

Disse målsætninger danner grundlag for følgende problemformulering:

- *Hvorvidt kan glasuld anvendes som et fysisk holdbart materiale i produktionen af teglsten og dermed medvirke til besparelse af råmateriale? Hvilke positive og negative effekter har glasuld på teglstens egenskaber?*

Denne problemformulering vil blive undersøgt gennem en række underspørgsmål:

- *Hvad karakteriserer glasuld?*
- *Hvilke fysiske egenskaber besidder glasuld ved påvirkning af tegllignende produktionsmetoder?*
- *Hvordan påvirker tilsætning af glasuld tegls synlige fysiske egenskaber?*
- *Hvor stor del af teglmassen kan udgøres af glasuld?*
- *Hvordan påvirker tilsætning af glasuld tegls tekniske egenskaber?*

For at besvare problemstillingen og de fem spørgsmål udføres et eksperimentelt studie, hvor glasulds indvirkning på tegl undersøges gennem en række laboratorieforsøg. Her udarbejdes undersøgelser og forsøg i tre trin: 1) undersøgelse af glasfibre fra glasuld og dets egenskaber, 2) vurdering af de umiddelbare egenskaber ved teglpilleprøver med glasuld og 3) analyse af teglkubprøver, hvor svind, densitet, porøsitet, kapillaritet og trykstyrke undersøges.

1.2. Tidligere studier

Brugen af affald som tilsætning til teglproduktionen er i et vist omfang undersøgt for en række affaldsfraktioner, dette er bl.a. grundet teglindustriens særlige mulighed for inkorporering af affald i produktionen. Brugen af affald er typisk gjort af en række forskellige årsager, hvoraf besparelse af råmateriale, forbedring af tekniske egenskaber eller løsning af problematisk affaldshåndtering, er nogle af de hyppigste.

I dette afsnit vil der hovedsageligt blive fokuseret på tilsætning af fiberlignende affaldsprodukter af organisk og uorganisk art. Dette skyldes først og fremmest, at der ikke er grundlag for sammenligning med studier der bruger glas- eller mineraluld, herunder Miljøstyrelsens forsøg med mineraluld grundet dets manglende forsøgsdata som nævnt indledningsvist. Generelt for de fiberlignende typer af affaldsprodukter gælder det, at de har samme type af indvirkning på tegls tekniske egenskaber, som glasuld forventes at have. Der, hvor tilsætningen af fiberlignende affald fra tidligere studier i nogen grad afviger fra dette studie, er i forhold til, hvilke egenskaber, der er blevet undersøgt og med hvilke metoder. I tabel 1.2.1 opsummeres de udvalgte studier kort.

Når resultaterne fra dette studie afslutningsvist diskuteres i rapporten, vil de blive sammenlignet med dele af tidligere studier, for bedre at vurdere, hvordan glasuld opfører sig, når det indblandes i tegl.

Tabel 1.2.1.: Overblik over tidligere studier der gør brug af fiberlignende materialer i tegl.

Emne	Forfatter	Resumé
Mineraluld [7]	Miljøstyrelsen (1999)	Studiet undersøger brugen af en række alternative materialer i tegl, heriblandt mineraluld. Studiet konkluderer at tilsætning af mineraluld øger råstyrken i tørrede sten og dermed mindre risiko for tørringsrevner. Trykstyrken reduceredes ved indblanding af mere end 1 vægt-%. Resultaterne fremstår tvetydige i forhold til om der kan konstateres målbare forbedringer i kvalitet eller spild i forhold til den normale produktion.
Organic residues [9]	I. Demir (2007)	Studiet undersøger brugen af organiske fibre, som savsmuld, tobak og græs, i tegl. Studiet viser at brugen af organiske fibre (op til 10%) har til egenskab at danne porer og øge isoleringsevnen - dog overskred tørringssvindet kravene ved indblanding af 10%, imod de opsatte forventninger om reduceret tørringssvind. Indblanding af organiske fibre resulterer ydermere i øget tørstyrke, svind, porøsitet og vandabsorption og reduceret densitet og trykstyrke.
Glass Reinforced Plastic [10]	A. Mobili et al. (2018)	Studiet undersøger brugen af glasforstærket plastik, som fibre i tegl. Studiet viste på baggrund af iblanding på op til 10%, at den mineralogiske sammensætning ikke påvirkes, at porrestørrelsesfordelingen, porøsiteten, vandabsorptionen og bøjningsstyrken øges, og at densiteten og trykstyrken reduceres. Det vurderedes at øget bøjningsstyrke vil resultere i reduceret revnedannelse efter endt produktion.
Kaffegrums [11]	J. Garst (2017)	Studiet undersøgte brugen af kaffegrums i tegl til at fremme teglets isoleringsevne. Studiet viste at brugen af kaffegrums op til 10% resulterede i øget svind, porøsitet, vandabsorption og reduceret densitet, termisk konduktivitet og trykstyrke.

1.3. Introduktion til rapporten

Denne rapport er struktureret i fem kapitler, der hver især bidrager til at svare på opgavens problemformulering og underspørgsmål. Den gennemgående kronologi i afsnittene følger de tre trin som undersøgelsen er opbygget af: 1) karakterisering af glasuld, 2) undersøgelse af glasuld i teglpiller og 3) undersøgelse af tekniske egenskaber af glasuld i teglkuber. Intentionen med dette er trinvist at udfylde disse videnshuller og opnå brugbare resultater.

Materialer

Afsnit 2 Materialer er et teoretisk afsnit, der beskriver teorien bag materialerne, tegl og glasuld. Det har til formål at kortlægge den grundlæggende viden om materialerne og deres fysiske egenskaber - både i videnskabelig og kontekstuel sammenhæng. For hver målbar egenskab er anført en grænseværdi eller standardværdi, der senere vil blive anvendt i vurderingen af projektets forsøgsresultater.

Metoder

Afsnit 3 Metoder beskriver de anvendte metoder, brugt som fremgangsmåde til undersøgelse af materialernes karakteriske egenskaber. Visse undersøgelser er blevet udført på baggrund af angivne forsøgsbeskrivelser - disse er vedlagt i *I. Appendiks*.

Resultater

Forsøgsresultaterne er præsenteret i *afsnit 4 Resultater*, illustreret med grafer, tabeller og billeder. Resultaterne er diskuteret internt og opdelt i de undersøgte materialer og dernæst egenskaber.

Diskussion

I *afsnit 5 Diskussion* sammenlignes og diskuteres forsøgsresultaterne i forhold til de grænse- eller standardværdier, der beskrives i det teoretiske afsnit. Ligeledes diskuteres forsøgsresultaterne i forhold til de tidligere studier, der er redegjort for indledningsvist. Afslutningsvist vil forsøgsresultaterne blive sat i ind i en bredere branchemæssig sammenhæng med refleksioner om strukturelle udfordringer og forretningsmæssige potentialer.

Videre studie

Afsnit 6 Videre studie vil beskrive mulighederne for videre studier dette projekt har været springbræt til.

Konklusion

I *afsnit 7 Konklusion*, vil de endelige konklusioner fra de forskellige undersøgelser blive klarlagt - og projektets fremtidige muligheder blive beskrevet.

2. Materialer

2.1. Tegl

Tegl er et af de mest traditionsrige materialer, vi har og har i over 800 år været anvendt som byggemateriale i Danmark. Teknikken bag teglbrænding og murerhåndværket stammer fra Italien, bragt hertil af munke og taget i arv, da det nødvendige ler fandtes i rigelige mængder. Indtil det 20. århundrede foregik teglbrændingen under meget primitive former, hvor teglet typisk blev brændt i mindre murede ovne. Disse former for teglproduktion kan stadig findes i udviklingslande, på mindre basis, hvor private brænder egne sten.

I Danmark overtog tegl behovet for natursten og egentlige teglværker opstod i stort antal. Efter godt et århundrede i teglværkernes storhedstid, er mange af teglstens funktioner erstattet af enten billigere materialer eller af materialer med forbedrede egenskaber. Til trods for dette besidder tegl en æstetisk værdi, som endnu ikke har fundet en konkurrence erstatning - og de største af teglværkerne lever derfor fortsat, men reduceret fra flere end 2000 til færre end 20 [12].

I dag ses tegl oftere og oftere som et beklædningsmateriale på facader og tag, og erstattes i stigende grad af beton og lign. som bærende materiale i de skjulte bygningskonstruktioner. Tegl er dog stadig et af de mest anvendte byggematerialer i Danmark, hvilket i høj grad skyldes den danske byggetradition, og at materialet deraf tillægges en høj æstetisk værdi. Dette er også nogle af grundene til, at teglbranchen har formået at følge med udviklingen, da de ud over at have bevaret ideologien om et naturligt materiale, også har formået at udvikle materialets æstetik, gennem teknisk forfinelse af produktionsleddene udformning og udseende.

Ler er teglindustriens råmateriale og kan overordnet opdeles i to grupper; rødler og blåler, hvor rødler giver rødbrændte teglsten og blåler giver gulbrændte. Det der afgør om hvorvidt leret er rød- eller gulbrændende er dets indhold af calciumkarbonat (CaCO_3) og jernoxid (Fe_2O_3). I gulbrændende teglsten findes typisk omkring 20 % CaCO_3 og nærmere 1 % CaCO_3 for rødbrændende. En gammel tommelfingerregel lyder overordnet, at leret er gulbrændende, hvis indholdet af CaCO_3 er mere end 3 gange så højt som Fe_2O_3 [12] [13].

De mest nævneværdige mineraler i dansk teglværksler er:

Kvarts (SiO_2): 50 % - 70 %

Aluminiumoxid (Al_2O_3): 10 % - 20 %

Jernoxid (Fe_2O_3): 3 % - 7 %

Kalciumkarbonat ($CaCO_3$): 0 % - 20 %

Dertil kommer egentlige lerminerale: kaolin, montmorillonit og illit.

2.1.1. Tegls æstetiske variationer

En stor del af murstens æstetik findes i materialets foranderlighed, der på trods af mange hundrede års erfaring stadig arter sig forskelligt fra brænding til brænding og fra sten til sten. Foranderligheden opstår da ler igennem dannelsesprocessen til tegl er under indflydelse af hvert stadie og lille detalje i processen.

Et eksempel på en æstetisk variation, der kan opnås i produktionen af tegl, er vandlæg. Der tillægges meget æstetisk værdi til synlige vandlæg i teglsten fra hånd- og blødstrygning, hvor der bevidst laves småfejl, for at opnå en større variation i materialets fremtrædelse. Et andet eksempel på at skabe æstetisk variation - og dermed højere æstetisk værdi - gennem småfejl er i arbejdet med brændingen af teglstenen. Her opnås nuanceforskelle i brændingen gennem stablinger af stenene, der giver dem brændingsmærker og sten med farver, der changerer i forskellige farvetoner.

I produktionen af tegl kan der også opstå et hav af utilsigtede egenskaber med mere eller mindre skadelige følger. Eksempler på dette er deformation, revnedannelse, udblomstring, brændings- og stablingsmærker. Hertil findes der også forekomsten af Lime-pop også kaldet Lime blow [14]. Fænomenet refererer til, når skorpen af teglsten springer grundet små korn af kalk og kan velsagtens oversættes til kalkskud. Kalkskud forekommer, når små depoter af brændt kalk (CaO) efter brænding læskes og udvider sig i en så voldsom grad, at teglmassen omkring sprænges. Fænomenet synes at være et kendt inden for teglproduktion, og forhindres ved forskellige tiltag, eks. ved glasering eller højere brændingstemperaturer. Dog anses kalkskud ikke for at være kritisk, hverken med hensyn til styrkeegenskaber eller udseendemæssigt, ikke mindst fordi de forekommer sjældent og i relativt små størrelser.

2.1.2. Tegls egenskaber

Tegl skal forstås som et keramisk materiale, der under fremstillingen gennemgår en række transformationer. For at forstå disse forandringer, deres målbarhed og indflydelse på slutproduktet redegøres der i følgende punkter, for de parametre, der er vigtige for udførelsen af indeværende studies eksperimentelle forsøg.

2.1.1.1 Svind

En ensartet lerblanding indeholder en vis andel vand, så materialet før formning har opnået god plasticitet. Plasticiteten er grundlæggende for formningen og for resten af teglets liv og egenskaber. Ved industriel produktion ses typisk at vandindholdet er 20-30 vægt-%. Dette vand skal dog fordampe, før lermassen kan brændes, hvilket foregår gradvist ved forskellige temperaturer over 2-3 døgn. Her styres luftens temperatur, fugtighed og hastighed, så det mest optimale tørringsforløb opnås. Tørringssvindet udgør en en dimentionsrudduktion på 2 - 4 % [15] 2 - 7 % [12].

Under brændingen svinder materialet yderligere, da man først kan regne med at det kemisk bundne vand er fordampet ved 500 °C. Ved 570 °C vil der ved opvarmning opstå en rumfangsforøgelse og sidenhen en proportionel formindskelse, hvilket omtales som kvarts spring [12]. Trods det muligvis er uden indflydelse på svindet har det stor betydning for revnedannelse eller deformation.

Ved 900 °C sintrer partiklerne i lermassen og danner nye mineraler, på bekostning af lerets oprindelige elementer — dansk teglbrænding foretages oftest mellem 950 og 1080 °C. Sintringen vil resultere i, at lermassen svinder yderligere 2,5 - 4 vol-% [15].

Et typisk dansk stykke tegl består således af 33 - 50 % amorf glas, med indlejret uomdannede korn af kvarts og små mængder nydannede mineraler [13].

2.1.1.2 Densitet

Ved densiteten af tegl forstås flere forskellige værdier, da teglets porer og eventuelle huller (i hulsten) skal tages i betragtning. Typisk skelnes der imellem teglets tørdensitet og densiteten af teglmassens faste bestanddel, også kaldet faststofdensitet.

Tørdensiteten karakteriserer en teglstens masse per volumen, hvor volumen er målt på overfladen af stenen, som det ses af formel 2.1.1. For hulsten, anvendes betegnelsen bruttodensitet, da dette er teglsten udformet med eksempelvis cylinderformede huller i midten. Brutto densiteten medtager endvidere disse huller i målingen af stenens volumen, hvilket resulterer i noget lavere densiteter. Hulsten er ikke noget, der er undersøgt eller anvendt i dette studie, og bruttodensiteten vil derfor ikke omtales yderligere. Tørdensiteten for tegl ligger almindeligvis mellem 1200 og 1800 kg/m³, hvor ikke-pudsede facadesten, som en mere specifik gruppe af tegl, ligger mellem 1600 og 1800 kg/m³.

$$Tordensitet : \rho_d = m_{105} / V \quad (2.1.1)$$

$$\text{Faststofdensitet : } \rho_f = m_{105} / (V - V_p) \quad (2.1.2)$$

Faststofdensiteten karakteriserer teglstenens masse pr. volumen, uden volumen af teglets porer, som det fremgår af formel 2.1.2. Dette kan altså ikke måles i hånden og findes ved forsøgsmæssig fremgang, som beskrevet i afsnit 3.3.2 *Porøsitet og densitet*. Faststofdensiteten angives til at befinde sig i intervallet mellem 2400 og 2800 kg/m³ [16].

2.1.1.3 Porøsitet

Teglsten er gennemhullet af små kanaler, på kryds og tværs, der alle står i forbindelse med overfladen ved at forplante sig igennem materialet. Dermed er der ingen lukkede porer i teglmassen, hvilket forventes at skyldes vandfordampning under både tørring og brænding [16]. Tegls porøsitet kan derfor antages at være lig materialets åbne porøsitet, p_o , der er defineret som volumet af de åbne porer, V_o , i forhold til den samlede volumen, V :

$$p_o = V_o / V \quad (2.1.3)$$

Porøsiteten kan imidlertid også beregnes med porøsitetsformlen, der udtrykker sammenhængen mellem et materiales porøsitet, p , faststofdensitet, ρ_f , og tørdensitet ρ_d :

$$p = 1 - \rho_d / \rho_f \quad (2.1.4)$$

På baggrund af densiteterne angivet i Tegl 10 [16] regnes porøsiteten for teglsten til at ligge i intervallet 25 - 45 %.

2.1.1.4 Porestørrelse

Når porøsiteten for et materiale omtales, omtales blot den samlede mængde af porer – oftest beskrevet ved volumen af porer – men ikke porernes størrelse eller størrelsesfordeling. To materialer med samme porøsitet, kan nemlig have vidt forskellig porestruktur og størrelse, der kan have afgørende indflydelse på materialets egenskaber, såsom vandabsorption (mængde og hastighed).

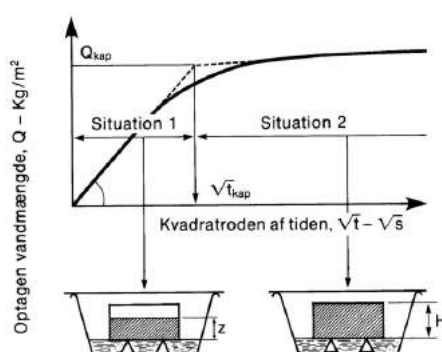
Størrelsesfordelingen af porer i et materiale er problematisk at kortlægge, og kan hverken karakteriseres ved et enkelt tal, eller et enkelt snit i materialet. Det skyldes, at porestrukturen er fuldstændig vilkårlig og typiske ændrer sig fra det ydre til det indre. Blandt anerkendte publiceringer hersker der ligeledes forskellige opgørelser af porestørrelsesfordelingen.

Fælles for udgivelserne er det, at porernes primære størrelsesfordeling placerer sig i intervallet $0,15 < r < 1,0 \mu\text{m}$, og har en relativ nedre grænse på $0,1 \mu\text{m}$ og øvre grænse på $5 \mu\text{m}$ [16] [17] [18].

2.1.1.5 Kapillarsugning

Når et tørt porøst materiale, som tegl, sættes i forbindelse med vand, vil materialet opfugtes grundet kapillarsugning. Ved kapillarsugning transporteres vand ind i materialet igennem små kanaler, kaldet kapillarer. Siden tegl udelukkende består af åbne porer, vil vandopsugningen foregå ved den såkaldte hårrørsvirkning, der er bevirket af små diametre, hvori overfladespændingen resulterer i en opadrettet kraft, der er afgørende for vandtransporten. Jo mindre porediameteren er, desto langsommere, men kraftigere er kapillarsugning [17].

Vandmætningen af materialet foregår ved aftagende hastighed, hvilket kan ses at den fuldt optrukne graf på figur 2.1.1.



Figur 2.1.1.: Teoretisk kapillarsugning i materialer, herunder tegl.

Den optagne vandmængde regnes i forhold til situation 1, som er den ideelle graf over den optagne vandmængde, Q , pr. areal, som funktion af $t_{1/2}$ indtil der ikke optages mere vand, Q_{kap} . Opsugningsmængden omtales også som vandabsorptionen og kan beregnes ved vægtforøgelsen over med opsugningsarealet, A_s .

$$Q_{kap} = m_t - m_0 / A_s \quad (2.1.5)$$

Minutsugning beregnes som den optagne vandmængde efter 1 minut, dvs. $Q_{t=1}$, jævnfør formel 2.1.5, og er et retningsgivende tal for, hvordan murstenen vil opføre sig under opmuring. En for lav minutsugning vil betyde, at stenen vil svømme i mørtlen og være svær at styre. Omvendt vil en for høj minutsugning udtørre mørtlen og ændre dens afgørende plasticitet, samt forhindre en fuldkommen hærdningsprocess. Minutsugningen for facadesten, med en densitet på 1800 kg/m^3 ligger typisk på $2,5 - 4 \text{ kg/m}^2$ og på $4 - 6 \text{ kg/m}^2$ for facadesten med en tordensitet på 1600 kg/m^3 [16].

Skæringspunktet mellem de stiplede linjer, set på figur 2.1.1 findes ud fra tangenter til den krumme kurve og fra koordinaterne til dette skæringspunkt fastlægges værdierne, Q_{kap} og $\sqrt{t_{kap}}$, hvorfra kapillaritetstallet kan udregnes:

$$k = Q_{kap} / \sqrt{t_{kap}} \quad (2.1.6)$$

Kapillaritetstallet, k , bestemmes som hædningskoefficienten på den første stiplede kurve og giver et direkte udtryk for sugeshastigheden i forhold til absorptionsmængden.

Både vandabsorptionen og kapillaritetstallet angives ifølge Dansk Standard, DS/EN 771-1 [19], som middelværdier for en produktionsenhed og angiver som sådan ikke en grænseværdi for egenskaberne. I vurderingen af projektets forsøgsresultater vil der derfor blive sammenlignet med grænseværdier af Amerikansk-International standard (ASTM Int.) [20]. Brugen af denne vil blive yderligere uddybet i følgende afsnit 2.1.2.6 Trykstyrke.

2.1.1.6 Trykstyrke

Trykstyrken er en grundlæggende egenskab for sprøde materialer som tegl, da det typisk er materialer der bruges i konstruktioner belastet af tryk. Tegls trykstyrke varierer med forskellige egenskaber og kan sjældent bedømmes ud fra udseende eller skøn, hvilket blandt andet skyldes brændingsgraden, lerets sammensætning, stenens densitet og produktionsmetoden. Dog er gulbrændte teglsten som regel stærkere end rødbrændte og maskinstrøgne (strengpressede) stærkere end håndstrøgne (blødstrøgne). Ved trykprøvning angives trykstyrken f_c som:

$$f_c = \frac{\text{tryklast inden brud}}{\text{tværsnitsarealet}} = \frac{F_c}{A_f} \quad (2.1.7)$$

Middelværdien for røde maskinstrøgne facadesten ligger på 40 N/mm², for gule maskinstrøgne facadesten på 60 N/mm², og for blødstrøgne mursten ligger middelværdien mellem 20 og 40 N/mm². Yderligere fremgår det af undersøgelser, udført af Kalk- og teglværkslaboratoriet på sten fra alle dele af landet i årene 1960 - 1965, at mindsteværdierne for trykstyrke var fordelt på følgende måde: gule maskin- og blødstrøgne ca. 15 MPa, røde maskinstrøgne ca. 29 MPa og røde blødstrøgne ca. 10 MPa [16].

I den danske teglproduktion arbejder man ikke med definerede grænseværdier for teglstenenes trykstyrke. Trykstyrken fastlægges i stedet i form af en middelværdi fra 10 prøver på tværs af afgrænsede produktionsenheder, og må ikke have en spredning der overskrider 80 % af trykstyrken. Den målte værdi skal ydermere normaliseres afhængigt af oparbejdelsen af teglprøverne og deres dimensioner, og deklarerer herefter af producenten. Af deklarationen kan det da forventes, at en produktionsenhed har en givet middelværdi og overholder en maksimal styrkereduktion på 20 %.

Af denne grund er det ikke muligt at gøre brug af en dansk standard i evalueringen af trykstyrken for dette studies laboratorieprøver. Derfor sammenlignes der med en amerikansk standard, som nogle af referencestudierne også benytter. Standarden er fastlagt af American Society for Testing and Materials (ASTM Int.) og baserer grænseværdierne for trykstyrke på graden af forvitring. Moderat forvitring 15,2 MPa og høj forvitring 17,2 MPa [20].

2.2. Glasuld

Glasuld udgør halvdelen af fællesbetegnelsen, mineraluld, der også omfatter stenuld. Mineraluld er et af de mest benyttede isoleringsmaterialer i nyere tid og dækker hovedparten af byggebranchens forbrug af isoleringsmateriale. Generelt består mineraluldsprodukter af vilkårligt rettede fibre typisk i form af måtter, plader eller granulat, der har til egenskab at være luftige, med lav densitet og høj isoleringsevne.

Glasuld består af glasfibre, der er fremstillet af smeltet sand, soda, kalk og glasskår, hvor genbrugsglas kan udgøre op til 75 %, som slynges gennem et fint net og genvinder fast form som fibre ved afkøling i luft. Fibrene holdes sammen, der hvor fibrene krydser hinanden, af bindemidlet bakelite, som består af hærdet phenol- og formaldehyd harpiks modificeret med organisk stivelses- eller inert polymer-bindemiddel. Ydermere er der tilsat mineralsk olie til støvbinding og fugtafvisning. Det estimeres, at binderne udgør ≤ 8 % af produkterne, hvoraf glasfibrene udgør de resterende 92 - 100 % [21].

I dette projekt er det ikke et direkte formål at undersøge isoleringsegenskaber for tegl med indblandet glasuld, hvorfor der ikke redegøres for glasulds isoleringsevne. Det gælder som hovedregel, at isoleringsevnen varierer meget alt efter produkttype og må forventes at være forringet efter det er blevet håndteret som affald.

Ud fra Isovers brugsanvisning for leverandører angives en række egenskaber for forskellige isoleringsprodukter med glasuld [21]. I det følgende præsenteres oplysninger fra et produktblad, der passer bedst på den glasuld, der er indsamlet til dette forsøg. Det gælder at glasuld har et smeltepunkt på 650 °C og bindemidlet dekomponerer i temperaturintervallet 150 - 250 °C. Ved opvarmning over 150 °C kan bindemidlet udvikle irriterende gasser - og god ventilation samt egnet personlig beskyttelse anbefales. Dog er materialet uden kendte skadelige miljøeffekter for mennesker, dyr, planter eller miljø ved almindeligt brug.

Glasuld er generelt kemisk inaktiv og uopløselig i vand, dog er fibrene bioopløselige. Fibrene har middeldiameter på 3 -5 μm , og materialet relative massefylde er 10 - 150 kg/m^3 . Glasuld anses for at være et anerkendt isoleringsmateriale, på baggrund af dets isoleringsmæssige egenskaber, formbarhed, robusthed og vægt. Dog har materialet ulemper, blandt andet ved lugt- og støvgener og irritation af huden.

På trods af at størstedelen af glasuldsprodukter delvist produceres af genbrugsglas, er der en voksende bevidsthed omkring miljø, og problemer med bortskaffelse. Glasuld genbruges kun i et meget begrænset omfang - kun ved direkte afskær - og resten deponeres.

3. Metode

I dette afsnit er den metodiske tilgang til den eksperimentelle del af projektet præsenteret. Fremgangsmåden er tredelt og vil tage udgangspunkt i *karakterisering af glasuld, forberedelse og bearbejdning af teglprøver og fysiske egenskaber af brændte teglprøver*. Et samlet overblik over den metodiske tilgang er præsenteret herunder.

- Karakterisering af glasuld
 - Mikroskopi
 - Glødetab
- Oparbejdning af teglprøver
 - Forberedelse
 - Optrevling af glasuld
 - Knusning af tørret teglværksler
 - Blanding og formning
 - Teglpiller
 - Teglkuber
 - Tørring og brænding
 - Teglpiller
 - Teglkuber
- Tekniske egenskaber af teglprøver
 - Svind
 - Densitet og porøsitet
 - Kapillarsugning
 - Trykstyrke

3.1. Karakterisering af glasuld

Karakteriseringen af glasuld er gjort for at identificere nogle af de grundlæggende egenskaber ved materialet, der kan have afgørende indflydelse på forsøgsresultaterne - og give en større forståelse for de opnåede resultater. Glasuld anvendt til forsøg i dette projekt er indsamlet som affald fra Borgervænget Genbrugsstation, Amager Ressource Center.

3.1.1. Mikroskopi

Glasfibrener dimensioner er blevet undersøgt med det formål at forstå størrelsen og sammenhængen af det materiale, der indblandes i teglværksleret. En mikroskopi er foretaget på enkelte glasfibre, separeret fra den resten af den indsamlede glasuld. Undersøgelsen er foretaget med instrument *FEI Quanta 200*, et såkaldt Scanning Electron Microscope (SEM), der fremkalder billeder af prøver ved at skanne overfladen med en koncentreret elektronstråle.

3.1.2. Glødetab

Glødetabet for glasuld er undersøgt for at forstå den transformation materialet gennemgår, når det brændes i teglværksleret. Glødetabet karakteriseres ved materialets vægtreduktion ved opvarmning til 550 °C. Reduktionen giver et godt estimat på indholdet af organisk stof i glasuld, da det vil fordampe eller forkulle ved denne temperatur. Ydermere er materialet målt undersøgt efter opvarmning til 950 °C, da det er i nærheden af de højeste temperaturer teglprøverne og tegl generelt når under brænding.

Tre keramiske bægere anbringes i en foropvarmet ovn på 550 °C i 30 minutter og efterfølgende afkølet i en desikator og vejjet. Herefter tilsættes ca. 1 g glasuld til hvert bæger, som afvejes i bægere. Bægerne med glasulds materialet placeres da i ovnen ved 550 °C i 60 minutter. Igen afkøles bægerne i en desikator og afvejes. Glødetabet beregnes dermed som angivet i formel 3.1.1.

$$\% \text{ Glødetab} = m_{20}^{\circ\text{C}} - m_{550}^{\circ\text{C}} \times 100 \% \quad (3.1.1)$$

Forsøget fortsættes, hvor bægerne med materialet indsættes i ovnen på 950 °C i 60 min. Efter afkølning afvejes prøver atter, og det totale glødetab kan beregnes vha. lignende udregning.

Det forventes dog ikke at glødetabet er markant anderledes, da de organiske stoffer allerede vil være fordampet ved 550 °C. Til gengæld forventes en forandring i materialets form, da glasuld har et angivet smeltepunkt på 650 °C.

3.2. Oparbejdning af teglprøver

I dette afsnit er forberedelsen og bearbejdningen af teglprøver beskrevet. Teglprøver er blevet lavet over to omgange, i forskellig skala; teglpiller og teglkuber. Leret brugt i denne forsøgsrække er gulbrændende teglværksler fra *Wienerberger A/S*.

Indledningsvist blev teglpiller oparbejdet med forskellige mængder glasuld, for at undersøge muligheden for indblanding og hvilke umiddelbare egenskaber de medførte. I teglpilleprøverne blev indblandet 0% - 2,5% - 5% - 7,5% - 10% - 12,5% - 15%.

Resultaterne fra pilleprøverne blev brugt som grundlag for hvilke blandingsprocenter, der skulle undersøges i større forsøgsskala, kubeprover. Disse teglprøver er større og kan bruges til at foretage undersøgelser, hvor piller prøvernes dimensioner ikke rækker. I kubeproverne blev indblandet 0% - 5% - 10% - 15% - og blev valgt på det grundlag, at alle de foretagne prøver af teglpiller hverken havde synligt forværret struktur og holdbarhed. Dog blev der ikke foretaget indblanding af glasuld over 15 %, da der ved denne mængde skulle et meget stort arbejde til at sammenblende materialerne.

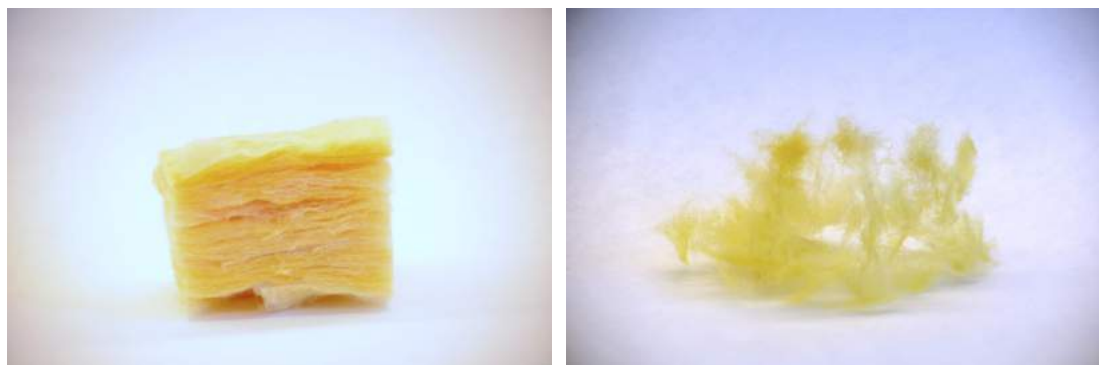
Begrænsningen af glasulds mængden synes at være grundet en kombination af glasulds store rumfang, grundet meget lav densitet, og stor overflade.

3.2.1. Forberedelse

Før teglprøverne blandedes, blev materialerne forberedt - disse metoder er beskrevet i følgende afsnit.

3.2.1.1 Optrævling af glasuld

For at opnå den mest ensartede teglmasse med indblandet glasuld er forskellige blandingsmetoder afprøvet. Den, der gav de bedste resultater, fungerede ved at løsrive mindre dele af glasulden, så en mindre kompakt fordeling af glasuld opnås. Glasuld har en tendens til at klumpe og blive kompakt, hvis der lægges en givet mængde pres på et område. På figur 3.2.1 ses eksempler på glasuld før og efter fibre er blevet løsnet.



Figur 3.2.1.: Glasuld før og efter det er blevet optrævlet

3.2.1.2 Knusning af teglværksler

Teglværksleret anvendt i dette projekt er tørret og knust til mindre størrelser. Det er dog nødvendigt at nedknuse leret i en sådan grad, at det igen kan blandes til en ensartet lermasse. Måden det gøres på er ved at anvende en ringknuser. Maskinen virker ved at anbringe en mængde groft knust ler i mellem maskinens udtagelige ringe, der efter 20 sekunders intens vibrering har pulveriseret de anbragte lerstykker.

3.2.2. Blanding og formning

Mængden af glasuld indblandet i teglværksler er beregnet i relation til den totale masse af tørret ler uden vand, da vandet forventes at fordampe fuldstændigt efter brænding. Blandingen og formning er som tidligere nævnt, foretaget over to omgange i forskellig skala - men fælles for pille- og kubepøverne er blandingsmetoden. Blandingsmetoden, der gav de mest homogene prøvesammensætninger, fungerede ved at blande pulveriseret ler, glasuld og vand, skiftevis. Således fordeles elementerne indledningsvist bedst og siden blev tilsat vand 1-2 gram ad gangen, indtil den søgte plasticitet var nået. Denne blandingsprocess er illustreret i *II. Appendiks - Blanding*. Jo større mængde glasuld i blandingen, desto sværere var det at sammenblende - og ved 15 % glasuld, skulle der bruges så store mængder af kræfter og tid, at der ikke blev foretaget prøvesammensætning af højere procentandel. Formning for hver prøvetype er beskrevet i de følgende afsnit.

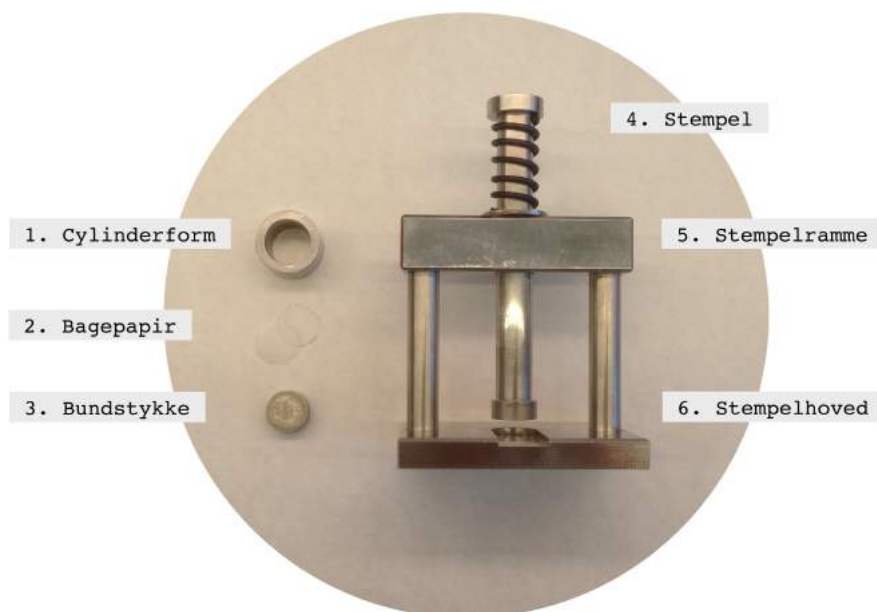
Formningen er udført efter tør-presnings metoden [22], som oftest anvendes på lertyper med lav plasticitet og på prøvetyper, hvor der ønskes under 10 % vand. Formningsmetoden er udført i to forskellige størrelsesordener, under forskellige tryk - hvilket primært er gjort for at holde vandindholdet i blandingen så lavt som muligt. Ved at minimere vandindholdet i teglprøverne, minimeres også svind og deformation af prøverne - der antageligvis har en stor indflydelse på resultaterne, deres størrelser taget i betragtning.

3.2.2.1 Pilleprøver

Der blev oparbejdet pilleprøver med andele af glasuld på 0% - 2,5% - 5% - 7,5% - 10% - 12,5% - 15%, hvor hver blandingsprocent bestod af 5 pilleprøver. For hver procentandel blev blandet 50 g teglværksler med den tilsvarende andel glasuld og vand til blandingen havde opnået den ønskede sammensætning. Af hver blanding blev afvejet pilleprøver af 2,3 - 2,5 g, som blev rullet til kugler og let undersøgt for klumper af glasuld. Hver afvejet prøve fik tildelt en identifikation og pakket under plastik, så fordampning undgås.

Sidenhen blev hver prøve presset med en pillepres, som ses i figur 3.2.2, der virker ved at pakke lerprøven i pilleformen omgivet af tilpasset bagepapir i top og bund. Pillepressen blev indsat i trykmaskinen, *Instron 6022*, og trykket med et maks tryk på 10 kN og en trykhastighed på 8 kN/min.

Efter hvert tryk blev den færdigpressede pille taget ud af pressen og målt. Der blev taget mål på højde og bredde over tre ledder og kanter for at finde pillens gennemsnitlige



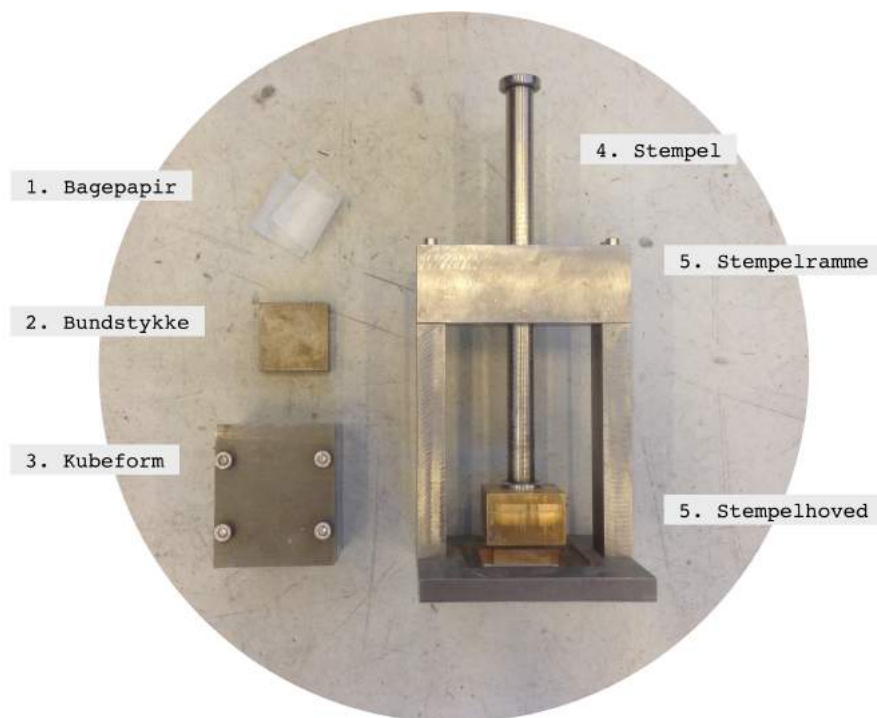
Figur 3.2.2.: Pillepresse og dens tilhørende specifikationer, til formning af pilleprøver

dimensioner. Herefter blev pillepressen rensed og processen gentaget. De pressede og opmålte piller blev igen hurtigt anbragt under plastik for at undgå fordampning af vandindholdet og vejret i laboratoriet. Pillernes afmålte dimensioner og vægt ligger omkring *diameter: 20 mm, højde: 3 mm, vægt: 2 g*.

3.2.2.2 Kubepøver

Kubepøverne blev på baggrund af resultaterne fra pillepøverne oparbejdet med andele af glasuld på 0% - 5% - 10% - 15%, hvor hver blandingsprocent bestod af 3 prøver. Her blev 900 g teglværksler blandet med den tilsvarende andel glasuld og vand til blandingen havde opnået den ønskede sammensætning. Til hver kubepøve blev afvejet 310 g, da det forventedes, at vægten før presset ville falde med 3% - og dermed ville lande på en resulterende vægt af 300 g. Igen fik hver prøve tildelt en identifikation og blev pakket for at undgå fordampning.

Hver prøve blev presset i kubepressen, som kan ses på figur 3.2.3, der virker ved at pakke lerprøven i kubeformen omgivet af tilpasset bagepapir i top og bund. Kubepressen blev indsat i trykmaskinen, *Instron 6022*, og trykket med et maksimalt tryk på 4 kN og en trykhastighed på 8 kN/min. Efter hvert tryk blev den færdigpressede kube taget ud af pressen og målt. Der blev taget mål på højde, bredde og længde over fire leder, for at finde kubens gennemsnitlige dimensioner. Herefter blev kubepressen rensed og processen gentaget. De pressede og opmålte kuber blev igen hurtigt anbragt under plastik for at undgå fordampning af vandindholdet og vejret i laboratoriet. Kubernes afmålte dimensioner og vægt ligger omkring *bredde: 50 mm, længde: 50 mm, højde: 50 mm, vægt: 300 g*.



Figur 3.2.3.: Kubepresse og dens tilhørende specifikationer, til formning af kubeprover

3.2.3. Tørring og brænding

Tørring- og brændingstider afviger i dette projekt fra producenternes industrielle produktionsanlæg. Dette gør de bevidst, da de igennem tidligere laboratorieforsøg er afprøvet og fremgangsmåder er blevet fastlagt for tørring- og brændingsforløb for de forskellige prøvetyper. Disse metoder er delvist hentet fra tidligere publicerede projekter og baseret på laboranternes vejledning.

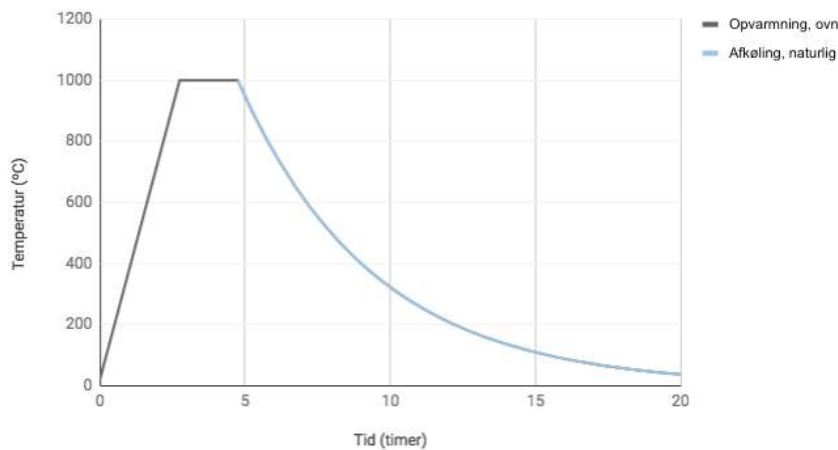
Prøver af begge størrelser, er blevet tørret af flere omgange jævnfør DS/EN 772-1, der foreskriver at prøverne tørres ved 105 ± 5 °C i mindst 24 timer før der udføres forsøg [23].

3.2.3.1 Pilleprøver

Pilleprøver blev efter formningen tørret ved 105 °C i omtrent 20 timer, hvorefter prøverne atter blev målt og vejjet.

Pillerne blev dernæst brændt i højtemperatur ovnen, *Nabertherm HFL 16/17*, i et programmeret brændingsforløb, der har en total brændingstid på ca. 5 timer. Brændingsprogrammet forløber ved 360 °C/time indtil 1000 °C er nået, hvor temperaturen forbliver konstant på 1000 °C i 2 timer. Herefter slukkes ovnen og nedkøler lukket og naturligt over de følgende timer.

Brændingsforløbet er illustreret på figur 3.2.4, hvor afkølingen er baseret på baggrund af eksponentielt aftagende kurve.



Figur 3.2.4.: Brændingsprogram for samtlige teglprøver, i programérbar Nabertherm ovn.

3.2.3.2 Kubeprøver

Tre kubeprøver blev først forsøgt tørret ved 105 °C i 2 døgn, dette resulterede dog i utilsigtede revner og sprækker, og prøverne blev kasseret. En alternativ tørringsmetode blev derfor taget i brug, baseret på et tidligere studie i forbedring af asker, som tilsætning i teglsten [24]. Tørringen forløber over tre trin og er i dette projekt tilpasset en smule; 40 °C i 20 timer - 105 °C i 20 timer - 200 °C i 20 timer. Kubeprøverne blev brændt på samme måde, som pilleprøverne beskrevet ovenfor. Brændingsprogrammet er brugt igennem hele projektet for at få sammenlignelige resultater, da programmet har indflydelse på brændingsgraden, som er styrende for teglets egenskaber.

3.3. Tekniske egenskaber af teglprøver

Til undersøgelse af teglprøvernes tekniske egenskaber er der gjort brug af forsøgsvejledninger fremlagt af DTU Byg. Forsøgsvejledningerne er baseret på Dansk Standard DS/EN 772-1 *Metoder til prøvning af byggesten til murværk* [23], der følger den angivne metode såfremt det er muligt, da der afviges i prøvernes størrelse og udformning. Der hvor forsøgsmetoden afviger fra Dansk Standard, er der foretaget modificeringer, så den passer til de oparbejdede teglprøver.

Følgende forsøg er blevet udført på teglprøverne, og vil blive uddybet i afsnittene herunder.

- Svind
- Porøsitet og densitet
- Kapillarsugning
- Trykstyrke

Samtlige forsøg blev udført på kubepøverne, hvor blot svind, porøsitet og densitet blev udført på pilleprøverne.

3.3.1. Svind

Svind forekommer, idet vand og væske fordamper fra lermassen, lige fra lermassen er blandet og formet. Dog opleves det tydeligste svind, når leret bliver brændt og leret per definition går fra at være ler til at blive tegl - det er typisk denne rumfangs- og vægt reducereing der forstås ved svind. Svindet sker under brændingen, når temperaturen er over 900 °C, hvor lerpartiklerne sammensmelter (sintrer).

Prøverne er målt og vejlet efter formning, tørring og brænding med et skydelære med en nøjagtighed på 0,01 mm. Pilleprøverne er målt i tre punkter over *diameter og højde*, og kuberne er målt i fire punkter over *højde, bredde og længde*. Svindet beregnes ved prøvernes procentvise dimensionsforskel, vol-%, fra et stadie til et andet.

$$vol\% = 1/3 \times (V_{efter} - V_{for}) / V_{for} \times 100 \quad (3.3.1)$$

Da standardværdierne for svind er baseret på den procentvise forskel i én dimension, skal svindet findes som en tredjedel af den procentvise volumenforskel.

3.3.2. Porøsitet og densitet

Porøsitet- og densiteten er undersøgt med henblik på om disse værdier er påvirket ved indblanding af glasuld.

Forsøget foregår ved at placere teglprøverne i vakuum i minimum tre timer i en desikator.

Efter tre timer er trykket i desikatoren omkring 8 mbar og vakuumsuget udskiftes med en slange i forbindelse med kogt og destilleret vand, ved stuetemperatur. Vandet suges ind i desikatoren, indtil vandet dækker teglprøverne med minimum 30 mm, og efterlades under vakuum i en time. Herefter udlignes trykket i desikatoren ved at åbne ventilen og forsøget står med vand og prøver over natten.

Næste dag tages de vandmættede teglprøver ud af desikatoren og vejes først under vand, m_{sw} , derefter afdupes prøven og vejes over vand, m_{ssd} .

Den åbne porøsitet, P_o , og tørdensiteten, ρ_d beregnes jævnfør formlerne beskrevet i afsnit 2.1.1.3 *Porøsitet*.

3.3.3. Kapillarsugning

Teglprøvernes kapillarsugning undersøges for at fastlægge mængden og hastigheden af vand materialet absorberer. Med forsøgsresultaterne kan der beregnes værdier for, hvor meget vand prøverne opsuger, kapillarsugning - et indeks for opsugningshastighed og -mængde, kapillaritetstallet - og minutsugingen, der angiver det opsugede vand efter 1 minut.

Forsøget udføres ved at veje prøverne efter komplet tørring ved 105 °C. Derefter opstilles et kar med vand og metalstænger, hvorpå prøverne skal stå. Når prøverne er placeret på stængerne skal vandet være godt 5 mm oppe af siderne på prøverne. Sådant skal de stå og opsuge vandet og vejes efter 1 - 2 - 4 - 8 - 16 - 32 - 60 - 120 - 240 - 360 minutter. Prøverne skal vejes minimum 1/2 minut efter de er taget op af vandet og afdupes før vejning på en opvredet klud.

Målingerne nedskrives ved afvejning og tidspunktet for målingerne overholdes ved brug af stopure.

Ud fra målingerne kan en graf svarende til figur 2.1.1 anvist i afsnit 2.1.1.5 *Kapillarsugning* optegnes og de ønskede værdier beregnet ud fra formlerne 2.1.5 og 2.1.6.

3.3.4. Trykstyrke

Trykstyrken er undersøgt for teglprøverne, da denne egenskab har en afgørende indflydelse på brugbarheden af glasuld i teglproduktion.

Ifølge Dansk Standard, DS/EN 772-1, undersøges murstens trykstyrke ved at måle på trykstyrken af en teglkube med dimensionerne 10x10x10 cm. Ved brug af andre dimensioner end disse anvendes brugen af en faktor der ganges på resultatet. [23]

Hver teglprøve er blevet udsat for tryk i instrument *Instron 100 kN*. Instrumentet er programmeret til at trykke med 5 kN/min, jævnfør DS/EN 772-1, og at afslutte trykket efter en flytning på 5 mm fra trykkets start. Resultaterne logges som data efter hvert løbende sekund med en maksimal trykforøgelse på 0,1 N/sek.

4. Resultater

I dette afsnit præsenteres resultaterne af de udførte forsøg. Resultaterne er opdelt i afsnit som vist nedenfor og har til formål at besvare projektets problemformulering gennem de tre eksperimentelle forsøgstrin: 1) undersøgelse af glasfibre fra glasuld og dets egenskaber, 2) vurdering af de umiddelbare egenskaber ved teglpilleprøver med glasuld og 3) analyse af teglkubeprøver, hvor svind, densitet, porøsitet, kapillaritet og trykstyrke undersøges. Resultaterne præsenteres i følgende tre afsnit:

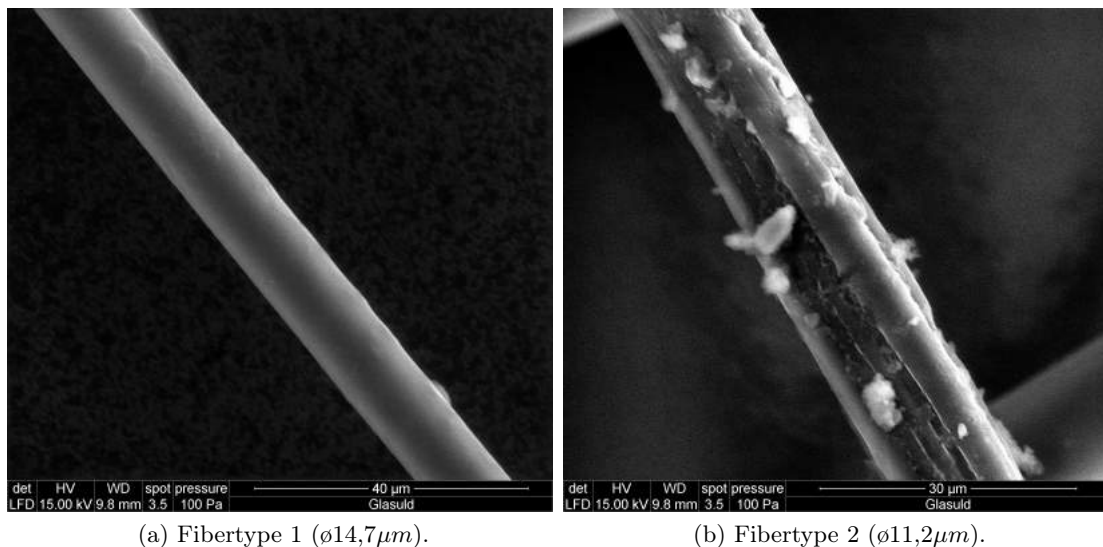
- Trin 1: Karakterisering af glasuld
 - Mikroskopi
 - Glødetab
- Trin 2: Teglpiller
 - Svind
 - Densitet og porøsitet
- Trin 3: Teglkuber
 - Synlig vurdering
 - Svind
 - Densitet og porøsitet
 - Kapillarsugning
 - Trykstyrke

4.1. Glasuld

Resultaterne af undersøgelsen af glasuldsfibre og glasulds egenskaber præsenteres i det følgende under to overskrifter: *Mikroskopi* og *Glødetab*.

4.1.1. Mikroskopi

Af mikroskopien fremgår det, at der forekommer to synligt forskellige fibre, som ses på Figur III.2. En type fremstår cylinderformet med en glat og ensartet overflade. En anden type fremstår med en ru overflade, formet af, hvad der synes at være flere mindre sammensmeltede glasfibre. De små korn på fiberen forventes at være dele eller rester af bindemiddel. Begge fibre er fra samme prøve - og forventes at være typisk at finde flere fiberudformninger i samme prøve.



Figur 4.1.1.: Billeder fra mikroskop *FEI Quanta 200*, af to typer glasfibre, tilfældigt udtaget fra samme glasuldsprøve.

Der synes ikke at være direkte tendens mellem fibertypen og den geometriske diameter, som er observeret i intervallet mellem 11 - 16,5 μm . Da der blot er undersøgt få fibre, synes der ikke at kunne drages nogen konklusioner om mængdefordelingen af fibertyperne - eller om der kan forekomme fibre af anden udformning.

Endvidere forventes det ikke at have særlig indflydelse på materialets opførsel i teglproduktionen. Dog afviger fiberviddens en smule fra det angivne i Iovers leverandørbrugsanvisning (3 - 5 μm) [21].

4.1.2. Glødetab

Af forsøgsresultatet ved opvarmning af glasuld, anført i tabel 4.1.1, ses at størstedelen af glødetabet sker efter opvarmning til 550 °C (6,5 %). Herefter reduceres vægten blot med 0,9 % ved opvarmning til 950 °C. Resultatet påviser at glasuldet indeholder ca. 6,5 % organisk materiale - hvilket stemmer overens med det angivne indhold af bindemiddel.

Tabel 4.1.1.: Resultat for glasulds glødetab, ved opvarmning til hhv. 550 °C og 950 °C

	Glødetab 550 °C	Glødetab 950 °C
vægt-%	6,50 ± 0,35	6,59 ± 0,34

Ved teglbrænding nås temperaturer på ≥ 950 °C og derfor kan det forventes at glasuld vil have et glødetab på ca. 6,5 %

Efter opvarmning til 550 °C, forekommer en synlig ændring i farven, der er gået fra at være gul til at være hvid, mens formen umiddelbart er uændret. Efter opvarmning til 950 °C smelter glasulden og tager form af en smeltetmasse i bunden af bægeret. De synlige ændringer af glasuldet kan ses på figur 4.1.2.



Figur 4.1.2.: Glasuld i tre forskellige stadier, fra venstre; 1) uopvarmet 2) opvarmet til 550 °C, 3) opvarmet til 950 °C.

4.2. Teglpiller

Resultaterne af forsøgene med teglpilleprøver med glasuld præsenteres i det følgende under overskrifterne: *svind*, *porøsitet* og *densitet*.



Figur 4.2.1.: Teglpilleproduktionens stadier; blanding, formning og brænding.

4.2.1. Svind

Svindet præsenteret i resultaterne skal forstås sådan, at et positivt svind svarer til en reducere af prøvens dimensioner.

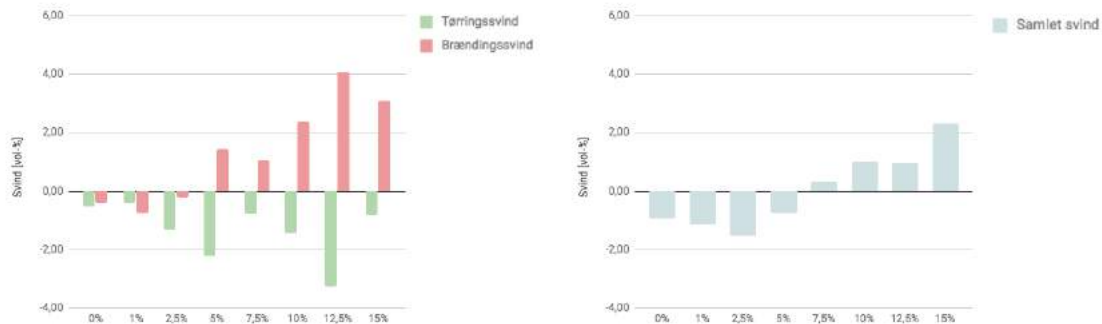
Tabel 4.2.1.: Resultater for svind og afvigelser, for teglpiller.

	0%	1%	2,5%	5%	7,5%	10%	12,5%	15%
Tørringssvind (vol-%)	-0,52	-0,41	-1,33	-2,22	-0,78	-1,42	-3,27	-0,79
Brændingssvind (vol-%)	-0,41	-0,74	-0,20	1,44	1,07	2,37	4,09	3,08
Samlet svind (vol-%)	-0,93	-1,15	-1,54	-0,75	0,30	0,98	0,96	2,31
Std. afvigelse	2,59	5,12	4,65	1,81	1,96	2,29	2,17	4,78

Af tabel 4.2.1 fremgår resultaterne af svindet for teglpillerne. Teglpillernes rumlige størrelse synes at variere meget fra prøve til prøve, hvilket kan ses af standardafvigelserne, der kan vurderes til at være så store, at resultaterne er uanvendelige. Endog ses der tendenser for tørringssvind og brændingssvind, som også vil gøre sig gældende senere i resultatanalysen. Disse tendenser er beskrevet herunder.

Figur 4.2.2 illustrerer en graf for tørring- og brændingssvindet, hvoraf der ses en tendens til, at tørringssvindet falder med indholdet af glasuld. Faktisk ses det, at prøvernes dimensioner vokser med øget indhold af glasuld. Resultatet ventes at være grundet fibrenes egenskab til at holde deres form og modarbejde det tryk pillerne blev formet ved. Ved brænding kan det omvendt ses, at svindet gradvist vokser med indholdet af glasuld. Dette forventes, at skyldes glasfibrenes bidrag til sintringen og glødetabet fra de organiske bindere.

Der kan altså observeres ganske store udsving, positivt og negativt, i svindet for teglpiller med øget indhold af glasuld. Dette skyldes højst sandsynligt glasfibreens aktive påvirkning. Samlet set øges svindet for teglpillerne med indholdet af glasuld, hvilket kan ses af figur 4.2.2.



Figur 4.2.2.: Forsøgsresultater for teglpillers tørrings- og brændingssvind (venstre) og samlet svind (højre).

4.2.2. Porøsitet og densitet

Tabel 4.2.2.: Resultater for teglpillers porøsitet og densitet med afvigelser.

	0%	1%	2,5%	5%	7,5%	10%	12,5%	15%
Åben porøsitet (vol-%)	29,7	28,0	28,3	25,9	25,1	23,8	23,4	22,61
Std. afvigelse	0,3	1,5	0,6	1,0	1,3	0,9	0,7	0,55
Kasse densitet (kg/m ³)	1834	1842	1849	1860	1865	1884	1893	1889
Std. afvigelse	2	21	12	15	15	13	12	9
Faststof densitet (kg/m ³)	2608	2558	2579	2509	2490	2473	2471	2441
Std. afvigelse	14	24	21	16	26	13	24	8

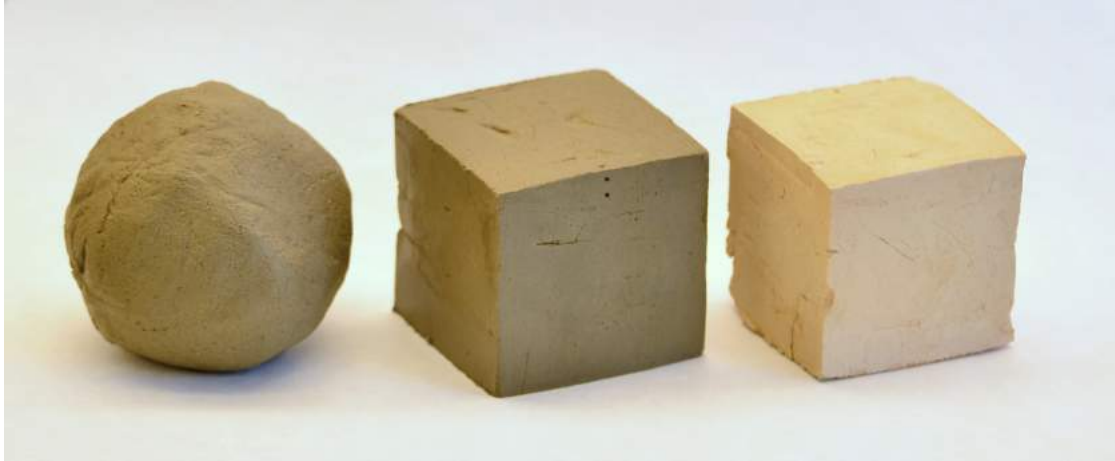
Resultaterne for porøsiteten er anført i tabel 4.2.2 hvoraf det fremgår, at porøsiteten er lavere desto højere andelen af glasuld er. Den støt faldende porøsitet, når sit lavpunkt på 22,61 % i prøven med 15 % glasuld. Dette synes imidlertid at være modsat det forventede, da der typisk ses øgede værdier for porøsitet ved indblanding af 'brændbare' fibre. Dog følger tørdensiteten, porøsiteten med omvendt fortegn. Det vil sige, at når porøsiteten falder stiger tørdensiteten, hvilket også er tilfældet ved øget mængde af glasuld. Ydermere ses det, at faststoffdensiteten falder desto større mængden af glasuld er.

Forsøgene med indblanding af glasuld op til 15 % synes hverken at skabe problemer ved fremstilling eller bearbejdning af prøverne, ud fra et eksperimentelt perspektiv. Dog var indblandingen af 15 % glasuld så udfordrende, at det blev besluttet ikke at øge andelen i videre forsøg.

På trods af nogle usikre resultater med hensyn til svind, ligger de fundne forsøgsresultater inden for rimelighedens rammer.

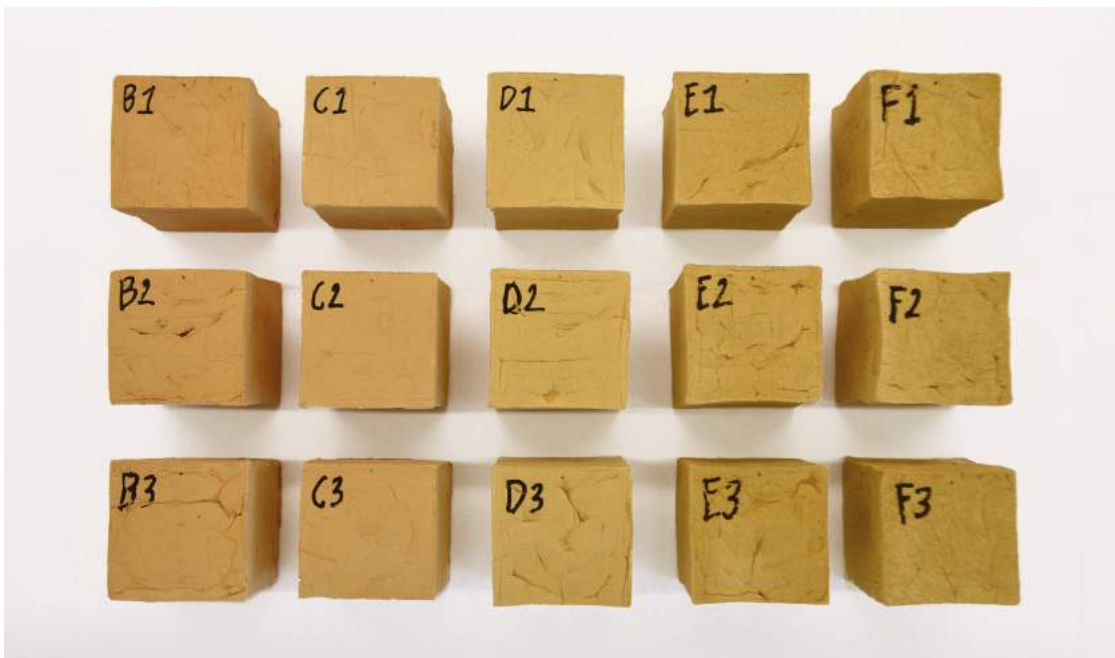
4.3. Teglkuber

Resultaterne af forsøgene med teglkuber præsenteres i det følgende underoverskrifterne: *Synlig vurdering, svind, porøsitet og densitet, kapillaritet og trykstyrke.*



Figur 4.3.1.: Teglkuber i produktionstadier; blanding, formning og brænding.

4.4. Synlig vurdering



Figur 4.4.1.: Overblik over producerede teglkuber, hvor B og C er kontrolprøver (0 %) og yderligere indblandingsmængder er angivet D (5 %), E (10 %), F (15 %).

Arbejdet med formning, tørring og brænding har givet en håndgribelig forståelse for materialet tegl.

Der kan ikke være nogen tvivl om, at lerblandingsens plasticitet varierer og ændrer sig ved indblanding af glasuld. Generelt skal der gradvist bruges mere vand ved tilsætning af glasuld, for at få sammenblandet materialet til en ensartet masse. Ligeledes skal der gradvist bruges flere og flere kræfter, såvel hånd- som maskinkraft, til at fordele leret mellem fibre og omvendt.

Ved yderligere æltning af lermasserne, føles det tydeligt, at formbarheden øges med glasuld. Blandingerne med 10 % og 15 % føles meget livlige og mere plastiske i håndteringen og formgivningen af det, men synes lige så faste, som de uberørte kontrolprøver.

Efter brændingen forekommer en tydelig ændring i prøvernes form og som bliver gradvist tydeligere som andelen af glasuld øgedes. Formændringerne kan beskrives som asymmetriske deformationer, hvor hjørner og midte ikke synes at have deformeret ligeligt. Det får prøverne til at se ud som om, de har været udsat for vrid eller skæve tryk. Dette kan bl.a. ses i *III. Appendiks - Tørring og brænding*.

Ses der nærmere på prøvernes overflade, kan det konstateres, at prøverne gradvist går fra at være meget fine i strukturen til at være grovere. Ved kontrolprøverne synes porerne i overfladen ikke at være synlige for det bare øje, hvorimod de synes tydeligere, jo højere andelen af glasuld er.

På afstand synes der at ske en relativ markant farveændring fra kontrolprøven til prøven med 15 % glasuld. Kontrol prøverne B og C kan karakteriseres som gul med rosa, hvor prøverne D, E, F gradvist bliver mere karrygule med et tiltagende grønligt skær, bogstaverne refererer til prøvens indhold af glasuld og kan ses på figur 4.4.1. Grunden hertil formodes, at skyldes påvirkning fra glasuldens farve og bindemidler.

Efter prøverne er blevet komplet vandmættet i forbindelse med måling af porøsitet og densitet forekommer der i nogen grad tilfælde af kalkskud, som omtalt i det teoretiske afsnit Materialer. Da kalkskuddene ikke varierer i størrelse, kan disse være særligt afgørende for prøverne set relativt i forhold til deres størrelse, dvs. jo mindre masse des større indflydelse har et potentielt kalkskud. Det gør sig også gældende i forsøgene med teglpillerne, hvor det ses, at kalkskudene resulterer direkte i kasserede prøver og forsøgsresultater.

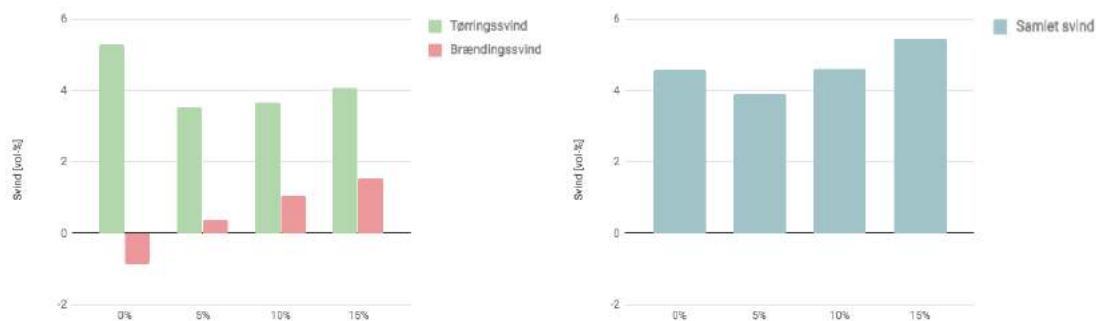
4.4.1. Svind

Af tabel 4.4.1 ses forsøgsresultaterne for svindet af teglkuberne, der er baseret på tre prøver for hver procentsats af glasuld.

Tabel 4.4.1.: Resultater for svind og afvigelser, for kubeprøver.

	0%	5%	10%	15%
Tørringssvind (vol-%)	5,29	3,54	3,66	4,08
Std. afvigelse	0,47	0,05	0,17	0,53
Brændingssvind (vol-%)	-0,86	0,40	1,05	1,55
Std. afvigelse	0,77	0,07	0,16	0,32
Samlet svind (vol-%)	4,57	3,90	4,60	5,44
Std. afvigelse	0,69	0,12	0,16	0,77

Det rumlige tørringssvind reduceres umiddelbart ved tilsætning af glasuld, dog er effekten størst ved 5 % glasuld. Dette tyder på, at glasfibrene har en indvirkning på tørringsprocessen, der formår at fastholde formen på lermassen grundet fibrenes evne til at modvirke en naturlig sammentrækning af materialer ved tørring. Under brændingsprocessen ses det, at brændingssvindet øges proportionalt med andelen af glasuld, hvilket også fremgår af figur 4.4.2. Det øgede brændingssvind forventes ligesom ved pilleprøverne, at skyldes glasuldets bidrag til sitring og forbrænding af glasuldets organiske dele.



Figur 4.4.2.: Forsøgsresultater for kubeprovers tørrings- og brændingssvind (venstre) og samlet svind (højre).

I det samlede svind ses et umiddelbart fald ved 5 % glasuld, hvilket kan tyde på at være den ideelle blandingsmængde for at reducere svind. Det kan begrundes med, at det både er prøven med laveste tørringssvind og et rimeligt brændingssvind.

Grunden til svindforøgelsen fra 5 - 15 %, kan ligge i en øget vandmængde i blandingerne, når der er en øget mængde glasuld. Den ekstra mængde vand, der blev tilsat for at opnå ensartede blandingsmasser, har formentlig resulteret i et øget svind og påvirket forsøgsresultaterne.

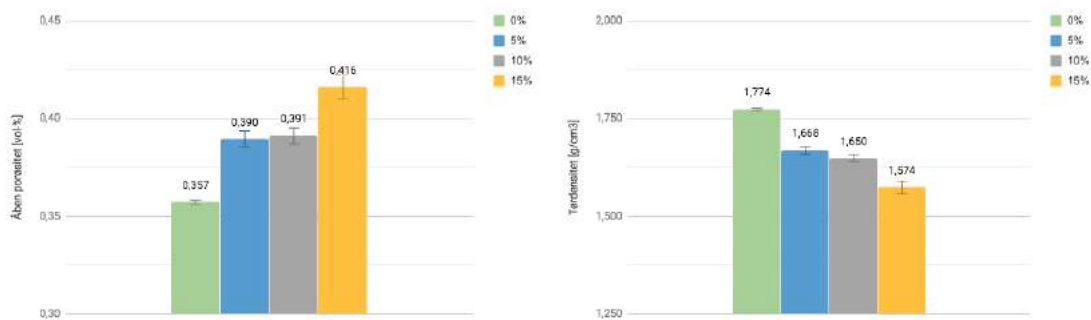
4.4.2. Porøsitet og densitet

Af tabel 4.4.2 fremgår det, at porøsiteten stiger med andelen af glasuld, således er tørdensiteten falder tilsvarende. Sammenhængen mellem de to værdier ses tydeligt på følgende figur 4.4.3, der angiver den åbne porøsitet og tørdensiteten.

Tabel 4.4.2.: Forsøgsresultater teglkubers for porøsitet, tørdensitet og faststofdensitet.

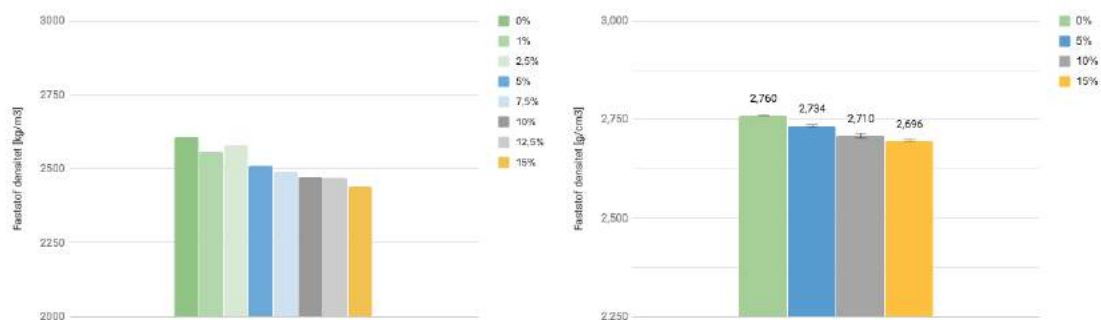
	0%	5%	10%	15%
Åben porøsitet (vol-%)	35,7	39,0	39,1	41,6
Std. afvigelse	0,1	0,4	0,4	0,6
Tørdensitet (kg/m ³)	1774	1669	1650	1574
Std. afvigelse	4	10	8	16
Faststof densitet (kg/m ³)	2760	2734	2710	2696
Std. afvigelse	1	3	6	3

At porøsiteten stiger fortæller noget om glasfibreneres poredannende effekt på teglet - men også at en øget mængde af fibre ikke nødvendigvis resulterer i øget porøsitet. Det ses altså at porøsiteten stiger pludseligt ved brug af glasuld, men at der opnås en mere moderat stigning herefter.



Figur 4.4.3.: Sammenligning mellem teglkubers porøsitet (venstre) og tørdensitet (højre).

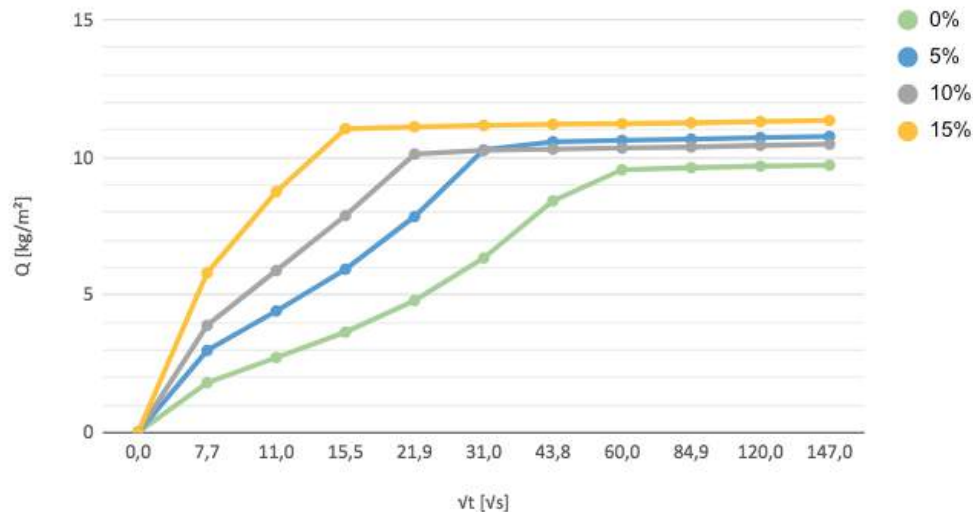
Faststofdensiteten, der ligeledes er aftagende i pilleprøverne, tyder på, at glasuld ændrer sammensætningen af grundmateriale i den faste teglmasse. Det kan blandt andet forklares ud fra en antagelse om, at glasmassen fra glasuldsfibre har en lavere densitet end lermaterialerne, og derfor reducerer densiteten. Som det ses af figur 4.4.4, er der et spring i størrelsen af densitet, men den aftagende tendens ved øget indhold af glasuld er i overensstemmelse.



Figur 4.4.4.: Sammenligning mellem faststofdensitet for teglpiller (venstre) og teglkuber (højre).

4.4.3. Kapillarsugning

Resultaterne for vandabsorption, kapillaritetstal og minutsugning er fundet i henhold til forsøgs- beskrivelsen i afsnit 3.3.3 *Kapillarsugning* og præsenteres her i form af tabel 4.4.3, figur 4.4.5 samt figur 4.4.6.



Figur 4.4.5.: Graf over kapillarsugningen for teglkuber.

Af forsøgsresultaterne afbilledet på figur 4.4.5 ses en øget vandabsorption ved en øget andel af glasuld. Grafen er tegnet på baggrund af kapillarsugning af tre prøver pr. blandingstype, hvor gennemsnittet af prøverne svarer til de afbildede kurver.

Af grafen fremgår det, at et øget indhold af glasuld øger absorptionshastigheden, som kan aflæses ved de stejle hældninger i starten af kurverne. Ligeledes ses en øget absorptionsmængde, som kan aflæses der, hvor kurverne er tilnærmelsesvist vandrette. Resultaterne bekræfter forventningen om, at der vil ske en hurtigere absorption af vand, og at mængden samlet set vil være større ved tilsætning af glasuld - en forventning, der baserer sig på resultaterne fra porøsitet og densitet. Dog er der en undtagelse af prøverne med 10 % glasuld, der på trods af at optage vandet hurtigere samlet set optager mindre vand end i prøven på 5 %.

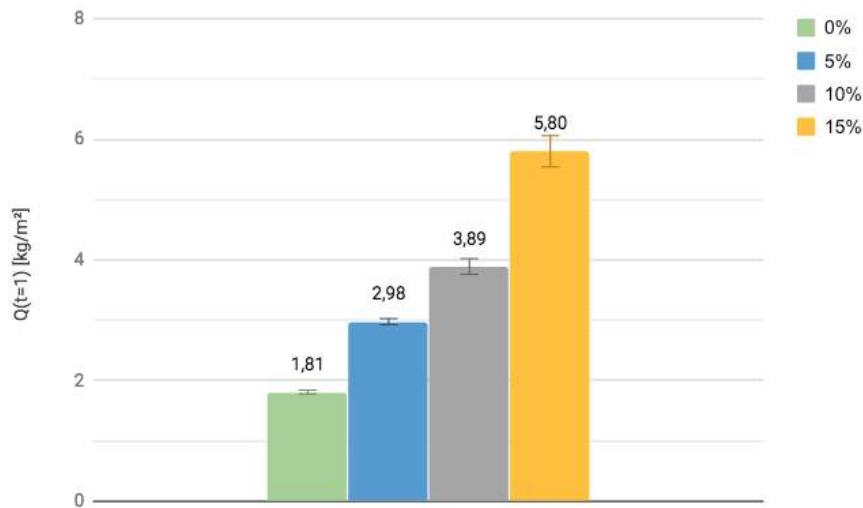
Det skal også bemærkes, at forholdet mellem forskellen på opsugningshastigheden og den samlede opsugningsmængde mellem prøven på 0 % og 15 %, ikke er proportionel. Det ses, da der er stor forskel på hastigheden, men relativt lille forskel på den samlede opsugningsmængde.

Kapillaritetstallet, k , er beregnet ud fra graferne angivet i *V. Appendiks - Forsøgsresultater* og er anført i tabel 4.4.3. I, Appendikset er også anført billeder fra forsøget, hvor opsugningen kan ses direkte på prøverne. Resultatet viser et stødt stigende kapillaritetstal ved øget brug af glasuld og som er et udtryk for en øget opsugningshastighed.

Tabel 4.4.3.: Kapillaritetstal, k , beregnet på baggrund af aflæste værdier, Q_{kap} og $\sqrt{t_{kap}}$.

		0%	5%	10%	15%
Q_{kap}	[kg/m ²]	9,5	10,5	10	11
$\sqrt{t_{kap}}$	[√s]	60	32	20	15
k	[-]	0,16	0,33	0,50	0,73

Minutsugningen er illustreret på figur 4.4.6 og viser ligeledes en stødt stigende kapillarsugning efter 1 minut. Det der skal bides mærke i her, er den relativt store forøgelse: prøven med 15 % har opsuget mere end 3 gange så meget vand efter det ene minut.



Figur 4.4.6.: Diagram der viser den stigende minutsugning, ved øgede mængder glasuld.

Ud fra resultaterne om porøsiteten, forventes øgede pore-radier, ved øget tilsætning af glasuld, hvilket kunne have påvirket prøverne til at optage vand hurtigere, men en mindre mængde sæt der ikke var flere mindre porer. Dette synes dog kun delvist at være en observeret tendens, da både absorptionshastigheden og -mængden er tiltagende.

Det kan skyldes en øget andel af porer med større pore-radier, der hurtigt fyldes med vand, men ikke har som egenskab at suge, kombineret med en del mindre porer, der fortsat vil opsuge vand, både fra de store porer, som igen fyldes og direkte fra overfladen i kontakt med vandet. Dette vil dermed resultere i øget hastighed og mængde.

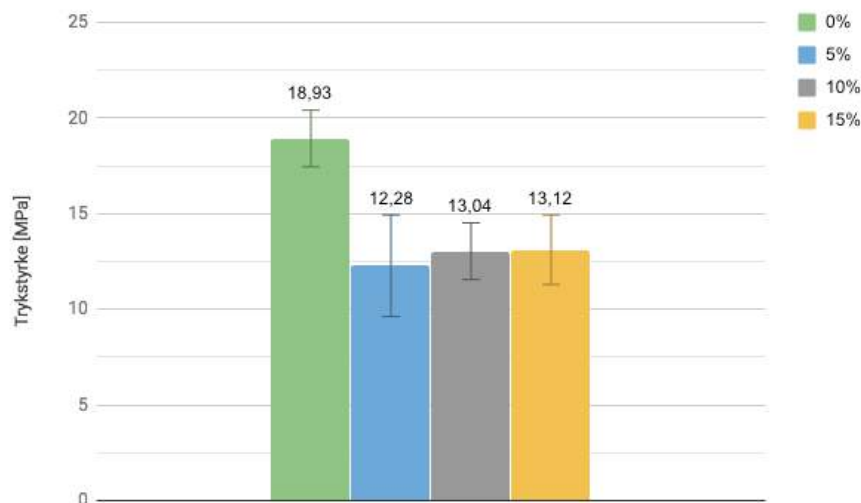
4.4.4. Trykstyrke

Teglprøvernes trykstyrke er undersøgt jævnt før metoden beskrevet i afsnit 3.3.4 *Trykstyrke*, der tager udgangspunkt i Dansk Standard, DS/EN 772-1. I denne forsøgsrække er der foretaget trykprøvning på tre prøver for hver procentsats tilsat glasuld.

Resultaterne for hver enkelt prøve kan findes i *V. Appendiks - Forsøgsdata*, hvor trykkraften er optegnet som graf over flytningen. Af graferne fremgår det, hvor teglprøverne slår sprækker og helt konkret har deres brudstyrke. Disse punkter er markeret og angiver dermed den egentlige brudstyrke for den givne prøve.

Figur 4.4.7 illustrerer trykstyrken, f_c , for kubepøverne, hvor det ses, at trykstyrken falder dramatisk ved tilsætning af glasuld. Dog ses der hverken entydigt styrkeforøgelse eller -reducering af teglprøver med glasuld fra 5 - 15 %.

Ved tilsætning af glasuld sker der altså umiddelbart et styrkemæssigt fald på ca. 35 %.



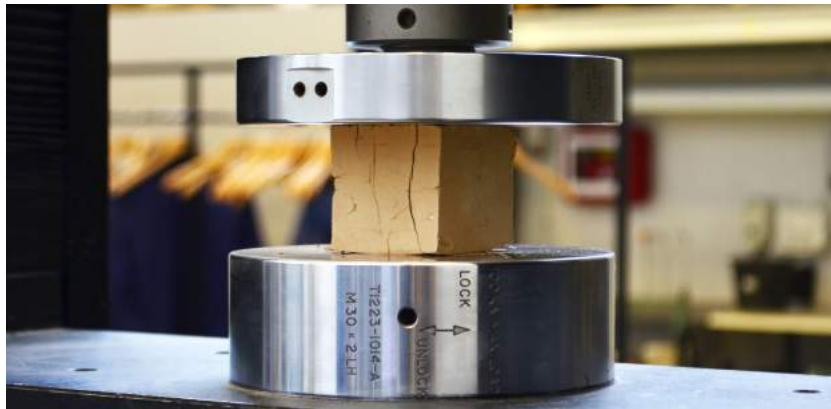
Figur 4.4.7.: Diagram der viser trykstyrken for teglkuberne, hvoraf det ses at der er en umiddelbar styrkereduktion i kubepøver med glasuld.

Teglets styrke forventes at aftage med densiteten, og som tidligere illustreret er tørdensiteten støt aftagende ved øget brug af glasuld. Dermed forventes der også en støt aftagende styrke, baseret på tørdensiteten, hvilket ikke er tilfældet.

Tendensen med svagt stigende trykstyrke ved tilsætning af 5 - 15 % glasuld kan gemme sig i standardafvigelse, da trykstyrken forventes at falde med materialets densitet. Resultatet kan muligvis forstås bedre, hvis man sammenligner dem med forsøgsresultatet for porøsiteten, hvor det ses, at der sker et relativt stort spring fra 0 - 5 %, men en relativ lille forøgelse fra 5 - 15 %. De forholdsvist lave fald i tør- og faststofdensitet indikerer ligeledes, at materialet umiddelbart ikke har mistet sin styrke.

Ved trykprøvning af teglkuberne forekommer et voksende antal revner, når trykket øges op til det punkt, hvor der kan tales om et egentligt brud. Revnedannelsen sker

umiddelbart før brud kan ses på figur 4.4.8, og illustrerer den generelle tendens blandt størstedelen af teglprøverne. Trykprøvningen er illustreret i *IV. Appendiks - Trykprøvning*, og illustrer udover revnedannelsen også brudmønstre og brudrester.



Figur 4.4.8.: Billedet illustrerer den ydre revnedannelse, på en teglprøve med 0 % glasuld, der kan karakteriseres som let timeglasformede.

De ydre brudmønstre kan karakteriseres som lodrette eller let timeglasformede og blev observeret på samtlige prøver. Dog forekom der hurtigere ydre revner i prøverne med 10 % og 15 % glasuld, relativt til det endelige brud. Dette forventes at være grundet prøvernes ujævne overflade orienteret mod trykfladerne. De steder hvor ujævnhederne var størst medførte det, at trykket blev ujævnt fordelt, og resulterede i tidlige brudmønstre i lokale områder.



Figur 4.4.9.: Billedet illustrerer den indre revnedannelse, på samme prøve med 0 % glasuld, hvor timeglasformen tydeligt kommer til udtryk. Lignende illustrationer kan findes i *IV. Appendiks*.

Figur 4.4.9 illustrerer det indre brudmønster efter løstsiddende teglmateriale blev fjernet. Det indre brudmønster er ligeledes generelt for størstedelen af prøverne, og kan karakteriseres som timeglasformet. Siden der ikke er en umiddelbar tendens i reduktionen af trykstyrken i teglprøverne ved øget brug af glasuld, forventes forskellen fra prøverne med og uden glasuld delvist at skyldes forskellen på prøvernes overflade. Prøverne uden glasuld havde helt jævne overflader, hvorimod prøverne med glasuld i udbredt grad havde forvrængede overflader. Ujævnheden på overfladerne synes specielt at forekomme ved brændingssvindet, som tidligere beskrevet.

5. Diskussion

Med afsæt i de opnåede resultater og præsentationen heraf, åbnes der i det følgende op for en diskussion af resultaternes implikationer. Her diskuteres glasulds egenskaber som tilslagsmateriale i teglsten gennem sammenligninger med tidligere studier, ligesom det diskuteres, hvilke positive og negative effekter glasuld har på tegl baseret på de eksperimentelle forsøg. Afslutningsvist åbnes op for en refleksion omkring glasulds potentiale som tilslagsmateriale i en rigtig produktion af teglsten, samt hvilke strukturelle udfordringer, forretnings- og miljømæssige potentialer dette vil indebære.

Diskussionen kredser om fire pointer, baseret på forsøgsresultaterne, der danner grundlag for fire afsnit, hvori pointerne udfoldes, underbygges og diskuteres. De fire pointer er 1) Glasuld har en gavnlig effekt på tegl, 2) Glasuld fremmer tegls isoleringsevne, 3) Glasuld hæmmer tegls trykstyrke og 4) Glasuld er et bedre tilslagsmateriale i tegl end organiske materialer er.

I tabel 5.0.1 nedenfor præsenteres resultaterne fra forsøgene under otte overskrifter. Her sammenlignes de med standard- og/eller grænseværdier, samt udvalgte tidligere studier. Disse tal refereres der løbende til i diskussionen.

Tabel 5.0.1.: Sammenligning med standardværdier, grænseværdier og andre studier.

		Andel af tilsat materiale			
		0%	5%	10%	15%
Tørringssvind	[vol-%]				
Reference; BIA Technical notes [22]		2 - 4			
Glasuld		5,3	3,5	3,7	4,1
Organic Residues [9] *		3,8	5,0	6,4	-
Samlet svind	[vol-%]				
Reference; BIA Technical notes [22]		4 - 8			
Glasuld		4,6	3,9	4,6	5,4
Organic Residues [9] *		4,1	5,8	7,4	-
Faststofdensitet	[kg/m³]				
Reference; Kalk- og teglværksforeningen [16]		2400 - 2800			
Glasuld		2760	2734	2710	2696
Organic Residues [9] *		2420	2047	1920	-
Tørdensitet	[kg/m³]				
Reference; Kalk- og teglværksforeningen [16]		1200 - 1800			
Glasuld		1774	1668	1650	1574
Organic Residues [9] *		1800	1460	1400	-
Glass Reinforced Plastic [10]		1550	1450	1430	-
Kaffegrums [11]		1751	1674	1555	-
Porøsitet	[vol-%]				
Reference; Kalk- og teglværksforeningen [16]		25 - 45			
Glasuld		35,7	39,0	39,1	41,6
Organic Residues [9] *		30,0	36,9	41,8	-
Glass Reinforced Plastic [10]		41,0	42,0	42,0	-
Kaffegrums [11]		36,0	39,0	43,0	-
Vandabsorption	[vægt-%]				
Reference; ASTM International [20] **		Maks. 25 (20)			
Glasuld		10,6	17,5	17,4	19,6
Organic Residues [9] *		16,7	25,2	29,9	-
Glass Reinforced Plastic [10]		21,0	24,0	27,0	-
Kaffegrums [11]		16,0	18,0	22,0	-
Kapillaritetstal	[-]				
Reference; ASTM International [20] **		Maks. 0,9 (0,8)			
Glasuld		0,16	0,33	0,50	0,73
Kaffegrums [11]		0,20	0,20	0,30	0,30
Trykstyrke	[MPa]				
Reference; ASTM International [20] **		Min. 15,2 (17,2)			
Glasuld		18,9	12,3	13,0	13,1
Organic Residues [9] *		15,5	10,2	8,9	-
Glass Reinforced Plastic [10]		26,0	18,0	14,0	-
Kaffegrums [11]		20,9	17,0	7,6	-

* Middeltal fra tre organiske fibertyper; savsmuld, tobakrester og græs.

** ASTM Int.: moderat forvitring (høj forvitring).

5.1. Glasuld har gavnlig indvirkning på tegl

Den første pointe om, at glasuld har en gavnlig indvirkning på tegl, udledes primært af forsøgsresultaterne, der viser et *reduceret tørringssvind, et reduceret samlet svind samt en reduceret faststofdensitet*. De tre forhold viser, at glasuld grundlæggende har en positiv indflydelse på teglstenen, fordi det kan fremme en mere stabil produktion med færre tab, samt flere formmæssige muligheder, som er en vigtig dimension for teglstenens relevans i byggeriet.

Et reduceret tørringssvind ved indblanding af glasuld i tegl skyldes, at tegl får en bedre tørringsevne. Som tabel 5.0.1 viser, ligger tørringssvindet rimeligt inden for de angivne værdier af, hvad der normalt ses i teglproduktion. Sammenligner man med tørringssvindet for organiske fibre, ses det, at de har den modsatte effekt i forhold til glasuld, når de indblandes i tegl og istedet øger tørringssvindet. Denne effektmæssige forskel mellem glasuld og de organiske fibre - savsmuld, tobak og græs - forventes at skyldes vandindholdet i de organiske fibre, og at de binder yderligere vand [9]. Et reduceret tørringssvind anses for at være en vigtig egenskab i produktionen af tegl, da det resulterer i færre tørringsrevner og dermed mindre tab under produktionen. Det reducerede tørringssvind vidner også om en forbedret formbarhed, der grundet glasuldsfibreindvirkning, forventes at kunne åbne op for nye udformninger af materialet, som tidligere har været begrænset af tørringsrevnerne.

Det samlede svind reduceres umiddelbart også, som resultat af faldet i tørringssvindet ved indblanding af glasuld. Sammenlignes der med brugen af organiske fibre, *Organic Residues* [9], som anført under *samlet svind* i tabel 5.0.1, ses det at svindet stiger støt med indholdet af tilslag, modsat glasuld der resulterer i et umiddelbart fald. Ser man dog på resultaterne for indblanding af 10 % og 15 % glasuld i tegl, fremgår det at både tørringssvindet og det samlede svind øges en smule. Dette skal forklares med en øget tilsætning af vand ved sammenblanding i laboratoriet, der er nødvendig for at få en ensartet masse. En større mængde glasuld kræver ganske enkelt en større mængde vand, for at blive indblandet ensartet i leret. I en produktion på et teglværk, hvor der er bedre maskiner til at understøtte blandingsprocessen, kan det antages, at vandmængden kan optimeres og medføre bedre værdier for et reduceret tørringssvind blandt alle teglprøver.

Faststofdensiteten, reduceres en smule ved brug af glasuld som tilslagsmateriale, men ligger fint indenfor det normale interval erfaret af Kalk- og teglværksforeningen [16], anført i tabel 5.0.1 under *faststofdensitet*. Det ses at brugen af organiske fibre, resulterer i et voldsomt fald i faststofdensitet, ulig forsøgsresultatet for glasuld. Dette menes, at skyldes de grundelementer de organiske tilslag består af og den omdannelse de går igennem i en teglproduktions brænding. Siden glasuld hovedsageligt består af uorganiske glasfibre som grundelement, der minder om teglstens keramiske bestanddele, sker der ikke en særlig reduktion i faststofdensitet, når elementerne sintrer sammen i brændingen. Dette er imidlertid ikke tilfældet med organiske fibre, der i sin grundbestanddel ligger langt fra teglmaterialets. Grundlæggende set peger det på glasuldfibreindvirkningens potentiale som et velegnet tilslagsmateriale.

5.2. Glasuld fremmer isoleringsevnen

På trods af, at det ikke har været et erklæret mål at undersøge glasulds indflydelse på teglstens isoleringsevne ved tilsætning af glasuld, er der variable i forsøgets resultater, der indikerer, at glasuld fremmer isoleringsevnen. Det handler om tørdensitet og porøsitet og er to resultater, der underbygger diskussionens 2. pointe. Den uddybes og diskuteres i det følgende.

Ved brug af glasuld i tegl falder tørdensiteten, hvilket er godt for isoleringsevnen. Dette fald i tørdensitet er også en gennemgående tendens i andre studier, der gør brug af fibre af både organisk og uorganisk art - se tabel 5.0.1 under *tørdensitet*. Ved en indblandingsprocent på 5 % glasuld falder densiteten fra 1774 til 1668 kg/m³, hvorefter densiteten aftager langsommere. Lignende udvikling for tørdensiteten ses i studierne *Kaffegrums* [11] og *Glass Reinforced Plastic* [10]. Reduktionen af tørdensitet skyldes tilslagets egen densitet og måden hvorpå tilslaget opfører sig under brænding. Typisk ses det, at de uorganiske tilslag, herunder glasuld, sammensmelter, mens de organiske tilslag afbrænder. Det er der eksempler på i studierne *Organic Residues* [9] eller *Glass Reinforced Plastic* [10].

Materialets porøsitet stiger umiddelbart ved indblanding af glasuld, men ikke støt som det ellers ses ved de organiske fibre; *Organic Residues* [9] og *Kaffegrums* [11], i tabel 5.0.1 under *porøsitet*. Porøsiteten stiger fra 0 - 15 % glasuld med i alt 16,5 %, men holder sig inden for normen ud fra erfarede værdier i dansk tegl (25 - 45 vol-%) [16]. Porøsiteten er nært beslægtet med tørdensiteten, der begge fortæller noget om teglstensens isoleringsevne. Ved et tab i densitet og en øget porøsitet stiger alle forudsætninger for at have lav termisk konduktivitet, som er et udtryk for, hvor god en isoleringsevne, der er i materialet. I dette tilfælde bliver isoleringsevnen bedre, fordi der er en højere porøsitet, men det har dog andre konsekvenser ift. trykstyrken. Det behandles i næste afsnit.

Med afsæt i de to egenskaber tørdensitet og porøsitet ses der en klar tendens til, at indblandingen af glasuld umiddelbart forbedrer teglets isoleringsevne. Sammenlignet med forsøgsresultater fra andre studier kan det yderligere fastslås, at glasuld som tilslag egner sig bedre, da det ikke overskrider nogle grænseværdier og ikke synes at agere ubehersket under produktionsprocessen. Hvor meget isoleringsevnen er forbedret for tegl med glasuld, kan dog ikke påvises i dette studie, siden der ikke er blevet målt på isoleringsevnen. Det er dog vigtigt at understrege, at på trods af en potentielt forbedret isoleringsevne er tegl som udgangspunkt et meget dårligt isolerende materiale. Forbedringen heraf taler ikke for, at teglet hverken skal kunne erstatte eller bruges som et isoleringsmateriale - i hvert fald ikke i danske sammenhænge. Når der i denne sammenhæng tales om forbedret isoleringsevne, gøres det for at tydeliggøre for de egenskaber, som glasuld fremmer i tegl.

En bedre isoleringsevne ses typisk at være på bekostning af et stabilt vandabsorptionsniveau, der i stedet vil have tendens til at overskride grænseværdierne. Dette gør sig også gældende for størstedelen af referencestudierne, hvilket ses i tabel 5.0.1 under *vandabsorption*. Ved brug af glasuld i tegl stiger vandabsorptionen imidlertid også, men

overskrider ikke grænseværdien på 25 (20) vægt-% [20]. Vandabsorptionen, specifikt set ud fra minutsugning, har afgørende betydning for stenens opførsel under opmuring - og er et af de mest vægtede og håndgribelige egenskaber for håndværkere inden for murerfaget. Derfor skal forøgelsen af minutsugning, der på trods af at overholde standardværdierne relativt til tørdensiteten, fremhæves som værende forholdsvis høj.

Vandabsorptionen kan i store træk afledes direkte af porøsiteten, fordi den stiger i mængde og hastighed, når porøsiteten stiger. Dog er vandabsorptionen mere kompliceret end som så og påvirkes grundlæggende af porestrukturen. Af resultaterne kan der altså gives et skøn over forskellen på porestruktur fra en fibertilsætning til en anden, men i denne sammenhæng er det mest interessante resultat, at brugen af glasuld umiddelbart ikke får materialets vandabsorptionsniveau til at overskride de definerede grænseværdier. Ud fra vandabsorptionsværdierne skønnes glasuld derfor til at være et effektivt pore-dannende tilslag, der øger mængden af store porer i højere grad end eksempelvis det lignende tilslagsmateriale, *Glass Reinforced Plastic* [10]. Forøgelsen i vandabsorption fra 0 - 5 % er i samme størrelsesorden som *Organic Residues* [9], hvilket vidner om at glasuld er et relevant tilslag til dannelse af porer med større porevidder. Dette kan antages da organiske fibre, i gennem tiden er det mest brugte poredannende tilslag, eksempelvis savsmuld [12]. Dette resultat er som sagt interessant, fordi glasulds isoleringsfremmende egenskaber, altså ikke giver problemer i forhold til materialets vandabsorptionsniveau, selvom det i teorien kunne være tilfældet.

5.3. Glasuld forringer trykstyrken

Pointen om, at glasuld forringer tegls trykstyrke, udledes primært af forsøgsresultaterne, der viser en *reduceret trykstyrke*. Spørgsmålet om tegls trykstyrke er grundlæggende vigtigt, da tegl traditionelt set er blevet brugt som konstruktionselement. Men ses tegl derimod i en moderne kontekst, hvor det i langt højere grad anvendes som facademateriale, kan det diskuteres, i hvilken grad de oprindelige grænseværdier for trykstyrken er af afgørende betydning at overholde. I dag kunne det eksempelvis være lige så relevant at evaluere på materialets træk- og bøjningsstyrke, hvis formålet er at anvende det til facadebeklædning.

Af forsøgsresultaterne fremgår det, at trykstyrken falder drastisk fra 0 - 5 %, fra 18,9 til 12,3 MPa, hvilket svarer til et fald på 35 %. Den reducerede trykstyrke overskrider den nedre grænseværdi på 15,2 MPa [20] og skulle denne værdi gå hen at være repræsentativ for trykstyrken af teglsten med glasuld produceret på et teglværk, må den anses for at være kritisk lav. Her er det dog væsentligt at overveje, i hvilken grad trykstyrkeprøven for en laboratoriefremstillet sten kan sammenlignes 1:1 med standardværdien, da værdierne er fastsat på baggrund af trykstyrkeprøver målt på sten i opmurede fag. Ligeledes er standardværdierne defineret ud fra målinger af sten, som er produceret på teglværker under kontrollerede forhold, hvilket også vil bidrage til en bedre trykstyrke. Disse forhold

er vigtige at tage med i evalueringen af forsøgsresultaterne.

På trods af det drastiske tab af styrke ved indblanding, reduceres trykstyrken ikke yderligere ved forøgelse af glasuldtilslag. Den drastiske reduktion af trykstyrke ved indblanding af 5 % tilslagsmateriale ses også i referencestudiernes forsøgsresultater, men ulig brugen af glasuld, forringes trykstyrken gradvist endnu mere. Tendensen ses i tabel 5.0.1 under *trykstyrke*, og indikerer, at glasuld, på trods af den initiale reduktion, rummer et mindst lige så stort, hvis ikke større potentiale som tilslagsmateriale end fibrene anvendt i referencestudierne.

I Glass Reinforced Plastic [10], ses som sagt også en reduktion i trykstyrke ved tilsætning af fibre, men på trods af det, resulterede tilsætningen af fibre i øgede bøjningsstyrker og udbøjninger. På baggrund af disse forbedrede egenskaber blev det konkluderet, at brugen af glasfiber plastik vil resultere i reduceret revnedannelse, og dermed spild igennem hele teglets liv. På baggrund af glasulds lignende materialegenskaber som fibrene i *Glass Reinforced Plastic* vurderes det, at tendensen meget vel kunne være den samme - og resultere i øget bøjningsstyrke. Dette er dog en antagelse, der stadig behøver nye videnskabelige undersøgelser for at bekræfte.

Afslutningsvist skal det bemærkes, at Dansk Standard foreskriver, at der ved trykprøvning af prøver med dimensioner svarende til dem brugt i dette projekt (5x5x5 cm), følger en normaliseringsfaktor på 0,85 [23]. Dette betyder, at trykstyrken for teglprøverne reduceres yderligere, skulle de ses i en produktionsmæssig kontekst. Normaliseringsfaktoren er for sammenlignelighedens skyld, dog ikke blevet anvendt på forsøgsresultaterne, da brugen af værdien ikke umiddelbart er anvendt i referencestudierne.

5.4. Glasuld er et tilslagsmateriale med gode potentialer

Som afrunding på diskussionen af disse tre (primært gavnlige) effekter som glasuld har på teglstens egenskaber, åbnes der op for en samlet refleksion omkring glasulds potentiale som tilslagsmateriale i en produktion af teglsten, på et dansk teglværk. Dette indebærer også en refleksion omkring de strukturelle udfordringer, der skal overkommes, samt de forretnings- og miljømæssige potentialer, der kan stimulere eller være en barriere for denne produktion.

Glasuld som tilslagsmateriale er stabilt i performance, hvilket blandt andet kan tilskrives den uorganiske karakter. Dets fibre binder mindre vand, opnår et mindre svind i produktionen og reducerer behovet for råmateriale med 5 - 15 %. Hvor stor en andel af ler, som glasuld kan erstatte i praksis, beror på, hvor godt blandingen performer, når den afprøves i produktionen og metoden siden standardiseres. Der er en væsentlig forskel på om afprøvning af glasuld som tilslag i teglsten udføres som laboratorieforsøg eller udvikles

som prototyper i en produktion. På et teglværk findes de fornødne redskaber og maskiner til, at man fra start kan optimere og forbedre produktionen. Det kan eksempelvis fremme blandingsprocessen for glasuld og ler, som i laboratorie viste sig svært at skabe gode vilkår for på de små røremaskiner.

En af de vigtige egenskaber ved teglsten, som glasuld styrker, er de æstetiske potentialer. Grundet et reduceret tørringssvind, bibringer glasuld tegl nye formmæssige muligheder, der kan styrke dets egenskab som facadebeklædning. Vi ved, at efterspørgslen på tegl i moderne byggerier i stigende grad beror på ønsket om skabe spændende og varierede facadeudtryk, og i denne markedsoptik kan der ligge nogle forretningsmæssige potentialer for at udvikle teglstenens formbarhed gennem tilføjelse af glasuld. Besparelsen af råmateriale er et andet forhold, der underbygger de forretningsmæssige potentialer i at indblende glasuld i tegl - og noget der kan stimulere argumenterne for at udvikle og afprøve prototyper.

Besparelsen af råmateriale og den tilsvarende anvendelse af glasuld repræsenterer også det miljømæssige potentiale, som blandingen af glasuld i teglsten afspejler. Her etableres der et nyt funktionsliv for et materiale, der ellers graves ned i jorden i mangel på en holdbar afskaffelsesmetode. Det er indbegrebet af cirkulær økonomisk tænkning og et eksempel på upcycling af materiale, som vi ellers bruger finansielle og miljømæssige ressourcer på at bortskaffe.

Disse forretnings- og miljømæssige potentialer kaster samtidig lys over nogle af de strukturelle benspænd, der også er på spil, når vi taler om at ændre en etableret praksis og igangsætte nye arbejdsgange og samarbejder i byggebranchens værdikæde. I dag er der en omfattende lovgivning, der tilsikrer kvaliteten og sundheden i de materialer, vi bygger vores huse med, ligesom lovgivningen er med til at sikre en nødvendig bortskaffelse af det affald, som er skadeligt for mennesker (og til dels miljø). Kvalitetssikringen af materielle (affalds)ressourcer, der bringes i spil som nye komponenter i produktioner, er et af de største udfordringer markedet står overfor. Et eksempel er genbrug af mursten, der hidtil har været besværliggjort af manglende kvalitetskontrol, men i dag understøttes af en ny CE-mærkning, der stiller garanti for materialets sporbarhed og holdbarhed. Det har krævet en strukturel ændring i markedet.

Dertil er det nødvendigt at forholde sig til de incitamenter, der er på spil for virksomhederne, som lever af at håndtere vores affald, herunder det der skal til deponi. Nogle betaler en afgift for at komme af med glasuld i dag, mens andre tjener penge på det - hvordan kan den afgift bedst omsættes til en besparelse og incitament til at sende glasuld til teglværkerne, uden andre markedsaktørers forretning hæmmes unødigt. Sådant en identifikation af økonomiske incitamenter forskellige aktører imellem, er altså væsentlige i arbejdet med at implementere glasuld som tilslag i produktionen af teglsten.

Der vil både være værdi i omdirigeringen af deponiaffald for såvel kommuner og for private virksomheder, som for nedrivere og producenter, der alle betaler for at komme af med affaldet. Priserne angivet på et deponi er i 2018, 1060 kr./ton, hvoraf 475 kr./ton er afgift [25]. Dette burde være en betydelig driver for besparelse og udnyttelse af en

affaldsressource. Et simpelt regnestykke på baggrund af den årligt producerede mængde glasuld viser, at der forventeligt skal bruges mere end 20 millioner kr. om året på deponering af glasuld i Danmark alene. På baggrund af de oplyste mængder af produceret og anvendt glasuld, som findes i byggeriet i Danmark i dag, kan det fortsat forventes, at glasuld fremadrettet vil vedblive at være en betydelig affaldsressource, vi skal håndtere. Det forstærker argumentationen for og potentialerne i at inkorporere glasuldaffald i et cirkulært system.

6. Videre studie

Det næste logiske skridt i vurderingen af brugen af glasuld i tegl er at undersøge nogle af de egenskaber, der ikke direkte redegøres for i dette projekt, heriblandt tørstyrke, bøjningsstyrke samt porestørrelser- og struktur. I det følgende oplyses de områder og forhold, der vil være interessante og nødvendige at studere nærmere i nye forsøg - og som kan være med til at validere brugen af glasuld som tilslag i tegl:

Undersøgelse af tilslagsmaterialets potentialer.

Tilsætningen af glasuld er endnu kun afprøvet med sorteret og uforurenede affaldsmateriale, hvilket lægger op til, at der foretages undersøgelser af, hvordan materialet begår sig, hvis det eksempelvis er forurenede eller hvis materialet er forarbejdet før indblanding.

- Forsøg med indblanding af forarbejdet af glasuld, der ændrer materialets egenskaber f.eks. ved opvarmning. Det skal undersøges, hvorvidt det kan resultere i ændrede farvenuancer i teglet, og løsning af fibre, der muliggør højere indblandingsmængder og understøttet en mere ensartet indblanding.
- Forsøg med indblanding af forurenede glasuld, såsom glasuld fra blandet byggeaffald, mhp. at undersøge hvordan støv, byggerester og andre urenheder vil påvirke glasuldets egenskaber i tegl.

Udførelse af formstudier af tegl med glasuld.

På baggrund af de opstillede resultater forventes tegls nyfundne egenskaber, ved indblanding af glasuld, at kunne skubbe grænserne for udformningen af stenene- og udnyttelse af specifikke egenskaber ved undersøgelse af nye former for indblanding. Disse muligheder kan eksempelvis afdækkes gennem følgende undersøgelser:

- Formstudie af arkitektonisk karakter, hvor muligheder og begrænsninger for materialets udformning undersøges.
- Formstudie af teknisk karakter, hvor der måles på egenskaber som eksempelvis svind og tørstyrke på prøver i langt større skala, end hidtil undersøgt.
- Udforske nye former for indblanding, f.eks. valsning af glasuld og ler, med det formål at udforme ensrettede fiberlag, der kan udnytte fibrenes egenskaber i én retning, herunder undersøge, hvilken effekt det kan have på udvalgte egenskaber.

Inddragelse af glasuld i teglproduktion.

Et vigtigt skridt i arbejdet med at genanvende glasuld i tegl er at gå fra laboratorieforsøg til afprøvninger på et teglværk. Det skal være med til at afgøre materialets anvendelighed

i praksis og afprøve, hvorvidt de gode egenskaber også træder frem, når der er tale om en større og standardiseret produktion. Derfor vil det blandt andet være interessant at afprøve følgende i et videre arbejde:

- Udarbejdelse af prototype på teglværk og sidenhen en fuldskala produktion mhp. at afgøre variation i resultat fra laboratorie til produktion samt særlige forhold, der kan understøtte og/eller vanskeliggøre opnåelsen af et brugbart byggemateriale.
- Analyse af business casen for genanvendelse af glasuld i teglproduktion, sammen med en identifikation af, hvilke fremmende og/eller hæmmende incitamentter aktørerne på tværs af værdikæden har i forhold til at udtage glasuld af affalds-loopet og medtage det som en genanvendelig ressource i materiale-loopet. Her er der både økonomiske, strukturelle og lovgivningsmæssige forhold i spil, der er væsentlige at få tydeliggjort.

7. Konklusion

Dette projekt har undersøgt brugen af glasuld som tilslag i produktionen af teglsten, for at opnå en mere miljøvenlig teglsten. Resultaterne demonstrerer, at brugen af glasuldsaffald i teglsten ikke blot værdisætter affaldsproduktet, og omdirigerer en ressourcekrævende bortskaffelse, men også forbedrer nogle af tegls egenskaber.

Af opgaven er følgende konklusioner nået:

- Glasuld besidder tekniske egenskaber der taler for, at det vil have en gavnlig effekt på tegl. Dette vurderes på baggrund af undersøgelser, der viser at glasuld har et glødetab på ca. $10 \mu\text{m}$ ($\pm 5 \mu\text{m}$), hvilke er egenskaber resulterende i en poredannende effekt. Ydermere bidrager glasuld til sintringen i telgs brændingsfase, da glasuldet smelter ved temperaturer nået ved teglproduktion.
- Tilsætning af glasuld på op til 15 %, skaber ikke problemer for produktionen, men øgede andele af glasuld gør det gradvist sværere at indblende ved laboratorieforsøg. Der kan være mulighed for et forbedret resultat ved brug af bedre maskinel til at udføre blandingsprocessen, eks. på et teglværk.
- Tilsætning af glasuld ændrer tegls overfladestruktur og farvenuancer - da teglet får en grovere overflade og et tiltagende grønligt skær.
- Tørringssvindet reduceres kraftigt ved tilsætning af glasuld, hvilket kan resultere i reduceret materialespild ved produktion og nye udformninger for tegl. Trods tørringssvindet, øges det samlede svind for materialet ved indblanding af glasuld.
- Glasuld kan effektivt blive anvendt som poreformende tilslag i tegl, da densiteten reduceres med 6, 7 og 11 % og porøsiteten forøges med 3,2; 3,4 og 6 % på prøver med 5, 10 og 15 % glasuld respektivt. Dette vurderes at gavne isoleringsevnen og reducere egenvægten på teglet.
- Vandabsorptionen stiger med 65 - 85 % ved øget indblanding af glasuld, så vel som minutsugningen, der øges med 65, 115 og 220 % for tegl med 5, 10, 15 % glasuld. Begge forøgelse er kritiske, men holder sig inden for referenceværdierne.
- Tegls trykstyrke reduceres umiddelbart med 35 % ved tilsætning af 5 % glasuld, men stagnerer herefter ved yderligere indblanding.

Med udgangspunkt i de fundne forsøgsresultater kan det konkluderes, at brugen af glasuld som poredannende tilslag i tegl viser lovende potentialer, uden at overskride standardværdier for målte egenskaber, dog med undtagelse af trykstyrken.

Litteratur

- [1] A. Sørensen; Dansk Byggeri. *Behov for at bygge 20.000 boliger hvert år.* (Åbnet: sep. 2018) <https://www.danskbyggeri.dk/media/21848/boligbe-2318179.pdf>, 2016.
- [2] Miljøstyrelsen. *Affaldsstatistik 2015, Miljøprojekt nr. 1941.* Miljø- og fødevarerministeriet, 2017.
- [3] Regeringen. *Danmark uden affald, genanvend mere - forbrænd mindre.* Miljøministeriet, 2013.
- [4] Miljøstyrelsen. *Ressourcebesparelser ved affaldsbehandlingen i Danmark. Miljøprojekt nr. 804.* Miljøministeriet, 2003.
- [5] M. Dondi et al. *Thermal Conductivity of Clay Bricks.* In: Journal of Materials in Civil Engineering 16, pp.8-14, 2004.
- [6] L. Belmonte et al. *Use of Greenlandic resources for the production of bricks.* PhD thesis. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering., 2015.
- [7] Kalk og Teglværksforeningen af 1893. *Renere Teknologi i Tegl- og Mørtelbranchen. Miljøprojekt nr. 499.* Miljøstyrelsen, 2000.
- [8] Kalk og Teglværksforeningen af 1893. *Renere Teknologi i Tegl- og Mørtelbranchen, Alternative materialer.* Miljøstyrelsen, 1999.
- [9] I. Demir. *Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks.* In: Waste management 28, pp.622-627, 2008.
- [10] A. Mobili et al. *Valorisation of GRP Dust Waste in Fired Clay Bricks.* Hindawi, Advances in Civil Engineering, 2018.
- [11] J. Garst Johansen. *Screening af kaffegrums som tilsætning til byggematerialer.* Master thesis. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2017.
- [12] C. Falk og J. Krejbjerg. *Tegl 1 teglfremstilling.* Kalk- og teglværksforeningen, 1991.
- [13] S. Andersen et al. *Noget om ler.* Miljøministeriet, Skov og Naturstyrelsen, 1989.
- [14] D. Marshall et al. *Understanding Housing Defects, Second Edition.* Faculty of the bristol Built Environment, EG Books, 2003.
- [15] Brick Industry Association. *Specifications for and Classification of Brick.* Technical Notes on Brick Construction, 9A, 2007.
- [16] C. Falk og J. Krejbjerg. *Tegl 10 egenskaber.* Kalk- og teglværksforeningen, 1980.

- [17] A. Nielsen. *Bygningsmaterialer - Grundlæggende Egenskaber*. Ed. Finn Raun Gottfredsen. Polyteknisk Forlag, 1997.
- [18] K. Kielsgaard Hansen. *Bygningsingeniørernes Materialer - Uddrag Af Materialebogen*. Nyt Teknisk Forlag, 2008.
- [19] *DS/EN 771-1:2011+A1:2015 Forskrifter for byggesten til murværk - Del 1: Teglbyggesten*. 4. Udgave. Dansk Standard, 2015.
- [20] *ASTM C62-13a*. Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale), 2013.
- [21] Saint-Gobain; ISOVER. *Leverandørbrugsanvisning*. (Åbnet: aug. 2018) <https://www.isover.dk/sites/isover.dk/files/assets/documents/leverandoerbrugsanvisning-isover-byg-og-granulat.pdf>, 2017.
- [22] Brick Industry Association. *Manufacturing of Brick*. Technical Notes on Brick Construction, 9, 2006.
- [23] *DS/EN 772-1:2011+A1:2015 Metoder til prøvning af byggesten til murværk - Del 1: Bestemmelse af trykstyrke*. 4. Udgave. Dansk Standard, 2015.
- [24] W. Chen. *Electrochemical Upgrading of Different Ashes for Use in Production of Bricks*. PhD thesis. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2017.
- [25] AV Miljø. *Takster for modtagelse af affald pr. 01.01.2018*. (Åbnet: sep. 2018) <https://www.av.dk/CustomerData/Files/Folders/3-pdf/48takster2018.pdf>, 2018.

Appendiks

Dette er appendiks til Bachelor afhandling *Genanvendelse af affald i nye byggematerialer - anvendelse af glasuld i tegl* af Christian Brandt Østerby, Danmarks Tekniske Universitet, 11. September 2018.

Appendikset består af følgende appendikser:

- I Appendiks - Øvelsesvejledninger
- II Appendiks - Blanding
- III Appendiks - Tørring og brænding
- IV Appendiks - Trykprøvning
- V Appendiks - Forsøgsdata

I. Appendiks - Øvelsesvejledninger

Arktisk Teknologi og Bæredygtige Løsninger, F 2016

Glødetab

A Princip

Jordens indhold af organisk materiale svarer stort set til det opnåede glødetab ved 550°C. I en tungmetalforurenede jord vil tungmetallerne i høj grad reagere med det organiske materiale i jorden og sidder bundet i denne fraktion.

B Specielt apparatur

Til analysen benyttes et muffelovn.

C Analysens udførelse

3 digler sættes i muffelovn, som er opvarmet til 550°C, hvor de står i 30 minutter (1time hvis ovnen er kold). Diglerne afkøles i eksikator og vejes på analyse vægt.

NB: Diglerne transporteres med tang, da fingrene afsætter fugt og derved ændrer vægten.

Derefter afvejes 2,5 g tør, knust jord på analysevægt til hver digel. Diglerne med den tørre jord stilles i en opvarmet muffelovn og glødes ved 550°C i 1 time.

Diglerne med den glødede jord afkøles i eksikator og vejes på analyse vægt.

D Beregning af resultat

Glødetabet, som nogenlunde svarer til prøvens indhold af organisk stof, angives i procent af tørstofindholdet.

$$\% \text{ glødetab} = \frac{m(\text{før muffelovn}) - m(\text{efter muffelovn})}{m(\text{før muffelovn})} \cdot 100$$

Porøsitet og densitet (LBM-standard)

A Princip

Porøsiteten i et materiale fortæller hvor porøst materialet er, dvs. hvor skrøbeligt det er. Jo højere porøsiteten er, des større evne har materialet til at optage vand. Det betyder også at en god evne til at optage vand. Densiteten er materialets masse pr. volumenenhed. Massen af et porøst materiale kan være en tør masse eller en masse med vand i de åbne porer, dvs. ved at finde densiteten kan man udregne massen ved forskellige forhold.

B Specielt apparatur

Til målingen benyttes vakuumpumpe, teknisk vægt med mulighed for at veje under vand.

C Analysens udførelse

Prøven tørres ved 105°C til prøven er hel tør dvs. ved kontant vægt.

Hvis der er tale om en betonprøve skal denne tørres ved 50°C i min 3 uger, da en tørring ved høj temperatur vil medføre ændring i porestrukturen.

Prøven vejes på teknisk vægt og vægten noteres som (m_{105})

Prøven placeres i en eksikator med låg og hane. Eksikatorens tilsluttes vakuumpumpen og pumpes ned i minimum 3 timer.

Destilleret vand med rumtemperatur ledes ind i eksikatorens vha en slange og undertrykket i eksikatorens. Hane lukkes lige så snart vandstanden er 3 cm over prøvelegemet. Derefter skal den stå lukket i 1 time.

Herefter lukkes luften ind og prøven skal stå under vand natten over ved atmosfæretryk.

Den vandmættede prøve vejes først under vand på en teknisk vægt med ophæng under. Vandet i karret skal have rumtemperatur. Vægten noteres som (m_{sw}).

Prøven duppes med en hårdt opvredet klud inden den vejes over vand.

Vægten noteres som (m_{ssd}).

Før at kontrollere om der er sket en udvaskning af prøven ved vandmætning tørres prøven ved 105°C og kontrolvejes.

D Beregning af resultat

Rumtemp: °C	Vandtemp: °C	Vanddensitet ρ_w =	kg/m ³
Kontrollod:			
Før:	kg		
Efter:	kg		
Prøvelegement nr:			
m_{105}	Kg		
m_{ssd}	Kg		
m_{sw}	Kg		
$V = (m_{ssd} - m_{sw}) / \rho_w$	m ³		
$V_{p\grave{a}} = (m_{ssd} - m_{105}) / \rho_w$	m ³ /m ³		
$P_{\grave{a}} = V_{p\grave{a}} / V$	Kg/m ³		
$\rho_d = m_{105} / V$	Kg/m ³		
$\rho_f = m_{105} / (V - V_{p\grave{a}})$	Kg/m ³		
$\rho_{ssd} = m_{ssd} / V$	Kg/m ³		
$u_{ssd} = (m_{ssd} - m_{105}) / m_{105}$	Kg/kg		

Definitioner, begreber og symboler

- m_{105} Masse af prøvelegemet efter tørring ved 105°C (kg)
- m_{ssd} Masse af prøvelegemet over vand efter vakuumvandmætning (kg)
- m_{sw} Masse af vakuumvandmættet prøvelegeme vejet i vand (kg)
- V Prøvelegemets volumen (m³)
- $V_{p\grave{a}}$ Volumen af åbne porer (m³)
- ρ_f Faststoffdensitet (kg/m³)
- ρ_d Tørdensitet (kg/m³)
- ρ_{ssd} Densitet af prøvelegeme i vakuumvandmættet overfladetør tilstand

Kapillarsugning

A Princip

Hvis et tørt porøst materiale bringes i forbindelse med vand, vil materialet opfuges som følge af kapillarsugning. Ved kapillarsugning sker der en transport af vand fra overfladen ind i materialet, denne transport sker igennem snævre kanaler i materialet, som også kaldes kapillarer.

På figuren ses det ideelle forhold hvor den optagne vandmængde pr. areal (Q) som funktion af $t^{1/2}$ viser en ret stiplede linje, indtil vandmængden svarende til Q_{kap} er opsuget. Herefter optages ikke mere vand og kurvens hældning bliver derfor nul.

I virkeligheden vil en kurve se ud som vist med den fuldt optrukne linje, da porerne ikke fyldes lige hurtigt. Ligeledes vil der for nogle materialer være en svagt stigende tendens, efter vandoverfladen har nået toppen af prøven. Dette skyldes at fyldningen af de mindste porer tager længere tid. Derfor vil vandtransporten gå langsomt hvis porerne i materialet er små, og omvendt hurtig hvis porerne er større.

B Specielt apparatur

Til målingen teknisk vægt.

C Analysens udførelse

Prøven tørres ved 105°C til prøven er hel tør dvs. ved konstant vægt.

Arealet af prøvelegemet måles som højde, længde og bredde.

Hvis der er tale om en betonprøve skal denne tørres ved 50°C i min. 3 uger (konstant vægt), da en tørring ved høj temperatur vil medføre ændring i porestrukturen.

Prøven vejes på teknisk vægt og vægten noteres (m_0)

En fotobakke fyldes med destilleret vand indtil vandet når ca. 5mm op over messingstængerne som ligger i bunden af bakken.

Temperaturen i rummet måles (T_{rum}) og destilleret vand skal være $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ (T_{vand})

Temperaturen i rummet måles (T_{rum}) og destilleret vand skal være $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (T_{vand})

Derefter anbringes prøvelegemet således at sugefladen er på messingstængerne og vandet når 5 mm op af prøven. Tiden startes i det øjeblik prøven får kontakt med vandet.

Prøven vejes efter 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 60 – 120 – 240 - 360 minutter fra starttidspunktet.

Vejningen sker ved at prøven tages op og trykkes kortvarig ned på en hårdt opvredet klud og vejes. Vægten noteres som (m_0)

D Beregning af resultat

Start værdier		
T_{rum}	$^{\circ}\text{C}$	
T_{vand}	$^{\circ}\text{C}$	
ρ_w	kg/m^3	998
Højde	m	
Længde	m	
Bredde	m	
Areal (A)	m^2	
m_0	kg	

t (min)	t ^{1/2}	mt (kg)	Q (kg/m ²)
0			
1			
2			
4			
8			
16			
32			
60			
120			
240			
360			

$$Q = \frac{m_t - m_0}{A}$$

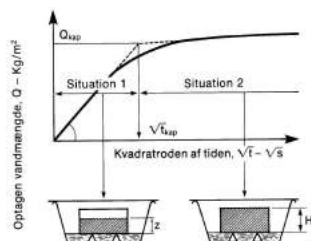
hvor

Q er den opsugede masse pr. opsningsareal [kg/m^2]

m_t er massen af prøvelegemet til tiden t [kg]

m_0 er tørmassen af prøvelegemet [kg]

A er opsningsarealet [m^2]



II. Appendiks - Blanding



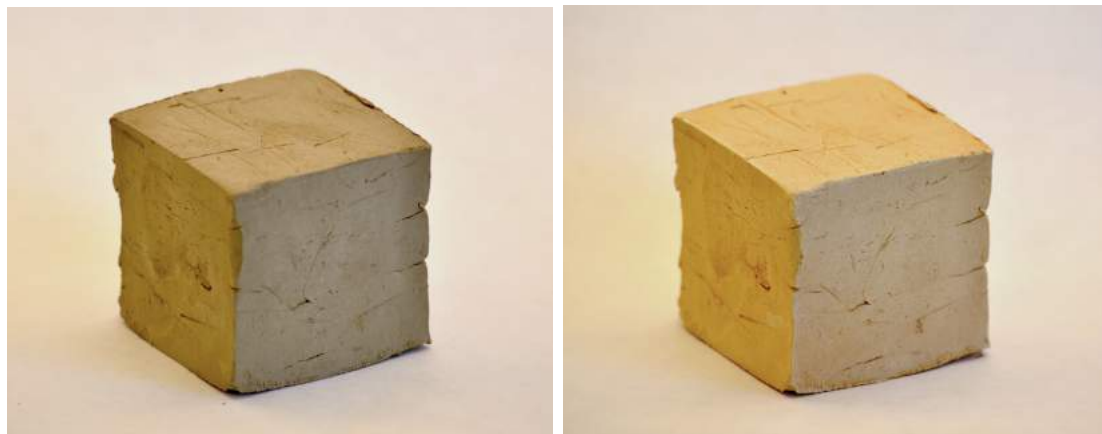
Figur II.1.: Blandingprocessen hvor glasuld blandedes med lerpulver og vand. Til venstre ses glasuld, vand og ler lagt i lag for at facilitere en god blanding. Til højre udøves æltningen yderligere.



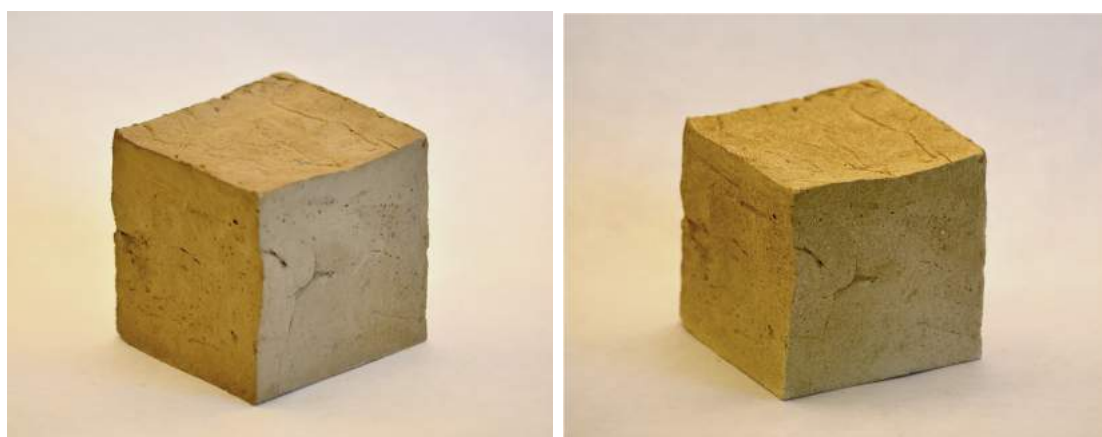
Figur II.2.: Blandingsmassen bliver, ved æltning, mere og mere ensartet, som det fremgår af billederne. Billedet til højre er endnu ikke æltet tilstrækkeligt, til at opnå den ønskede ensartede masse.

III. Appendiks - Tørring og brænding

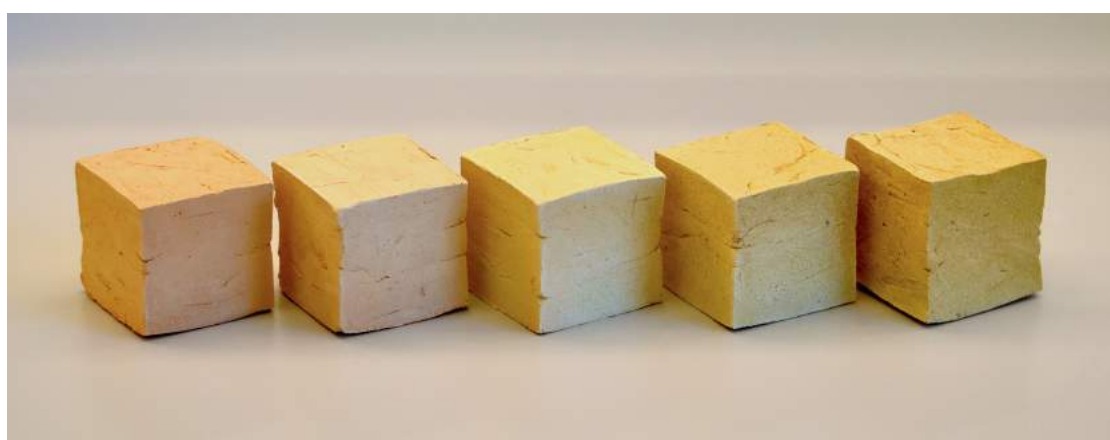
I følgende figurer illustreres nogle af de synlige forskelle der opstår ved brug af glasuld i tegl.



Figur III.1.: Overstående billeder viser en kubeprove med 0 % glasuld efter tørring (venstre) og efter brænding (højre).



Figur III.2.: Overstående billeder viser en kubeprove med 15 % glasuld efter tørring (venstre) og efter brænding (højre). Der ses tydeligt en ændring af overfladen fra 0 % til 15 %.

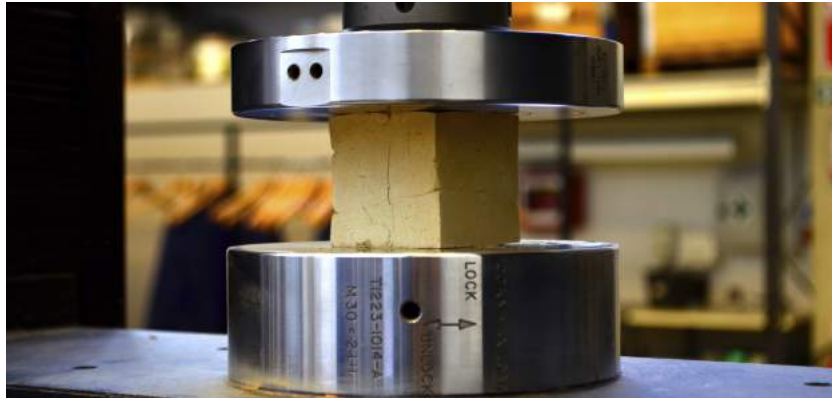


Figur III.3.: Billedet illustrerer farveforskellen ved brug af glasuld, der gradvist gør teglet mere gult med et grønligt skær. (Fra venstre) har teglkuberne blandingsprocenter på 0%, 0% (kontrol), 5%, 10%, 15% glasuld.

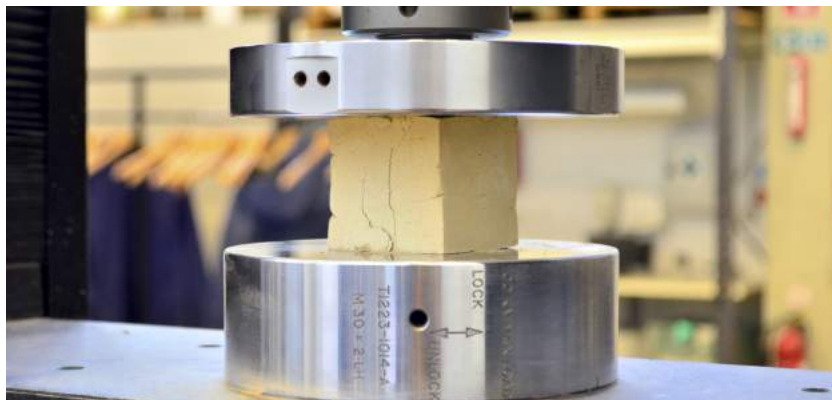
IV. Appendiks - Trykprøvning

IV.1. Process

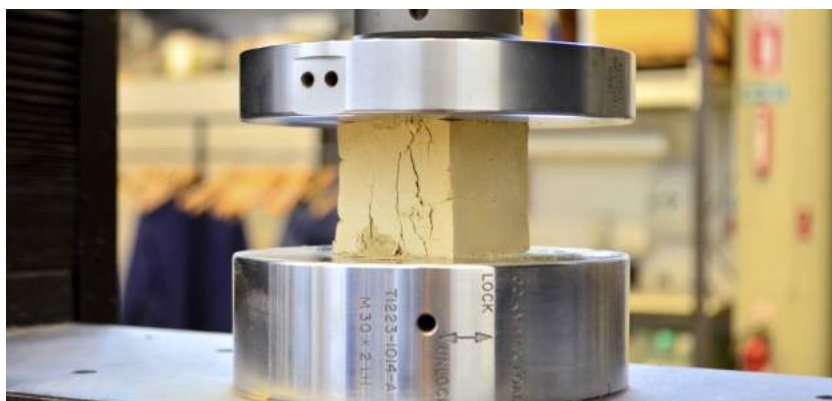
De følgende billeder illustreres trykprocessen hvor der trinvist vil opnås revnedannelse, brud og brudresterne.



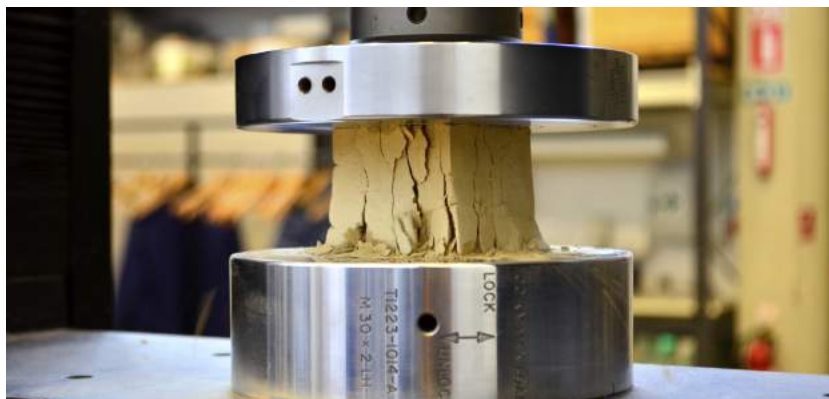
Figur IV.1.: Billedet illustrerer initiel revnedannelse ved tryk på en prøve med 5 % glasuld.



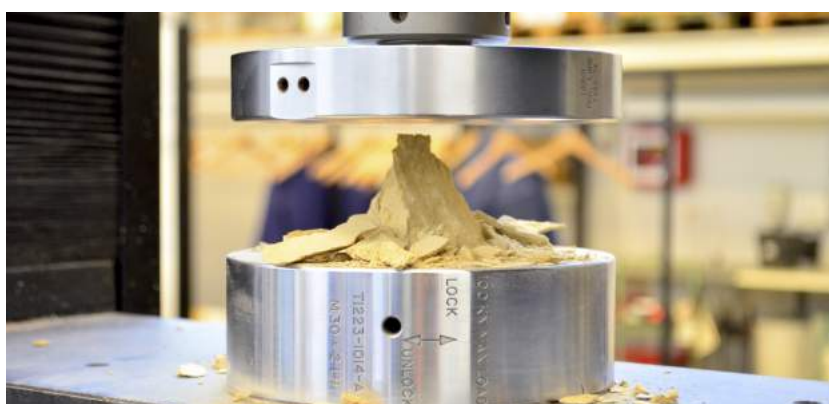
Figur IV.2.: Billedet illustrerer revnedannelse, samme prøve (5 % glasuld), der forårsager at materiale skaller af prøvens overflade



Figur IV.3.: Billedet illustrerer sammen prøve (5 % glasuld), i det den maksimale trykkraft er nået og bruddet indtræffer.



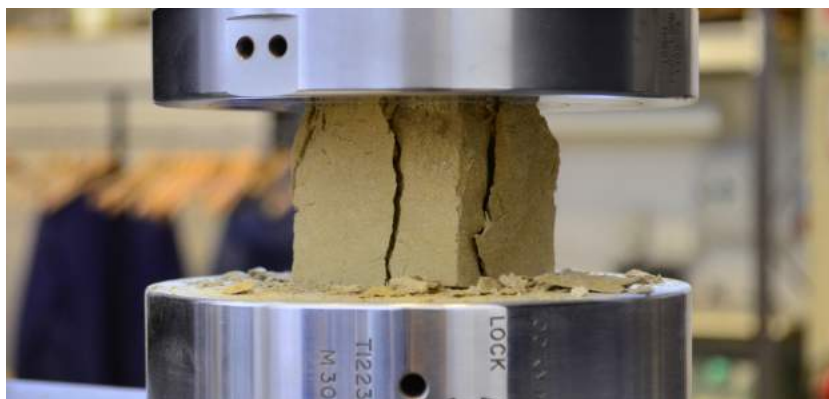
Figur IV.4.: Billedet illustrerer prøven (5 % glasuld) efter bruddet er indtræffet og trykstempet har bevæget sig 5mm fra dens udgangspunkt (i kontakt med teglkuben).



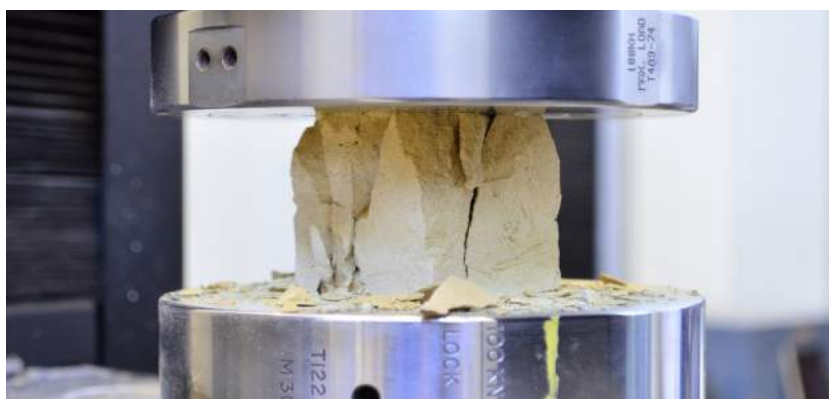
Figur IV.5.: Billedet illustrerer prøven (5 % glasuld) efter overfladiske rester er fjernet og prøvens trykstamme står tilbage.

IV.2. Brudmønstre

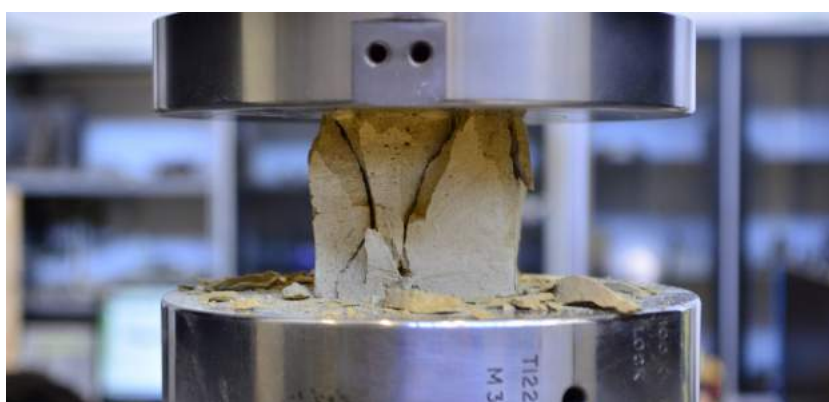
Et teoretisk korrekt brud fordrer dannelsen af et timeglas-formet brudmønster. Dette var en gennemgående tendens af alle kubepøverne og ses som eksempel på de fremviste billeder.



Figur IV.6.: Billedet illustrerer en prøve med 15 % glasuld efter den maksimale tryklast er nået og bruddet er indtræffet.



Figur IV.7.: Billedet illustrerer prøven (15 % glasuld) efter brud, hvor der er dannet brudmønstre.



Figur IV.8.: Billedet illustrerer prøven (15 % glasuld) efter brud hvor timeglasformede brudmønstre er formet.

IV.3. Brudrester

Efter trykprøvning var det muligt at finde interessante observationer i brudresterne.



Figur IV.9.: Billedet illustrerer brudrester fra en kubeproeve med 0 % glasuld. De hvide rester i teglet er små klumper af kalk, der potentielt kan foresage klakskub ved opfugtning.



Figur IV.10.: Billedet illustrerer brudrester fra en kubeproeve med 10 % glasuld. Udover farveforskellen ses synligere porer og en sort plamage der tager for at glasuldets organiske materiale er afbrændt her



Figur IV.11.: Billedet illustrerer brudrester fra en kubeproeve med 15 % glasuld, hvorfra der kan observeres øgede porrevidder.

V. Appendiks - Forsøgsdata

Indhold

- Glasuld
- Teglpiller
 - Blanding
 - Svind
 - Porøsitet og densitet
- Teglkuber
 - Blanding
 - Svind
 - Porøsitet og densitet
 - Kapillarsugning
 - Trykstyrke

V.1. Glasuld

Tabel V.1.: Glødetab

Prøve	Glasuld 28 °C		Glasuld 550 °C		Glødetab 550 °C		Std. afvigelse		Glasuld 950 °C		Glødetab 950 °C		Std. afvigelse		
	Vægt (g)	Vægt (g)	Vægt (g)	Vægt (g)	Vægt (g)	Vægt-%	++	--	Vægt (g)	Vægt (g)	Vægt (g)	Vægt-%	Vægt-%	++	--
1	1,0024	0,9375	-0,0649	0,9335	-0,0689	0,3487	0,9335	0,9663	-0,0704	-0,0619	-6,5922	0,3410			
2	1,0367	0,9647	-0,0720	0,9508	-0,0617										
3	1,0127	0,9510													

V.2. Teglpiller

Blanding

62

Tabel V.2.: Blandingsforhold for teglpiller

Blandingsforhold	Ler			Glasuld			Vand		
	Beregnet (g)	Målt (g)	Indhold (vægt-%)	Beregnet (g)	Målt (g)	Indhold (vægt-%)	Beregnet (g)	Målt (g)	Indhold (vægt-%)
0%	50	50,00	0,00	0,00	12,04	19,41	0,00	0,00	19,41
1%	50	50,00	0,50	0,50	14,55	22,37	0,50	0,50	22,37
2,5%	50	50,01	1,25	1,25	14,20	21,69	1,25	1,25	21,69
5%	50	50,00	2,50	2,50	14,57	21,72	2,50	2,50	21,72
7,5%	50	50,00	3,75	3,75	17,05	24,08	3,75	3,75	24,08
10%	50	50,01	5,00	5,00	16,06	22,59	5,01	5,01	22,59
12,5%	50	50,00	6,25	6,25	16,01	22,15	6,26	6,26	22,15
15%	50	50,00	7,50	7,50	18,59	24,43	7,50	7,50	24,43

Svind

Tabel V.3.: Teglpiller svind

	Prøve	v_form (mm ³)	v_105 (mm ³)	Tørringssvind (vol-%)	Std. (±)	v_1000 (mm ³)	Brændingssvind (vol-%)	Std. (±)	Samlet svind (vol-%)	Std. (±)
0%	1	930,12	958,35	-0,52	1,93	960,97	-0,41	1,69	-0,93	2,59
	2	913,51	917,00			895,74				
	3	899,57	896,55			910,01				
	4	906,75	918,71			925,92				
	5	918,17	901,39			918,09				
1%	1	953,30	974,64	-0,41	5,15	969,65	-0,74	2,03	-1,15	5,12
	2	931,39	920,02			914,25				
	3	874,15	958,14			960,18				
	4	946,24	911,88			938,33				
	5	964,32	923,87			940,64				
2,5%	1	887,02	964,99	-1,33	5,30	951,34	-0,20	1,89	-1,54	4,65
	2	948,65	916,80			917,20				
	3	920,77	928,22			939,37				
	4	940,19	912,04			941,66				
	5	969,96	1006,74			988,76				
5%	1	961,89	983,04	-2,22	4,68	964,94	1,44	3,43	-0,75	1,81
	2	935,02	931,82			951,05				
	3	922,50	959,55			940,59				
	4	958,14	977,56			964,08				
	5	974,03	1005,32			966,65				
7,5%	1	923,10	921,34	-0,78	2,14	924,64	1,07	2,39	0,30	1,96
	2	941,84	930,61			914,26				
	3	956,08	959,68			946,20				
	4	966,22	986,48			961,65				
	5	926,16	952,12			952,44				
10%	1	960,87	958,53	-1,42	3,41	937,12	2,37	4,90	0,98	2,29
	2	923,73	935,21			905,18				
	3	908,57	923,25			900,29				
	4	917,44	913,92			914,75				
	5	941,61	987,25			949,11				
12,5%	1	930,12	970,39	-3,27	6,74	907,96	4,09	8,40	0,96	2,17
	2	941,37	957,79			930,68				
	3	947,27	964,80			953,30				
	4	940,72	996,43			936,37				
	5	968,33	992,79			954,07				
15%	1	955,32	977,24	-0,79	1,88	956,26	3,08	6,20	2,31	4,78
	2	963,10	978,84			939,33				
	3	983,05	987,76			954,26				
	4	972,28	969,43			944,66				
	5	941,66	940,40			909,62				

Porøsitet og densitet

Tabel V.4.: Teglpiller porøsitet og densitet

	m_105 (g)	m_ssd (g)	m_sw (g)	V (cm ³)	V_pa (cm ³)	P_a (g/cm ³)	P_d (g/cm ³)	p_a_middel	p_d_middel	p_f (g/cm ³)	p_f_middel	p_ssd (g/cm ³)	u_ssd (g)
	(g)	(g)	(g)	(cm ³)	(cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g)
						(±)	(±)	(±)	(±)	(±)	(±)	(±)	(g)
0%	1	1,6649	1,931	1,025	0,908	0,257	0,294	0,297	0,003	1,834	1,834	2,597	2,127
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	1,5779	1,831	0,971	0,862	0,254	0,294	-	-	1,831	-	2,595	2,125
	4	1,6069	1,870	0,997	0,875	0,264	0,301	0,289	0,002	1,837	1,837	2,629	2,138
	5	1,6905	1,894	1,007	0,889	0,264	0,297	0,280	0,015	1,835	1,835	2,610	2,131
1%	1	1,6462	1,917	1,012	0,907	0,271	0,299	0,283	0,006	1,815	1,842	2,591	2,114
	2	1,5567	1,783	0,946	0,839	0,227	0,270	0,289	0,015	1,856	1,856	2,544	2,126
	3	1,6730	1,937	1,023	0,916	0,265	0,289	0,287	0,006	1,827	1,827	2,569	2,115
	4	1,6218	1,872	0,991	0,883	0,251	0,284	0,286	0,015	1,834	1,834	2,566	2,121
	5	1,6477	1,873	0,995	0,880	0,226	0,257	0,283	0,006	1,873	1,873	2,519	2,129
2,5%	1	1,6945	1,946	1,040	0,908	0,252	0,278	0,283	0,006	1,867	1,849	2,584	2,144
	2	1,5883	1,825	0,969	0,858	0,237	0,277	0,283	0,006	1,852	1,852	2,560	2,128
	3	1,6466	1,900	1,006	0,896	0,254	0,283	0,283	0,006	1,838	1,838	2,565	2,121
	4	1,6553	1,915	1,024	0,893	0,260	0,291	0,286	0,010	1,854	1,854	2,617	2,145
	5	1,7175	1,985	1,050	0,937	0,268	0,286	0,283	0,010	1,833	1,833	2,568	2,119
5%	1	1,6442	1,889	0,998	0,893	0,245	0,275	0,259	0,010	1,842	1,860	2,539	2,116
	2	1,6580	1,883	0,997	0,888	0,225	0,254	0,259	0,010	1,868	1,868	2,503	2,121
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	1,7020	1,941	1,023	0,920	0,239	0,260	0,259	0,010	1,850	1,850	2,502	2,110
	5	1,7208	1,946	1,032	0,916	0,226	0,246	0,251	0,013	1,879	1,864	2,493	2,125
7,5%	1	1,6124	1,833	0,970	0,865	0,221	0,256	0,251	0,013	1,865	1,864	2,505	2,120
	2	1,6283	1,851	0,982	0,871	0,223	0,256	0,251	0,013	1,870	1,870	2,505	2,120
	3	1,6518	1,894	0,996	0,900	0,243	0,270	0,251	0,013	1,836	1,836	2,514	2,105
	4	1,6957	1,907	1,006	0,903	0,212	0,235	0,251	0,013	1,878	1,878	2,454	2,112
	5	1,6671	1,880	0,992	0,890	0,213	0,240	0,251	0,013	1,874	1,874	2,464	2,113
10%	1	1,6590	1,879	0,995	0,886	0,220	0,249	0,238	0,009	1,873	1,884	2,493	2,121
	2	1,6506	1,864	0,985	0,881	0,214	0,243	0,238	0,009	1,874	1,874	2,475	2,116
	3	1,6559	1,826	0,970	0,858	0,190	0,222	0,238	0,009	1,907	1,907	2,452	2,129
	4	1,6487	1,859	0,983	0,878	0,211	0,240	0,238	0,009	1,878	1,878	2,472	2,118
	5	1,7104	1,925	1,020	0,907	0,215	0,237	0,238	0,009	1,886	1,886	2,472	2,123
12,5%	1	1,6707	1,866	0,987	0,881	0,196	0,222	0,234	0,007	1,897	1,893	2,439	2,119
	2	1,6963	1,908	1,018	0,892	0,212	0,238	0,234	0,007	1,902	1,902	2,496	2,140
	3	1,7137	1,926	1,015	0,913	0,213	0,233	0,234	0,007	1,877	1,877	2,448	2,110
	4	1,7203	1,932	1,032	0,902	0,212	0,235	0,234	0,007	1,908	1,908	2,494	2,142
	5	1,7264	1,948	1,031	0,919	0,222	0,242	0,234	0,007	1,879	1,879	2,478	2,120
15%	1	1,7080	1,913	1,012	0,903	0,205	0,228	0,226	0,006	1,892	1,889	2,449	2,119
	2	1,6858	1,897	0,999	0,900	0,212	0,235	0,226	0,006	1,874	1,874	2,450	2,108
	3	1,7230	1,930	1,018	0,914	0,207	0,227	0,226	0,006	1,885	1,885	2,439	2,112
	4	1,7196	1,919	1,016	0,905	0,200	0,221	0,226	0,006	1,901	1,901	2,439	2,121
	5	1,6659	1,859	0,981	0,880	0,193	0,220	0,226	0,006	1,894	1,894	2,427	2,113

V.3. Teglkuber

Blanding

Tabel V.5.: Teglkuber blanding

Blanding (%)	Ler			Glasuld			Vand	
	Beregnet (g)	Målt (g)	Beregnet (g)	Målt (g)	Beregnet (g)	Målt (g)	Målt (g)	Målt (g)
0%	900	900,00	0,00	0,00	0,00	211,01		
5%	900	900,00	45,00	45,00	45,00	250,00		
10,0%	900	900,01	90,00	90,10	90,10	300,10		
15%	900	900,02	135,00	135,50	135,50	360,00		

Svind

Tabel V.6.: Teglkuber svind

	0%			5%			10%			15%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Pilleprøver	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
v_form (mm3)	1,54E+05	1,50E+05	1,54E+05	1,54E+05	1,54E+05	1,55E+05	1,56E+05	1,59E+05	1,58E+05	1,63E+05	1,65E+05	1,70E+05
v_105 (mm3)	1,28E+05	1,29E+05	1,27E+05	1,38E+05	1,38E+05	1,38E+05	1,40E+05	1,40E+05	1,40E+05	1,43E+05	1,48E+05	1,46E+05
Tøringsvind (vol-%)	5,29			3,54			3,66			4,08		
Std. afvigelse	0,47			0,05			0,17			0,53		
m_1000 (g)	224,01	222,22	221,26	220,74	220,00	220,73	216,05	215,26	215,45	206,77	208,14	207,49
v_1000 (mm3)	135646,57	130644,59	128368,21	136564,41	136710,17	135785,18	135243,37	136371,69	135656,57	135349,28	143390,13	138131,12
Brændingssvind (vol-%)	-0,86			0,40			1,05			1,55		
Std. afvigelse	0,77			0,07			0,16			0,32		
Samlet svind (vol-%)	4,57			3,90			4,60			5,44		
Std. afvigelse	0,69			0,12			0,16			0,77		

Porøsitet og densitet

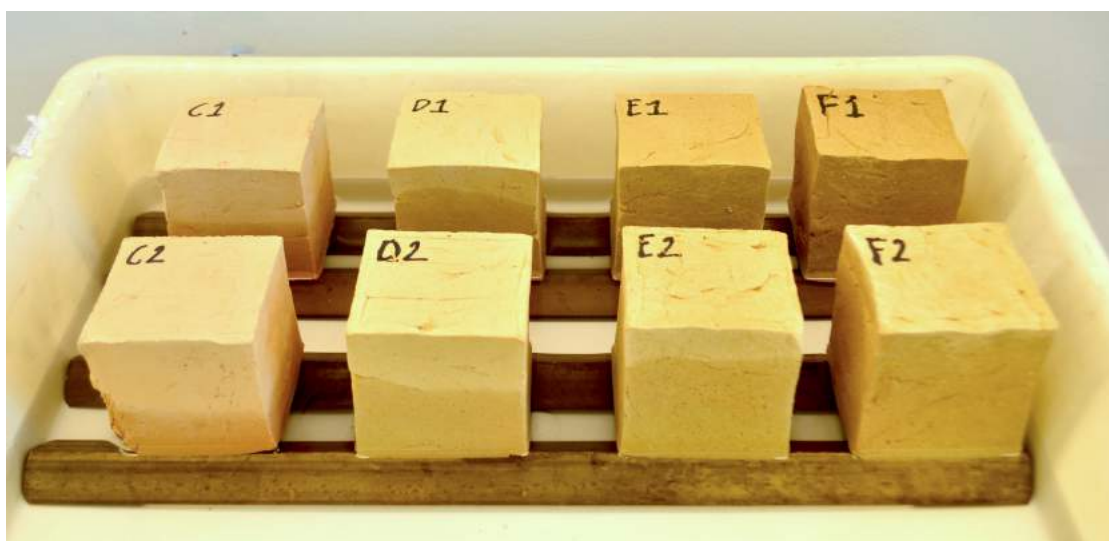
Tabel V.7.: Teglkuber porøsitet og densitet

	0%			5%			10%			15%		
	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3
m_105 (g)	224,010	222,220	221,260	220,740	220,000	220,730	216,050	215,260	215,450	206,770	208,140	207,490
m_ssd (g)	268,775	266,881	266,052	271,602	272,478	271,564	266,690	267,356	265,783	259,910	264,971	261,821
m_sw (g)	142,989	141,910	141,222	140,069	139,781	140,130	136,470	136,207	135,865	130,148	131,203	130,663
V (cm ³)	126,038	125,221	125,080	131,797	132,963	131,697	130,481	131,412	130,178	130,022	134,036	131,421
V_på (cm ³)	44,855	44,751	44,882	50,964	52,583	50,936	50,741	52,200	50,434	53,246	56,945	54,440
P_å (g/cm ³)	0,356	0,357	0,359	0,387	0,395	0,387	0,389	0,397	0,387	0,410	0,425	0,414
P_å_middel	0,357				0,390			0,391			0,416	
Afvigelse	0,001				0,004			0,004			0,006	
P_d (g/cm ³)	1,777	1,775	1,769	1,675	1,655	1,676	1,656	1,638	1,655	1,590	1,553	1,579
P_d_middel	1,774				1,668			1,650			1,574	
Afvigelse	0,003				0,010			0,008			0,016	
P_f (g/cm ³)	2,759	2,761	2,759	2,731	2,737	2,733	2,709	2,718	2,702	2,693	2,700	2,695
P_f_middel	2,760				2,734			2,710			2,696	
Afvigelse	0,001				0,003			0,006			0,003	
P_ssd (g/cm ³)	2,132	2,131	2,127	2,061	2,049	2,062	2,044	2,034	2,042	1,999	1,977	1,992
u_ssd (g)	0,200	0,201	0,202	0,230	0,239	0,230	0,234	0,242	0,234	0,257	0,273	0,262

Kapillarsugning



Figur V.1.: Kapillarsugningsforsøg, hvoraf opsugningsmængden kan ses direkte på prøverne. Hvert prøvesæt (1, 2, 3) er igangsat løbende.

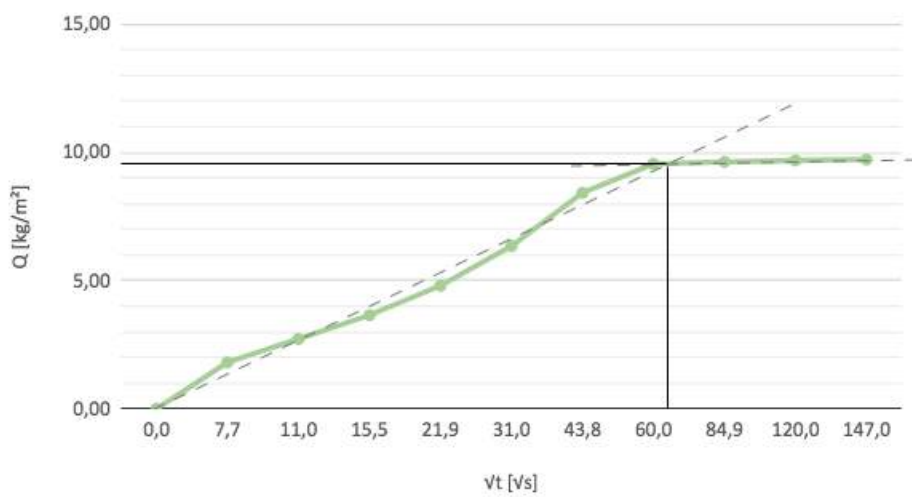


Figur V.2.: Kapillarsugningsforsøg, i billedet er der en klar tendens - da de stigende vandmængder i prøver med øget indhold af glasuld.

Kapillarsugning (fortsat)

Tabel V.8.: Kapillaritet, 0 %

Tid	C1		C2		C3		0 %		
t (min)	\sqrt{t} (\sqrt{s})	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	Middel (kg/m ²)	Afvigelse (\pm)
0	0,0	224,33	0,00	222,59	0,00	221,59	0,00	0,00	0,000
1	7,7	231,07	1,79	229,38	1,85	228,22	1,79	1,81	0,027
2	11,0	234,24	2,64	232,97	2,83	231,61	2,71	2,72	0,079
4	15,5	238,09	3,66	236,27	3,73	234,76	3,56	3,65	0,071
8	21,9	242,64	4,88	240,48	4,88	238,81	4,65	4,80	0,107
16	31,0	248,05	6,32	246,56	6,53	244,53	6,19	6,35	0,140
32	43,8	255,44	8,28	254,25	8,63	252,52	8,35	8,42	0,149
60	60,0	259,60	9,39	258,20	9,71	257,02	9,57	9,55	0,128
120	84,9	259,87	9,46	258,49	9,78	257,31	9,64	9,63	0,131
240	120,0	260,06	9,51	258,69	9,84	257,53	9,70	9,69	0,133
360	147,0	260,22	9,56	258,82	9,87	257,61	9,73	9,72	0,130

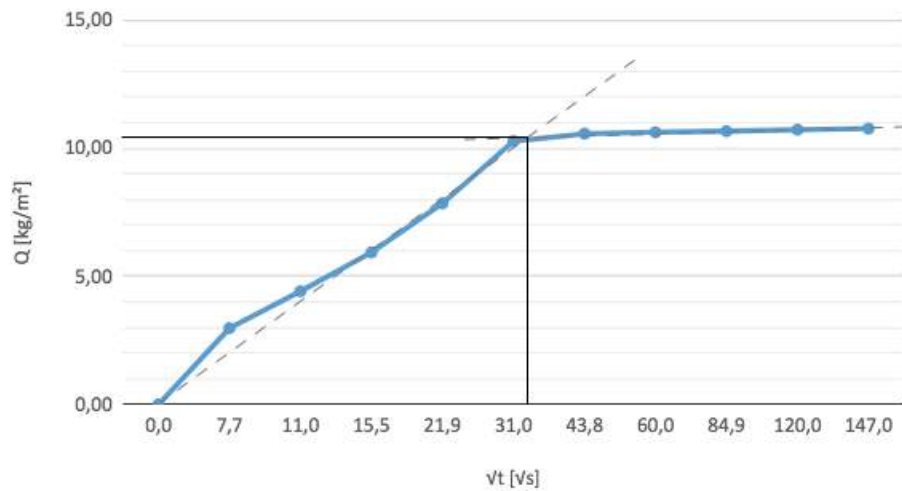


Figur V.3.: Gennemsnit af 3 prøver med glasuldtilslag på 0 %

Kapillarsugning (fortsat)

Tabel V.9.: Kapillaritet, 5 %

Tid		D1		D2		D3		5 %	
t (min)	$t^{1/2}$ (\sqrt{s})	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	Middel (kg/m ²)	Afvigelse (\pm)
0	0,0	220,79	0,00	220,09	0,00	220,77	0,00	0,00	0,000
1	7,7	232,23	3,05	231,31	2,96	231,73	2,93	2,98	0,051
2	11,0	237,3	4,40	237,4	4,57	236,82	4,28	4,42	0,119
4	15,5	243,41	6,02	242,98	6,05	242,26	5,74	5,94	0,142
8	21,9	251,18	8,09	249,88	7,87	249,2	7,59	7,85	0,207
16	31,0	259,37	10,28	259,56	10,43	258,7	10,13	10,28	0,124
32	43,8	259,89	10,41	261,09	10,83	259,98	10,47	10,57	0,187
60	60,0	260,06	10,46	261,30	10,89	260,18	10,52	10,62	0,190
120	84,9	260,23	10,51	261,46	10,93	260,36	10,57	10,67	0,188
240	120,0	260,44	10,56	261,70	11,00	260,55	10,62	10,73	0,193
360	147,0	260,63	10,61	261,86	11,04	260,67	10,65	10,77	0,192

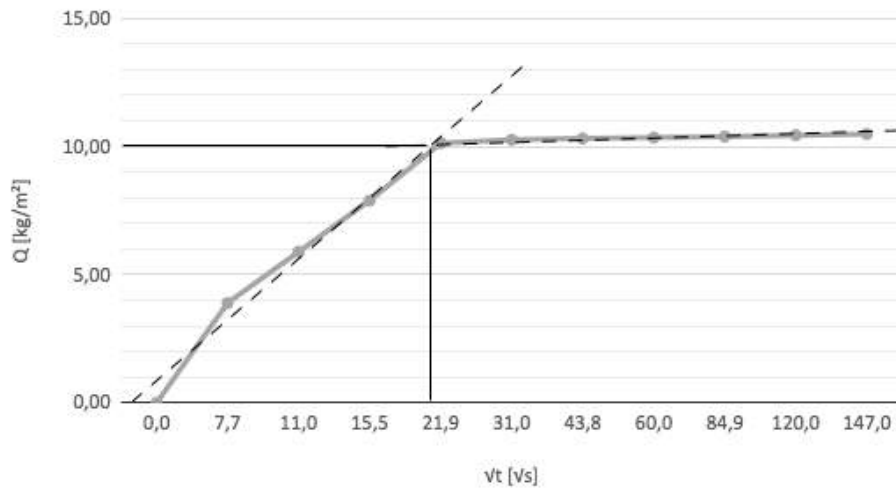


Figur V.4.: Gennemsnit af 3 prøver med glasuldtilslag på 5 %

Kapillarsugning (fortsat)

Tabel V.10.: Kapillaritet, 10 %

Tid		E1	E2	E3	10 %				
t	$t^{1/2}$ (sek)	m(t)	Q(t)	m(t)	Q(t)	m(t)	Q(t)	Middel	Afvigelse
(min)	(\sqrt{s})	(g)	(kg/m ²)	(g)	(kg/m ²)	(g)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(\pm)
0	0,0	216,08	0,00	215,27	0,00	215,44	0,00	0,00	0,000
1	7,7	230,06	3,77	230,37	4,07	229,6	3,85	3,89	0,126
2	11,0	236,8	5,58	238,55	6,27	236,84	5,82	5,89	0,285
4	15,5	244,78	7,73	245,81	8,22	243,8	7,71	7,89	0,238
8	21,9	253,21	10,00	253,88	10,40	252,12	9,97	10,12	0,194
16	31,0	253,53	10,09	254,36	10,53	252,82	10,16	10,26	0,191
32	43,8	253,68	10,13	254,6	10,59	252,99	10,21	10,31	0,202
60	60,0	253,80	10,16	254,73	10,63	253,12	10,24	10,34	0,202
120	84,9	253,92	10,19	254,90	10,67	253,26	10,28	10,38	0,208
240	120,0	254,12	10,25	255,08	10,72	253,51	10,35	10,44	0,203
360	147,0	254,31	10,30	255,25	10,77	253,65	10,39	10,48	0,202

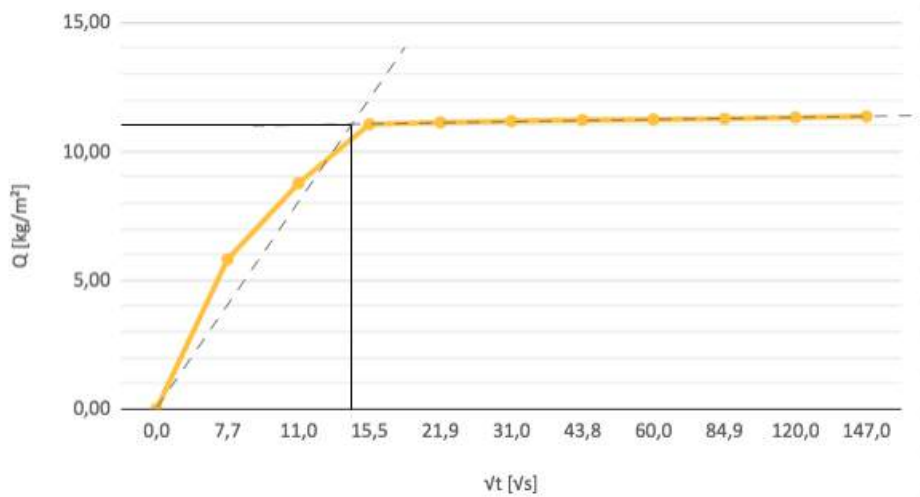


Figur V.5.: Gennemsnit af 3 prøver med glasuldtilslag på 10 %

Kapillarsugning (fortsat)

Tabel V.11.: Kapillaritet, 15 %

Tid		F1		F2		F3		15 %	
t (min)	$t^{1/2}$ (sek) (\sqrt{s})	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	m(t) (g)	Q(t) (kg/m ²)	Middel (kg/m ²)	Afvigelse (\pm)
0	0,0	206,77	0,00	208,14	0,00	207,48	0,00	0,00	0,000
1	7,7	228,72	6,09	228,17	5,46	229,08	5,86	5,80	0,263
2	11,0	239,37	9,05	239,77	8,61	239,21	8,61	8,76	0,204
4	15,5	245,75	10,82	250,04	11,41	247,66	10,91	11,05	0,261
8	21,9	245,85	10,84	250,59	11,56	247,81	10,95	11,12	0,316
16	31,0	246,02	10,89	250,79	11,62	247,97	10,99	11,17	0,320
32	43,8	246,17	10,93	250,97	11,66	248,09	11,03	11,21	0,325
60	60,0	246,25	10,96	251,05	11,69	248,20	11,06	11,23	0,324
120	84,9	246,34	10,98	251,20	11,73	248,27	11,07	11,26	0,332
240	120,0	246,50	11,03	251,36	11,77	248,48	11,13	11,31	0,329
360	147,0	246,67	11,07	251,53	11,82	248,55	11,15	11,35	0,334



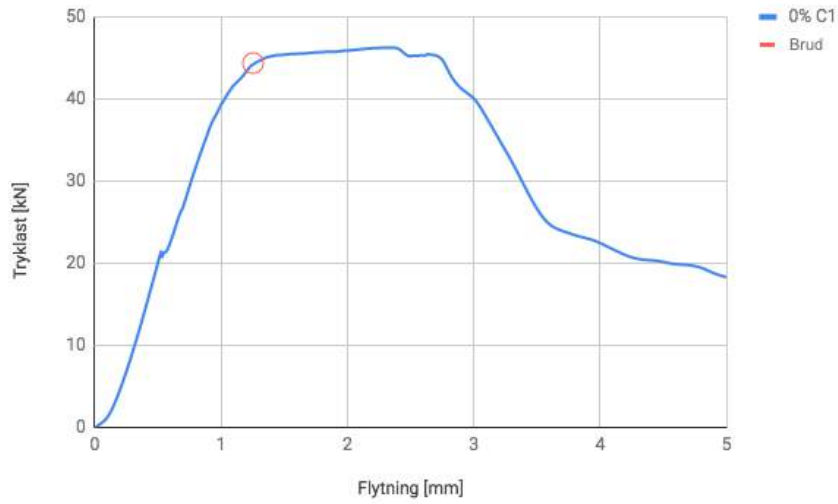
Figur V.6.: Gennemsnit af 3 prøver med glasuldtilslag på 15 %

Trykstyrke

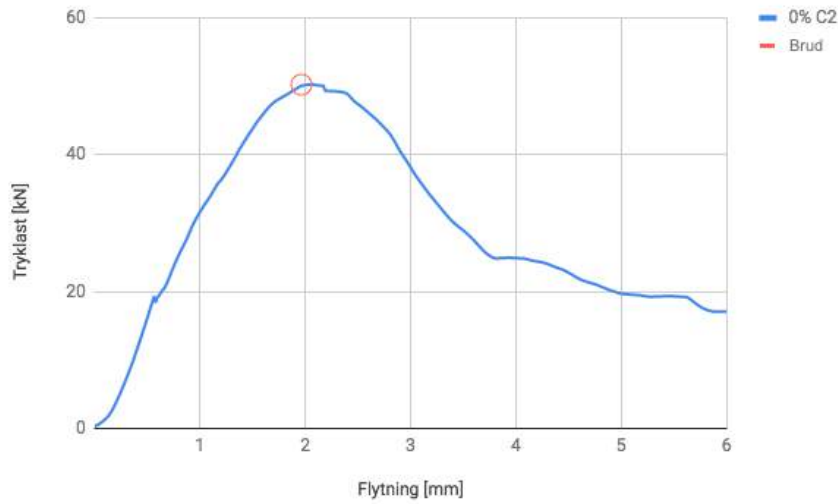
Tabel V.12.: Trykstyrken beregnet fra tryklast og tværsnitsareal

	0%			5%			10%			15%		
Prøve	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3
F_c (kN)	46,28	50,30	55,25	42,38	33,18	24,60	40,53	32,00	31,85	29,43	32,61	41,48
A_s (m ²)	2,71E-3	2,64E-3	2,67E-3	2,71E-3	2,74E-3	2,71E-3	2,68E-3	2,68E-3	2,65E-3	2,59E-3	2,64E-3	2,65E-3
f_c (MPa)	17,06	19,04	20,69	15,62	12,12	9,09	15,14	11,95	12,02	11,38	12,34	15,63
f_c middel	18,93			12,28			13,04			13,12		
Std. afvigelse	1,49			2,67			1,49			1,82		

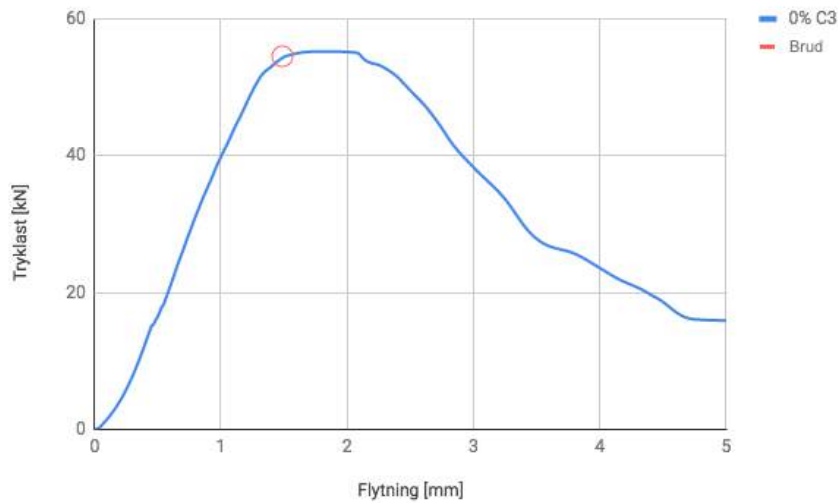
Trykstyrke (fortsat)



Figur V.7.: Datalog fra trykprøvning med 0 % glasuld (C1)

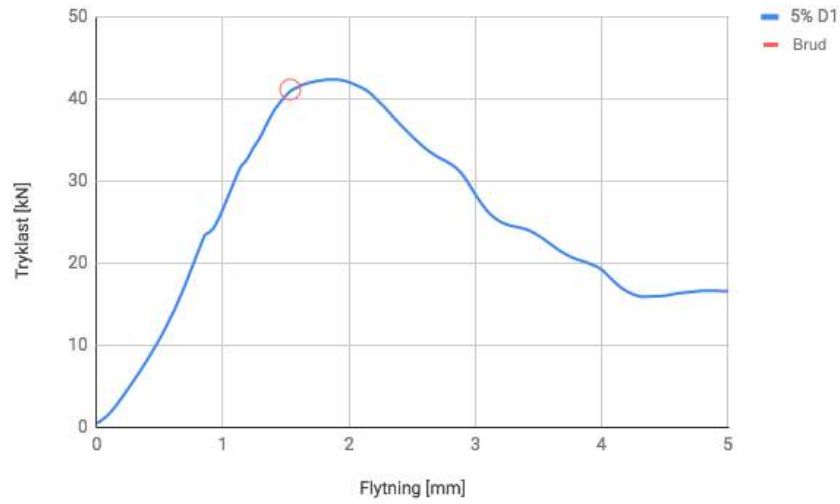


Figur V.8.: Datalog fra trykprøvning med 0 % glasuld (C2)

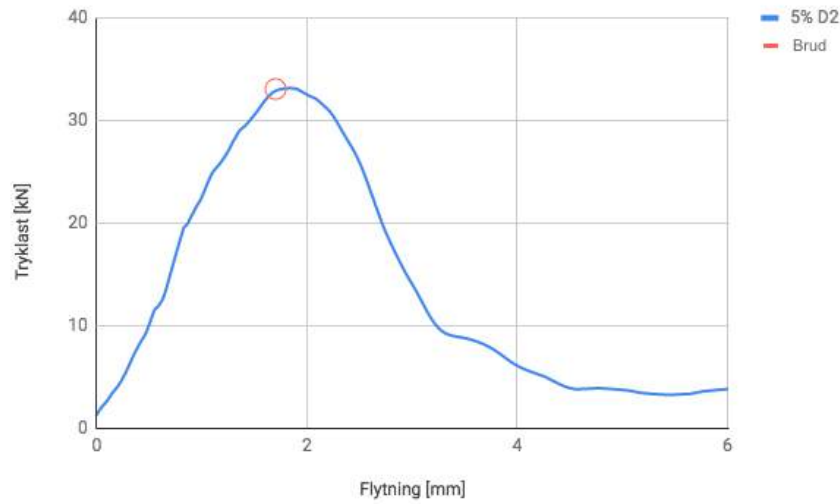


Figur V.9.: Datalog fra trykprøvning med 0 % glasuld (C3)

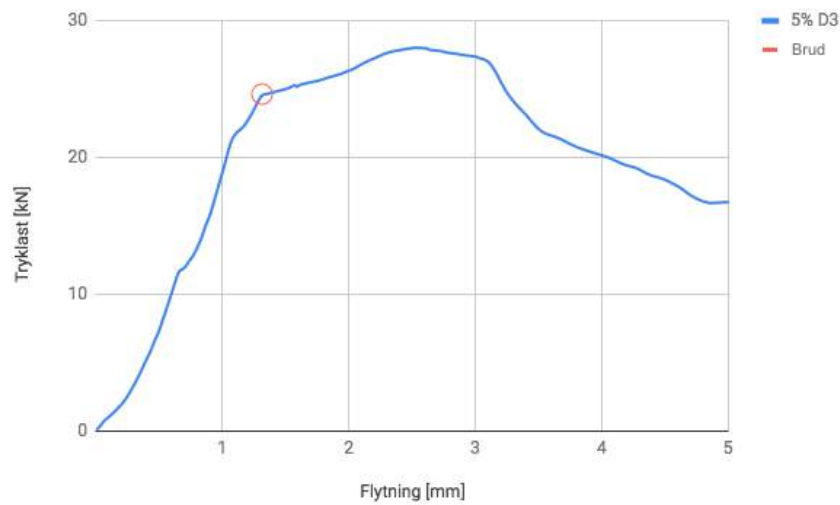
Trykstyrke (fortsat)



Figur V.10.: Datalog fra trykprøvning med 5 % glasuld (D1)

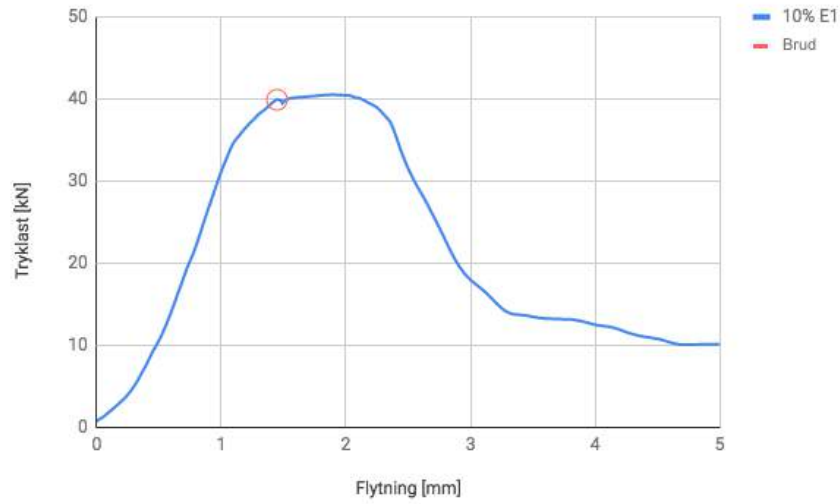


Figur V.11.: Datalog fra trykprøvning med 5 % glasuld (D2)

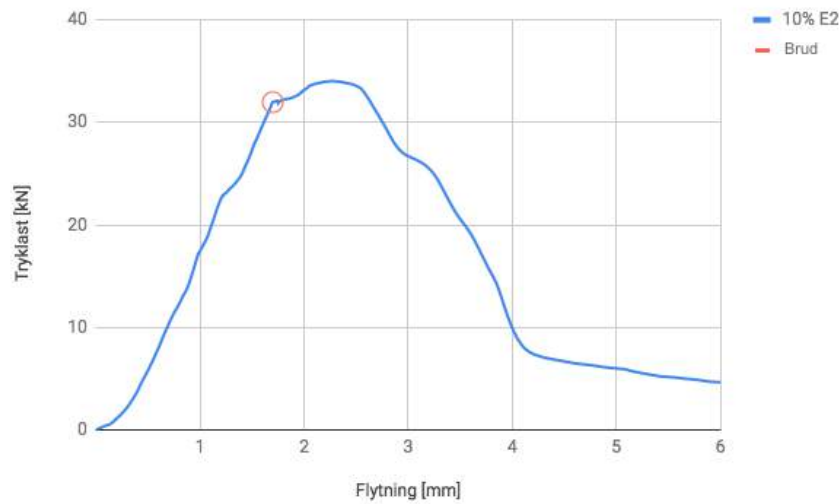


Figur V.12.: Datalog fra trykprøvning med 5 % glasuld (D3)

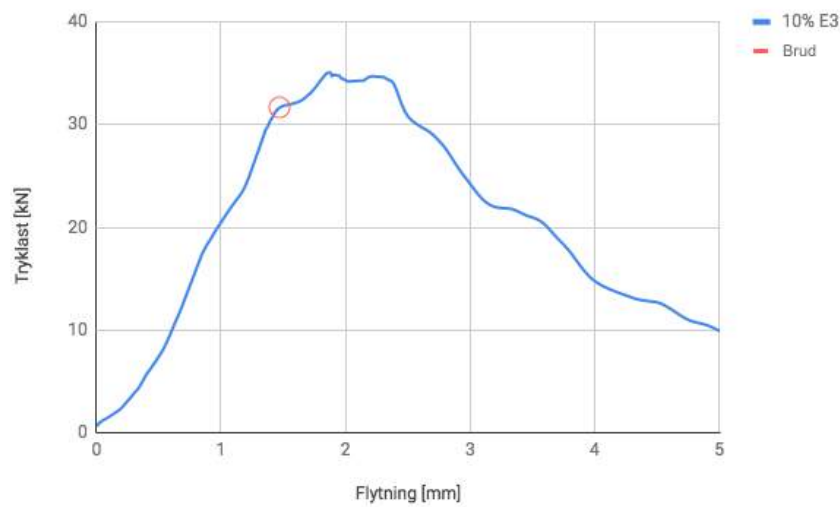
Trykstyrke (fortsat)



Figur V.13.: Datalog fra trykprøvning med 10 % glasuld (E1)

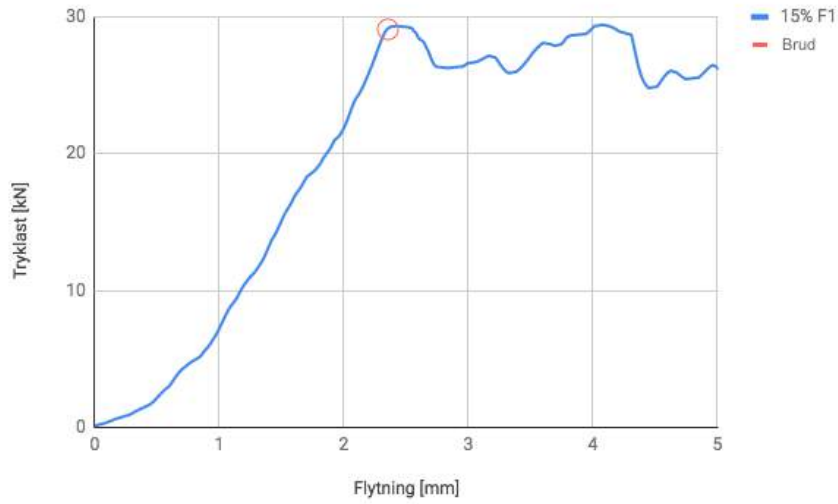


Figur V.14.: Datalog fra trykprøvning med 10 % glasuld (E2)

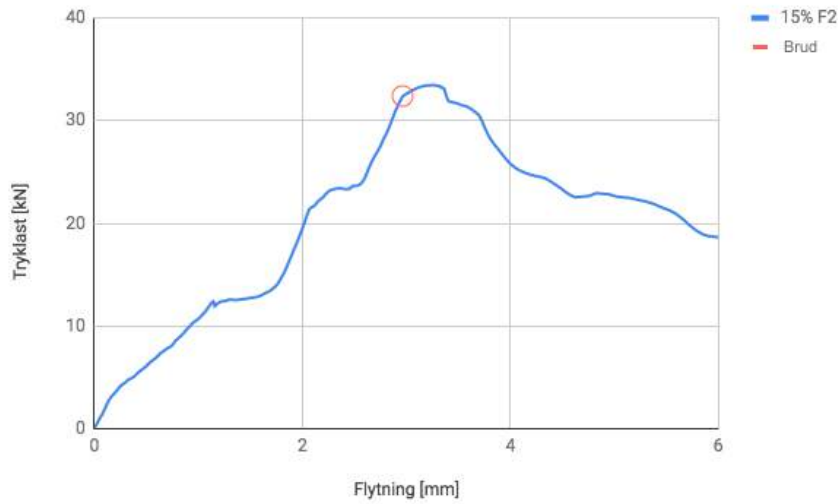


Figur V.15.: Datalog fra trykprøvning med 10 % glasuld (E3)

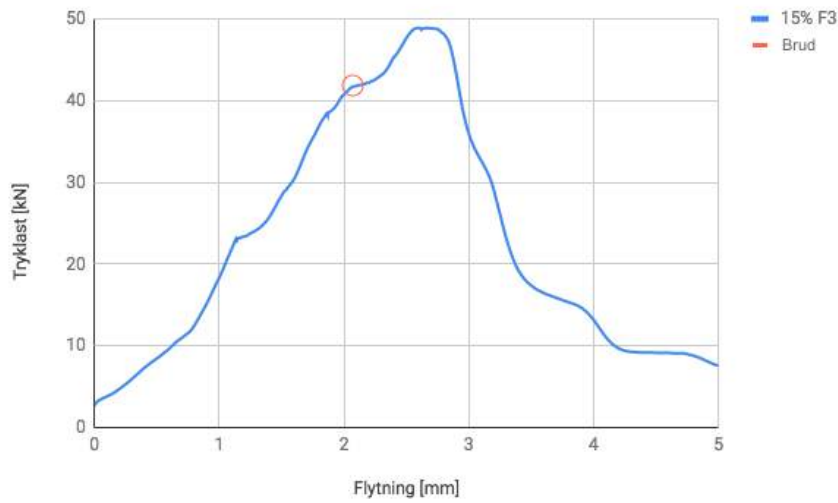
Trykstyrke (fortsat)



Figur V.16.: Datalog fra trykprøvning med 15 % glasuld (F1)



Figur V.17.: Datalog fra trykprøvning med 15 % glasuld (F2)



Figur V.18.: Datalog fra trykprøvning med 15 % glasuld (F3)