

En Eksperimentell og Numerisk Analyse av Heftsonen i Murverk

Jonas Lundli Buan
Dilush Dennis Joseph

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Stig Geving, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel:	Dato: 10.06.2014		
En eksperimentell og numerisk analyse av heftsonen i murverk	Antall sider (inkl. bilag):		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Stud.techn.			
Dilush Dennis Joseph og Jonas Lundli Buan			
Faglærer/veileder:			
Stig Geving			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:			

<p>Ekstrakt:</p> <p>Historiske murbygg er forventet å bli inkludert i oppgraderingen av den eksisterende bygningsmassen. Denne oppgraderingen fører til fukttekniske utfordringer og behov for kunnskap rundt fukttransporten i murverk er stor. Hovedmålet med denne oppgaven har vært å undersøke hvilken innvirkning kontaktflaten mellom mur og teglstein, kalt heftsonen, har på vannopptaket og hvordan heftsonen best mulig kan modelleres med tanke på fuktopptak og fukttransport.</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Første del av oppgaven består av en teoretisk bakgrunn som ble utarbeidet fra et litteraturstudium. Her blir forhold som har innvirkning på vannopptaksprosessen i et murverk presentert.➤ Andre del består av en laboratorieundersøkelse der densitet, vannabsorpsjon, minuttug, kapillært vannopptak og skjærfasthet ble målt på teglstein, mørtel og murte pilerer. Resultatene viste at heftsonens etablering er avhengig av materialegenskapene til teglsteinen, mørtelen samt hvilken mureteknikk som ble benyttet.➤ Tredje del består av en numerisk analyse av de aktuelle materialparameterne samt en undersøkelse av teorier for å modellere heftsonen numerisk. Resultatene viste at heftsonen måtte tas hensyn til for å få overensstemmelse med de målte resultatene. En simpel makroskopisk modell av et murverk med heftsonen ga det beste samsvaret med målte verdier. <p>Rapporten konkluderer med at heftsonens natur er for komplisert til å modelleres på et detaljert nivå. Det blir anbefalt å redegjøre for en bedre tilnærming til koeffisienten som bestemmer væsketransporten, enn den som ble benyttet i denne rapporten.</p>
--

Stikkord:

1. Murverk
2. Heftsonen
3. Kapillær vannabsorpsjon
4. Numerisk simulering

Forord

Denne masteroppgaven fullfører arbeidet på det 5-årige masterprogrammet Bygg- og Miljøteknikk ved NTNU. Oppgaven er skrevet for Institutt for Bygg, Anlegg og Transport innenfor faggruppen Byggnings og Materialteknikk og fordypningsemne bygningsfysikk. Oppgaven har vært et samarbeidsprosjekt mellom to studenter.

Selve prosessen rundt oppgaven har vært meget spennende men også utfordrende. Klargjøringen rundt laboratorieforskene tok lengre tid enn planlagt og kombinasjonen bestilling av materialer og tid nødvendig for herding av murpilarene sørget for en forsinket start på målingene. Dette krevde ekstra planlegging av logistikk og metode, noe som var utfordrende men også veldig givende.

Vi ønsker å takke vår hovedveileder Stig Geving for gode innspill og tilbakemeldinger underveis i prosessen. Vi ønsker også å rette en ekstra stor takk til Tore Kvande ved NTNU for den heft-ige interessen han har vist for arbeidet og for den hjelpen, før og under laboratorieundersøkelsene, som har vært helt essensiell for gjennomføringen. I tillegg ønsker vi å takke følgende personer.

Ole Aunrønning (NTNU): for god assistanse til det praktiske arbeidet under laboratorieundersøkelsene.

Noralf Bakken (SINTEF): for gode innspill og assistanse under laboratoriarbeidet.

Jon Ivar Belghaug Knarud (NTNU): for gode innspill i oppstartsprosessen.

Trondheim 10. juni 2014

Dilush Dennis Joseph og Jonas Lundli Buan

Sammendrag

I løpet av de siste tiårene har en holdningsendring i samfunnet sørget for strengere krav til generelt energiforbruk. Fokuset rundt oppgradering av den allerede eksisterende bygningsmasse har økt kraftig. En betydelig andel av denne bygningsmassen er historiske murbygg der det må tas hensyn til de arkitektoniske og estetiske verdiene ved vurdering av rehabilitering. Dette skaper mange fukttekniske komplikasjoner og behovet for å kunne estimere fuktforløpet i slike bygg er blitt en nødvendighet.

Denne rapporten tar for seg væsketransporten i murverk og begrenser seg til primært å omhandle det kapillære vannopptaket. Det var ønsket å belyse hvordan kontaktflaten mellom mørtel og tegl, omtalt i denne rapporten som *heftsonen*, hadde innflytelse på kapillært vannopptak og dette har blitt gjort gjennom litteratursøk, laboratorieforsøk og numeriske simulasjoner.

- Litteratursøket har resultert i et teoretisk bakgrunn-kapitel som presenterer egenskaper og karakteristikk til teglstein, mørtel og heftsonen som har påvirkning på vanntransporten i en murkonstruksjon. Andre aspekter som har innvirkning på vannabsorpsjonen har også blitt undersøkt, slik som puss-systemer, impregnering og mureteknikker.
- I laboratoriet har densitet vannabsorpsjon, minuttug, kapillær vannabsorpsjon og skjærfasthet blitt målt på teglstein, mørtel og oppmurte pilarer av de nevnte materialene.
- Flere numeriske simulasjoner ble utført ved hjelp av laboratorieresultatene for å bestemme materialparameterne som hadde innvirkning på modelleringen av væsketransporten. Det ble også gjort en undersøkelse av mulige teorier for modellering av heftsonen i et numerisk simulasjonsverktøy.

I den teoretiske bakgrunnen kommer det frem at flere studier diskuterer heftsonens innvirkning på fukttransporten men dette er ofte i sammenheng med omfordelingen av væske i materialet. Ingen studier ble funnet som diskuterer heftsonens bidrag til hastigheten på det kapillære vannopptak. Laboratorieundersøkelsen viste at forskjellige muringsteknikker og mørtelsammensetninger har en innvirkning på heftetableringen. Det ble vist at dårlig heft bidrar til et raskere vannopptak men har liten innvirkning på mengde absorbert vann. Prøvestykkene som hadde fuktet teglstein under muringen hadde den beste heftetableringen. De numeriske simulasjonene viste at væsketransportkoeffisienten ved 100 % RF var den dominerende parameteren.

Rapporten kommer med følgende konklusjon og forslag:

Heftsonen natur er så kompleks at det er vanskelig å lage en detaljert modell i et numerisk simulasjonsverktøy. En enkel modell slik som et homogent teglmateriale, som har materialeegenskaper modifisert til å ta hensyn til heftsonen og mørtelfugens bidrag, vil kunne estimere virkeligheten med en tilfredsstillende nøyaktighet. Det anbefales å utføre en dypere analyse av metoder for å estimere væsketransportkoeffisienten da det ble klart at tilnærmingen til væsketransportkoeffisienten som ble benyttet ikke var god nok sammenlignet med virkelige målinger.

Summary

Over the past decades a change of attitude towards energy consumption in society has ensured stringent requirements for use of energy and focus around the importance of the upgrade of the existing building stock has increased. A significant proportion of the building stock is historic brick buildings, in which case the architectural and aesthetic values must be taken into consideration when planning a renovation. This creates a lot of complications regarding heat and moisture and the need to estimate moisture transport in such buildings has become a necessity.

This report has focused on the liquid transport in masonry and has been limited to primarily deal with the capillary water uptake. It was important to investigate how the interface between mortar and bricks, referred to in this report as an *adhesion zone*, influenced the capillary water uptake. This has been done through literature surveys, laboratory experiments and numerical simulations.

- The literature survey resulted in a *theoretical background* chapter that presents properties and characteristics of the brick, mortar and adhesive zone that have influence on the water transport in masonry structures. Other aspects that affect water absorption have also been investigated, such as plaster systems, waterproofing and building techniques.
- In the laboratory density, initial rate of absorption (*IRA*), capillary water absorption and shear strength were measured on brick, mortar and masonry specimens of the aforementioned materials.
- Several numerical simulations were performed to determine, using the laboratory results, material parameters that affected the modeling of liquid transport. It was also carried out an investigation of possible theories for modeling the adhesion zone in a numerical simulation tool.

The theoretical background reveals that several studies discussing the impact of the adhesion zone on moisture transport but this is often only associated with redistribution of fluid in the material. No studies were found that discussed the adhesion zones contribution to the rate of the capillary water absorption. Laboratory investigation showed that different masonry techniques and mortar compositions have an impact on the degree of contact at the interface. It was shown that poor adhesion contributes to a faster rate of water absorption but have little impact on the amount of absorbed water. The specimens that had pre wetted bricks during the curing had the best interface contact. The numerical simulations showed that the *liquid water transport coefficient* at 100% RH was the dominant parameter.

The report makes the following conclusions and suggestions:

The adhesion zones nature is so complex that it is difficult to make a detailed model in a numerical simulation tool. A simple model would be able to estimate real measurements just as accurate, such as a homogeneous brick material which has material properties modified to take into account the contribution from the adhesion zone and the mortar joint. It is recommended to perform a deeper analysis of methods for estimating the liquid transport coefficient when it became clear that the used approach in this report were not good enough when compared to real measurements.

Innholdsfortegnelse

Forord	III
Sammendrag	V
Summary	VII
Innholdsfortegnelse	IX
Figurliste.....	XI
Tabelliste	XIV
1 Introduksjon	- 1 -
1.1 Bakgrunn	- 1 -
1.2 Tidligere arbeid.....	- 2 -
1.3 Formål og problemstilling	- 3 -
1.4 Omfang og begrensninger	- 3 -
1.5 Leserveiledning	- 4 -
1.6 Klimapåkjenninger	- 5 -
2 Teoretisk bakgrunn	- 9 -
2.1 Teglstein	- 9 -
2.2 Mørtel	- 11 -
2.3 Impregnering	- 17 -
2.4 Puss.....	- 21 -
2.5 Fukttransport i murverk	- 23 -
2.6 Håndtering av væsketransport i numeriske simuleringer	- 29 -
3 Laboratorieundersøkelser.....	- 37 -
3.1 Valg av materiale.....	- 37 -
3.2 Minuttsug.....	- 40 -
3.3 Densitet og vannabsorpsjon.....	- 42 -
3.4 Kapillær vannabsorpsjon	- 45 -
3.5 Skjærfasthet	- 55 -
4 Numerisk analyse.....	- 59 -
4.1 Erfaringer fra tidligere undersøkelser.....	- 59 -
4.2 Metode	- 60 -
4.3 Simuleringsspesifikasjoner	- 63 -
4.4 Parameteranalyse av teglsteinen og mørtelfuge	- 65 -
4.5 Heftsonetemodeller.....	- 72 -

4.6	Diskusjon	- 80 -
5	Konklusjon	- 83 -
5.1	Videre arbeid	- 84 -
6	Kilder	- 85 -
7	Vedlegg	- 91 -

Figurliste

Figur 1 Årlige slagregnsmengder delt inn i ulike klimasoner (8)	5 -
Figur 2 - Angir slagregnsmengder for alle 10-graders sektorer for 6 byer i Norge i normalperioden 1961-1990 (8).....	6 -
Figur 3 – Slagregnsfordeling over en fasade (9)	6 -
Figur 4 – Normalformat for norskprodusert hulltegl (18).....	10 -
Figur 5 – Bindemidlene som ble mest brukt i mur- og pussmørtler fra slutten av 1800-tallet (24)	12 -
Figur 6 - Skjematisk fremstilling av strukturen til mørtel (20)	14 -
Figur 7 – Forskjellige fugeutforminger (30)	15 -
Figur 8 – Fugetykkelsens sammenheng med vanninntrenging under slagregnsprøving på teglsteinsvegg, utført av Waldum (33).....	16 -
Figur 9 – Kontaktvinkelen til en væskedråpe i trefasepunktet (20)	17 -
Figur 10 – Teglstein impregnert med <i>Surfapore-C</i> (39)	18 -
Figur 11 – Tørkeraten til et impregnert murverk med og uten forskjellig typer innvendig isolering (43).....	19 -
Figur 12 – Vanddamppermeabilitetsmålinger plottet mot <i>grad</i> av skade i forsøk utført av Rouchier (55).....	22 -
Figur 13 De tre desorpsjonsfasene der Q er vanninnhold og t er tid (59)	23 -
Figur 14 – Venstre: Heftsonen for tørrherdet mørtel. Høyre: Heftsonen for våtherdet mørtel (63).....	25 -
Figur 15 - Ufullstendig hydraulisk kontakt mellom material (i) og (ii). Venstre: Naturlig kontakt. Høyre: Luftlag (20).	26 -
Figur 16 – illustrasjon av perfekt hydraulisk kontakt over materialsjiktet mellom to porøse materialer med ulike kapillærtrykk-kurver (20).....	26 -
Figur 17 - Utviklingen til vanninnholdet i en prøve som ikke når kapillær metning i måleperioden (57)	30 -
Figur 18 – Utviklingen til vanninnholdet i en prøve hvor kapillærporene blir fylt opp i måleperioden (57)	30 -
Figur 19 – Kapillærtransportmodellen. Venstre: Kapillærporer etter fjerning av vannkilde. Høyre: Kapillærporer i kontakt med vann (78)	31 -
Figur 20 – Venstre: Fuktlagringsfunksjonen til en kalkmørtel. Høyre: Fuktlagringsfunksjonen til en betong med $v/c = 0,5$ (6).	35 -
Figur 21 – Venstre: Aluminiumsform. Høyre: Muring med aluminiumsform	37 -
Figur 22 - Herding av prøvestykker	38 -
Figur 23 - Forsøksoppsett minuttsug.....	40 -
Figur 24 - Forsøksoppsett for veiing av tegl neddykket i vann.....	43 -
Figur 25 – Venstre: Vannkarets vannpumpe. Høyre: Dreneringssystemet til vannkaret....	45 -
Figur 26 - Forsøksoppsett kapillær vannabsorpsjon	46 -
Figur 27 – Kapillært vannopptak: Middelkurvene til alle prøvene	47 -
Figur 28 - Kapillært vannopptak: Middelkurven til teglsteinsprøvene	47 -

Figur 29 - Kapillært vannopptak: Middelkurvene til mørtelfugene med unntak av <i>KC 50/50</i> avtrukket da den kommer tydelig frem i Figur 27.....	- 48 -
Figur 30 - Kapillært vannopptak: Middelkurvene til pilarene	- 48 -
Figur 31 - Kapillært vannopptak: Middelkurvene til impregnert teglstein samt dens middelkurve i ubehandlet tilstand	- 49 -
Figur 32 – Kapillært vannopptak: Middelkurvene til de impregnerte mørtelprøvene samt deres middelkurver i ubehandlet tilstand	- 49 -
Figur 33 – Teglstein i vannbad.....	- 51 -
Figur 34 - Mørtelfuger i vannbad	- 52 -
Figur 35 - Overflatefukt på pilarer mur med <i>KC 50/50</i>	- 53 -
Figur 36 – Venstre: Trefiberplaten som ble brukt som mellomlegg i opplagerne. Høyre: Forsøksoppsettet i prøvemaskinen etter endt belastning med bruddtype B som resultat....	- 56 -
Figur 37 – Mørtelfuge som har herdet mellom teglsteiner (20).....	- 59 -
Figur 38 - Modellen til <i>metode 1</i> med 5 mm tykke heftsoner i kontaktflatene mellom mørtelfuge og tegl	- 61 -
Figur 39 - Modellen til <i>metode 2</i> med 5 mm tykke heftsoner i kontaktflatene mellom mørtelfuge og tegl. Heftsonematerialene er inntrukket 20 mm.....	- 61 -
Figur 40 - Modellen til <i>metode 3</i> med 5 mm tykke heftsoner i kontaktflatene mellom mørtelfuge og tegl. Her er mørtelfugenes tykkelse redusert fra standardtykkelsen 15 mm til 5 mm.....	- 62 -
Figur 41 – Modellen til <i>metode 4</i> , ett homogent materiale.	- 62 -
Figur 42 – Resultatet fra laboratoriemålingene til teglstein omgjort til kg/m^3 sammen med resultatet fra første teglsteinssimulering (T1).	- 66 -
Figur 43 – Resultatet fra laboratoriemålingene til teglstein sammen med resultatene fra teglsteinssimulering T2	- 67 -
Figur 44 – Resultatet fra laboratoriemålingene teglstein sammen med resultatet fra teglsteinssimulering T3	- 68 -
Figur 45 – Resultatet fra laboratoriemålingene til mørtelfuge <i>KC 50/50</i> komprimert omgjort til $[\text{kg/m}^3]$ sammen med resultatet fra første mørtelsimulering (M1).	- 70 -
Figur 46 – Resultatet fra laboratoriemålingene til mørtelfuge <i>KC 50/50</i> komprimert sammen med resultatet fra mørtelsimulering M2.....	- 71 -
Figur 47 – Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – <i>KC 50/50</i> komprimert omgjort til $[\text{kg/m}^3]$ sammen med modellert pilar uten hensyn til heftsonen.....	- 72 -
Figur 48 – Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – <i>KC 50/50</i> komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 1.2.	- 74 -
Figur 49 – Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – <i>KC 50/50</i> komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 1.2 (1 mm) og H 1.3 (10 mm).....	- 75 -
Figur 50 – Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – <i>KC 50/50</i> komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 2.1 og H 2.2.....	- 76 -
Figur 51 – Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – <i>KC 50/50</i> komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 2.3	- 77 -
Figur 52 - Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – <i>KC 50/50</i> komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 3.1 og H 3.2.....	- 78 -

Figur 53 - Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – KC 50/50 komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 4.1 og teglsteinssimulering T3.....	- 79 -
Figur 54 - Kapillært vannopptak: Middelmålinger for alle prøvene	- 96 -
Figur 55 - Kapillært vannopptak for teglsteinsprøvene	- 97 -
Figur 56 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 1A	- 98 -
Figur 57 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 1B.....	- 99 -
Figur 58 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 2A	- 100 -
Figur 59 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 3A	- 101 -
Figur 60 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 3B.....	- 102 -
Figur 61 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 4A	- 103 -
Figur 62 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 1A	- 104 -
Figur 63 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 1B	- 105 -
Figur 64 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 2A	- 106 -
Figur 65 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3A	- 107 -
Figur 66 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3B	- 108 -
Figur 67 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 4A	- 109 -
Figur 68 - Kapillært vannopptak fra impregnerte prøver	- 110 -

Tabelliste

Tabell 1 – Eksempler på materialeegenskaper til vanlige teglsteintyper på det norske markedet (18)	- 9 -
Tabell 2 - Sentrale egenskapsforskjeller ved kalkrike og sementrike mørtler (25)	- 12 -
Tabell 3 – Orienterende verdier for sentrale egenskaper til ulike mørteltyper (26).....	- 13 -
Tabell 4 - Resultater fra impregneringsundersøkelsen utført av Waldum (33).....	- 19 -
Tabell 5 - Gradering av minuttug (60).....	- 24 -
Tabell 6 - Beskrivelse av pilarene	- 38 -
Tabell 7 – Oversikt over hvilke prøver forsøkene ble utført på	- 39 -
Tabell 8 - Resultater minuttugsforsøk	- 41 -
Tabell 9 - Resultater densitets- og vannabsorpsjonsforsøk	- 43 -
Tabell 10 - Resultater fra kapillær vannabsorpsjon av teglstein	- 50 -
Tabell 11 - Resultater fra kapillær vannabsorpsjon av pilarer	- 50 -
Tabell 12 - Resultater fra kapillær vannabsorpsjon av mørtelfuger	- 50 -
Tabell 13 – Resultater fra kapillær vannabsorpsjon av impregnerte prøver	- 50 -
Tabell 14 - Resultater skjærprøving	- 56 -
Tabell 15 - Oversikt over oppbygningen til de valgte rutenettene.	- 63 -
Tabell 16 – Materialeegenskaper til <i>Solid Brick Masonry</i> fra WUFI sin materialdatabase (6).	- 65 -
Tabell 17 – Materialeegenskaper benyttet i simulering T1, utarbeidet fra laboratoriemålingene samt Johansson et al. (5).	- 65 -
Tabell 18 - D_{ws} for simulering T1 og T2	- 67 -
Tabell 19 - D_{ws} for simulering T2 og T3	- 68 -
Tabell 20 - Materialeegenskaper til <i>Lime Cement, Mortar, coarse</i> fra WUFI sin materialdatabase (6).	- 69 -
Tabell 21 - Materialeegenskaper benyttet i simulering M1, utarbeidet fra laboratoriemålingene samt Johansson et al. (5).	- 69 -
Tabell 22 - D_{ws} for simulering M1 og M2	- 70 -
Tabell 23 - Materialeegenskaper til <i>Aerated Clay Brick (density: 600 kg/m³)</i> fra WUFI sin materialdatabase (6).	- 73 -
Tabell 24 - Materialeegenskaper benyttet i simulering H 1.1, utarbeidet fra laboratoriemålingene samt Johansson et al (5).	- 73 -
Tabell 25 - D_{ws} for heftsonesimulering H 2.2 og H2.3	- 76 -
Tabell 26 – D_{ws} teglsteinssimulasjonen og simulering H 4.1	- 78 -
Tabell 27 – Minuttug for liggeflaten og løpersiden til teglsteinsprøvene	- 92 -
Tabell 28 - Nettodensitet teglsteinsprøver	- 93 -
Tabell 29 - Bruttodensitet teglsteinsprøver	- 93 -
Tabell 30 – Vannabsorpsjon teglsteinsprøver	- 94 -
Tabell 31 – Beskrivelse av pilarene	- 95 -
Tabell 32 - Kapillært vannopptak: Middelmålinger fra teglsteinsprøvene[kg/m ²]	- 95 -
Tabell 33 - Kapillært vannopptak: Middelmålinger fra pilarprøvene[kg/m ²].....	- 95 -
Tabell 34 - Kapillært vannopptak: Middelmålinger fra mørtelprøvene[kg/m ²].....	- 96 -
Tabell 35 - Kapillært vannopptak for teglsteinsprøvene [kg/m ²].....	- 97 -

Tabell 36 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 1A [kg/m ²]	- 98 -
Tabell 37 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 2A [kg/m ²]	- 100 -
Tabell 38 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 3A [kg/m ²]	- 101 -
Tabell 39 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 3B [kg/m ²]	- 102 -
Tabell 40 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 4A [kg/m ²]	- 103 -
Tabell 41 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3A [kg/m ²]	- 104 -
Tabell 42 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 1B [kg/m ²]	- 105 -
Tabell 43 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 2A [kg/m ²]	- 106 -
Tabell 44 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3A [kg/m ²]	- 107 -
Tabell 45 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3B [kg/m ²]. 1* er den andre fugen fra prøvestykke 3B (1) [kg/m ²]	- 108 -
Tabell 46 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 4A [kg/m ²]	- 109 -
Tabell 47 - Kapillært vannopptak fra impregnerte prøver [kg/m ²]	- 110 -
Tabell 48 - Resultater fra kapillærvannabsorpsjon av teglstein	- 111 -
Tabell 49 - Resultater fra kapillærvannabsorpsjon av pilarer	- 111 -
Tabell 50 - Resultater fra kapillærvannabsorpsjon av mørtelfuger	- 111 -
Tabell 51 - Resultater fra kapillærvannabsorpsjon av impregnerte prøver	- 111 -
Tabell 52 - Resultater fra skjærprøvingene	- 112 -

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

1.1.1 Generelt

Klimadebatten har eskalert betydelig over de siste tiårene og ettersom holdninger i samfunnet endrer seg blir det lagt stadig større press på myndigheter og private sektor til å bevege seg mot en uavhengighet fra fossile brennstoff (1). Denne holdningsendringen har satt i gang flere nasjonale og internasjonale tiltak som stiller strenge krav til både hvilke energikilder som skal brukes og til det generelle energiforbruket. Storparten av de byggene som er i bruk om 20 år er bygd allerede og renovering av denne eksisterende bygningsparken står som en stor og viktig utfordring for å møte strengere energikrav. Ikke bare må disse byggene senke energiforbruket for å nå de strenge kravene for fremtiden, men de må også klare å tilfredsstille de stadig økende kravene til innvendig klima og komfort.

I store deler av Europa og Nord-Amerika er historiske murbygg en stor andel av de allerede eksisterende bygningene og må på samme måte, som resten av bygningsandelen, bli gjenstand for oppgraderingene som må gjøres. Gamle mur- og teglsteinsbygg, som i stor grad ble bygget mellom slutten på 1800-tallet og starten av 1900-tallet, er en type bygninger som er viktig både samfunnsmessig og kulturelt i mange land og burde derfor bevares i den grad det lar seg gjøre. Et av de viktigste tiltakene for å bedre energiytelsen til eksisterende bygg er å etterisolere, noe som gjør at utfordringer dukker opp når arkitektonisk design og generell estetisk verdi på murbygg gjør det uaktuelt å etterisolere på utsiden. I Boverket (2) rapporteres det om at ca. 41 % av de eksisterende byggene i Sverige ikke er skikket til utvendig etterisolering og situasjonen i Norge er antatt til å være veldig lik. Alternativet, som er innvendig etterisolering, er i seg selv er en løsning forbundet med høy risiko. Ikke bare er det ofte utfordringer med gjennomførelse på grunn av kompliserte utforminger innvendig, men i kaldere klima vil den nedsatte temperaturen i selve murverket føre med seg mange fukttekniske problemer.

Når innvendig etterisolering velges betyr dette at muren må stå eksponert for utendørsklimaet, mer eller mindre ubeskyttet (usynlig overflatebehandling eller maling som passer inn med arkitekturen kan i noen tilfeller benyttes). Dette stiller krav til både materialegenskapene til murverket og i hvilken tilstand den befinner seg i mht. skader og oppsprekking. I undersøkelser utført av både Straube et al. (3) Künzel (4) konkluderes det med at innvendig etterisolering må kombineres med tiltak på utvendig fasade for å redusere fuktskader knyttet til regnpåkjønning og lekkasjer. En korrekt vurdering av tilstanden og spesifikk informasjon om materialegenskapene til det anvendte murverket er ofte vanskelig å anskaffe, men er absolutt nødvendig å kunne gjøre en vurdering om innvendig etterisolering er et bærekraftig alternativ.

1.2 Tidligere arbeid

Denne oppgaven har vært en videreføring av prosjektoppgaven skrevet av forfatterne høsten 2013. Ideen bak oppgavene kommer som følge av at det har vært en merkbar mangel på kunnskap rundt gjennomføringen av etterisolering av historiske murbygg i byggebransjen. Prosjektoppgaven gjorde et forsøk på å kartlegge hvordan innvendig etterisolering av historiske murbygg burde utføres og hvilke faktorer som gav størst innvirkning på fukttilstanden i vegg etter rehabiliteringen. Gjennom en kombinasjon av litteraturstudier og numeriske simulasjoner ble det konkludert med at det klima konstruksjonen ble utsatt for og materialegenskapene til murverket var så dominerende faktorer at det ikke hadde noen hensikt å undersøke andre innvirkninger videre før god nok kunnskap på disse områdene var på plass. Noe av det forfatterne la godt merke til under det tidligere gjennomførte simuleringsarbeidet, var at det er en ganske begrenset materialdatabase på teglstein og mørtel, spesielt med tanke på norske typer. Dermed ble det også ønskelig i denne oppgave å bidra med gode målinger på relevante materialer sett med norske øyne.

Det ble naturlig å samkjøre oppgaven med forskning som allerede pågikk ved *NTNU*. *Instituttet for bygg, anlegg og transport (BAT)* ved *NTNU*, *Sintef Byggforsk* og *Chalmers tekniske høyskole* har gjennomført et samarbeidsprosjekt, der en fullskalatesting av en oppmurt yttervegg i laboratoriet ble utført og arbeidet er presentert i Johansson P. et al.(5). Ved å bruke materialer som samstemte med de som ble brukt i det nevnte samarbeidsprosjektet, kunne måleresultater fra disse forsøkene benyttes i denne oppgaven slik at en bredere numerisk analyse var mulig. Teglsteintypen som ble brukt i denne oppgaven var hulltegl mens den som ble brukt i fullskalatesten var massivtegl. Selv om hullene åpenbart påvirket romdensiteten var det utover dette ingen forskjell på materialene. Mørtelen som ble brukt i fullskalaforsøket var en kalk- og sementmørtel, med 50 % kalk og 50 % sement, som ble valgt på grunn av dens lignende hygroskopiske egenskaper med den mørtelen som ble brukt i historiske bygninger i Norge. I målingene presentert i denne oppgaven er også denne mørtelen benyttet.

1.3 Formål og problemstilling

Hovedmålet med denne oppgaven har vært å undersøke hvordan en murkonstruksjon, utsatt for et norsk klima, best mulig kan modelleres med tanke på fuktopptak og fukttransport. En murkonstruksjon er kompleks og sammensatt og for best mulig å kunne si noe om fukttegenskapene for et murverk er det nødvendig å gjøre gode laboratoriemålinger. Tidligere utførte litteraturstudier indikerer at heftsonen mellom teglstein og mørtel har en innvirkning på det fukttekniske i en murkonstruksjon. Det var derfor ønskelig å kunne observere en direkte effekt av heftsonen i laboratorieresultatene, samt å observere hvilken innvirkning forskjellige håndverksteknikker under muringen hadde å si for vannopptaket og heftsonens ytelse. Det var også ønskelig å kunne gjøre etterberegninger med et numerisk simulasjonsverktøy for å kunne bestemme materialelegenskaper, i forbindelse med fuktopptak, til murverket.

I forarbeidet til oppgaven ble det formulert tre problemstillinger som oppgaven ble bygget rundt og har forsøkt å besvare på en best mulig måte.

- Hvordan blir heftsoneproblematikken tatt for seg i litteraturen?
- Hvordan synliggjøres effekten av heftsonen i et laboratorieforsøk og hvordan påvirkes heft og vannabsorpsjon av forskjellige materialelegenskaper og mureteknikker?
- Hva er de mest innflytelsesrike simuleringstekniske tiltak som kan gjøres for å bedre kunne simulere reelle situasjoner, når det kommer til murkonstruksjoner?

1.4 Omfang og begrensninger

Laboratorieundersøkelsene gjort i denne oppgaven begrenser seg til materialenes frie vannopptak som igjen bestemmer noen viktige materialelegenskaper slik som den kapillære vannabsorpsjonskoeffisienten og mettet vanninnhold. Dette har vært tilstrekkelig for målet med denne oppgaven, men for å skaffe et eksakt bilde på fuktbevegelsene i et murverk, eksponert for et klima over en lengre periode, er det nødvendig med flere målinger som krever komplisert og kostbart utstyr. Med den tids- og kostnadsbegrensningen som foreligger denne masteroppgaven ble det dermed nødvendig å benytte materialelegenskaper fra tidligere forsøk og eksisterende materialdatabaser i den numeriske analysen. Disse egenskapene er basert på informasjon fra produktdatablad fra de aktuelle produsentene, fra erfaringsdata tidligere samlet ved *NTNU* eller eksisterende data fra materialregisteret til det benyttede beregningsverktøyet for fukt- og varmetransport (*WUFI*) (6).

Da denne oppgaven kun studerer murverkets materialelegenskaper i direkte kontakt med utvendig klima blir ikke påvirkningen av puss og andre materialsjikt verken utvendig eller innvendig undersøkt. Usynlig impregnering var allikevel en form for overflatebehandling som ble ansett som relevant da det er en behandlingsmåte som ikke endrer utseende til fasaden. Det ble derfor gjennomført en absorpsjonsmåling på teglstein og mørtel som var behandlet med en silisiumbasert impregnering.

Tykkelsen på prøvestykkene benyttet i laboratoriearbeidet var tilsvarende det av en halvsteinsvegg. Ved valg av en større tykkelse ville dette introdusert nye materialsjikt som igjen ville hatt stor innvirkning på hvordan en numerisk modell kunne blitt tilpasset. For å ta dette i betraktning må en utvidet numerisk analyse finne sted.

1.5 Leserveiledning

Denne delen gir en oversikt over hvordan rapporten henger sammen og skal klargjøre eventuelle tolkbare formuleringer slik at misforståelser kan unngås.

Rapporten er skrevet med en antagelse om at leseren har en bakgrunn innenfor faget bygningsfysikk og grunnleggende begreper innen fukt- og varmetransport er dermed ikke forklart nærmere. En mer komplett og utfyllende oversikt over fukt- og varmetransporten som opptrer i bygningsmaterialer er å finne i *Fukt i Bygninger, Håndbok 50 (7)*.

1.5.1 Rapportens oppbygning

Rapporten er bygd opp av tre deler med en felles konklusjon som avslutning. De tre delene er:

- Teoretisk Bakgrunn
- Laboratorieundersøkelser
- Numerisk analyse

Laboratorieundersøkelsene og de numeriske analysene blir kommentert i sine respektive deler, men diskusjonen rundt de numeriske analysene ble gjennomført med en direkte sammenligning med laboratorieundersøkelsene.

Teoretisk bakgrunn

Her blir eksisterende teori som er funnet relevant presentert. I denne delen av oppgaven begrunnes valgene av materialer, teknikker og metoder som er brukt i laboratorieundersøkelsene og den numeriske analysen. Informasjonen som finnes i dette kapitlet stammer fra diverse litteratursøk utført av forfatterne og ingen personlige synspunkter, oppfatninger eller tanker fra forfatterne er inkludert her.

Laboratorieundersøkelser

Laboratorieundersøkelsene ble utført på tre typer prøvestykker. De første to prøvestykkene var teglsteinen og mørtelfugen isolert. Den tredje typen var oppmurte piler som besto av tre teglsteiner murt oppå hverandre med mørtelfuger i mellom. Den tredje typen prøveeksemplarer vil videre i rapporten bli omtalt som piler og prøvestykker er en fellesbetegnelse som blir brukt for alle tre typene.

Numerisk analyse

Den numeriske analysen ble gjennomført på to måter. Først ble materialparameterne for teglsteinen og mørtelen bestemt med ved hjelp av laboratorieresultatene fra teglsteinen og mørtelfugene isolert. Deretter ble en analyse av fire forskjellige metoder for å bestemme karakteristikken til murverket i sin helhet gjennomført ved hjelp av laboratorieresultatene fra pilarene.

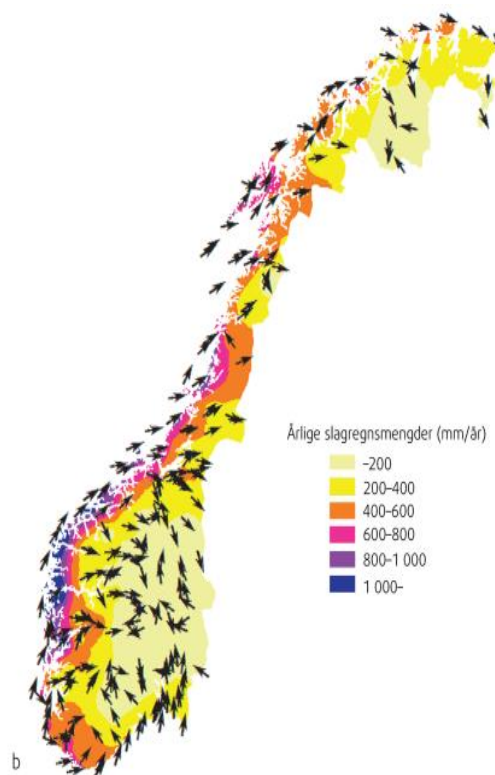
1.6 Klimapåkjenninger

Ved siden av murverkets materialegenskaper er klima den faktoren som har størst innvirkning på fuktforløpet i en murkonstruksjon. Gode kunnskaper om det aktuelle klimaet for konstruksjonen er essensielt for valg utforming og løsninger. Som et supplement gis det her en innføring i viktige klimaforhold som må tas hensyn til ved fuktdimensjonering av murkonstruksjoner

1.6.1 Slagregn

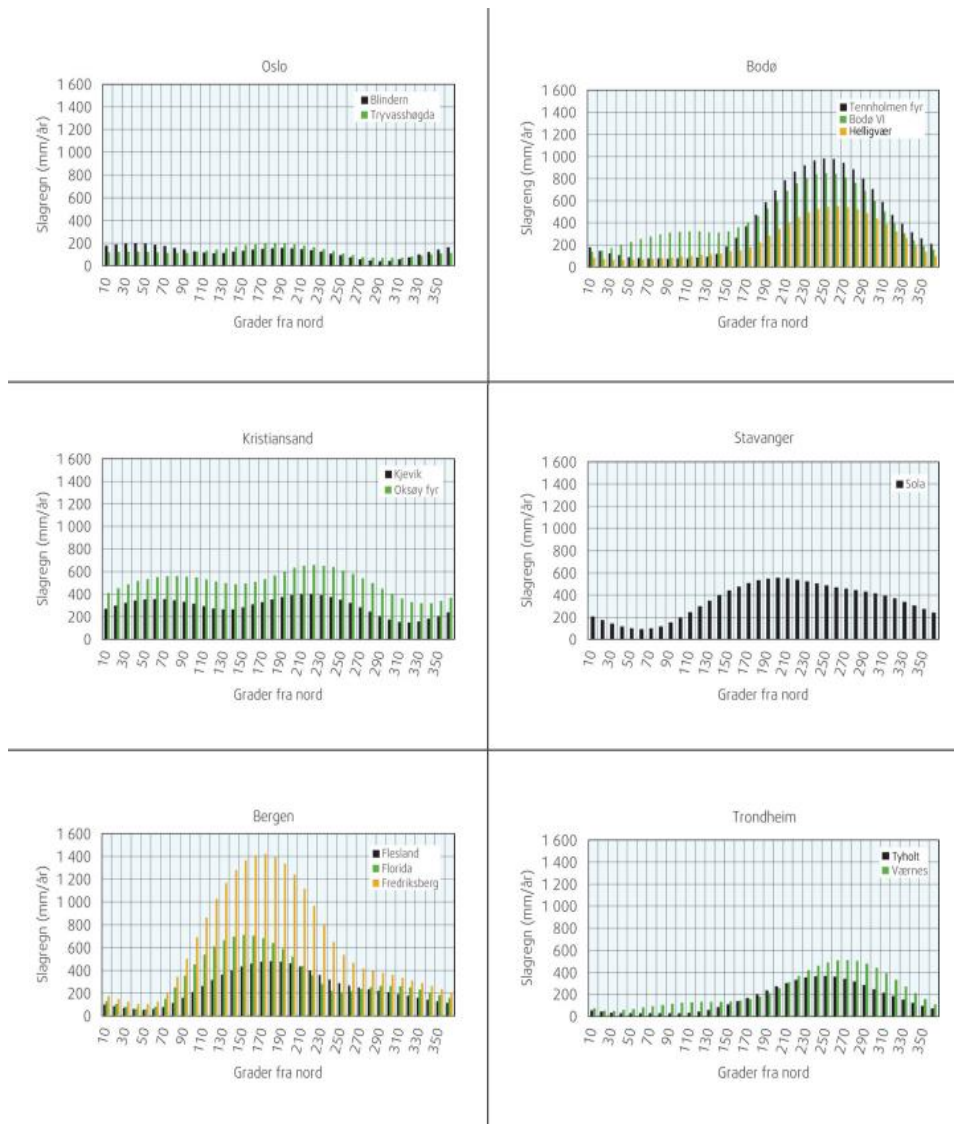
Generelt

Erfaringer viser at korte og harde vindkast sammen med kraftig nedbør oftest gir størst lekkasjefare. Slagregnmengden sørger dermed for egne krav til bygningers detaljer for å hindre inntrengning av vann. Dette gjelder spesielt for yttervegger som åpenbart er svært utsatt. Slagregnmengden varierer mye ut ifra hvor i landet man er og det vil også kunne oppleves store lokale forskjeller innad i en kommune. I Norge eksisterer det ikke omfattende måledata med timesbaserte tidsserier for slagregn med unntak av værstasjonen til *SINTEF Byggforsk* i Trondheim.



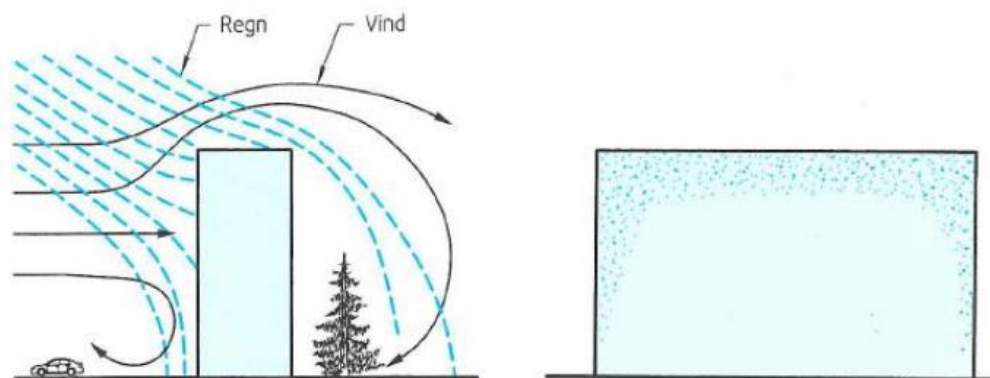
Figur 1 Årlige slagregnmengder delt inn i ulike klimasoner (8)

Figur 1 illustrerer årlige slagregnmengder og pilene viser hovedretningen som gir størst slagregnmengde. Alt over 400 mm slagregn per år er definert som stor slagregnpåkjennning. Som figuren påpeker er det Vestlandet som er mest utsatt med tanke på slagregn, mens innlandet i er minst utsatt. Figur 2 viser et eksempel på variasjon i mengde og intensitet av slagregn ved ulike byer i Norge.



Figur 2 - Angir slagregnmengder for alle 10-graders sektorer for 6 byer i Norge i normalperioden 1961-1990 (8)

Slagregn vil fordele seg ulikt over en fasade og slagregnmengden vil være mindre på nedre del av fasaden sammenlignet med ytterkantene hvor påkjenningen faktisk kan være større enn det slagregnskartet tilser. Dette er vist i Figur 3.



Figur 3 – Slagregnsfordeling over en fasade (9)

Prøvemethoder

Det finnes flere slagregnprøvestandarder men de fleste er tilpasset dører, vinduer og luftede kledninger. I følge *Norges Byggforskning* (10) måles slagregnlekkasje for murverk ved å mure opp et prøvefelt på 0,6 · 1,2 meter, deretter blir sidekantene forseglet og fukt påføres ved hjelp av et slagregnskap. I et lukket slagregnskap er det et konstant overtrykk hvor vanndråper dryppes ned i en luftstrøm som splitter, sprer og penetrerer dråpene inn i murveggen. Prøvebetingelsene innebærer:

- 1) En påsprøytet vannmengde på 10 l/m²h samt 5 timer med et overtrykk på 75 mm vannsøyle.
- 2) En uttørkingsperiode på 5 timer ved hjelp av en tørr luftstrøm langs prøvefeltet.
- 3) 36 timer med kontinuerlig påkjenning som beskrevet i 1).

Vanngjennomgangen oppgis i l/m²h og måles ved å veie veggen etter påkjenningen. Metoden er tidkrevende og kostbar. Det er et viktig poeng at murverk krever lengre slagregnsbelastningen enn andre porøse materialer som for eksempel betong.

Kitt- og glassplate-metoden er en forenklet metode for måling av slagregnslekkasje. I forsøk utført av Madsø (11) blir et mindre parti av murverket undersøkt og utsatt for et lokalt vanntrykk fra en kitt- og glassplatelomme som fylles med vann. Eventuelle lekkasjer vil da bli avslørt ved å se på endringen i vannstanden samt hastigheten til det synkende vannspeilet. Vannlommens dimensjoner er standardisert ettersom trykkehøyden påvirker lekkasjemengden.

1.6.2 Klima i beregningsmodeller

Håndteringen av klimadata i numeriske simuleringsverktøy er essensiell for å kunne oppnå gode og realistiske beregninger. De klimadata som blir benyttet må sørge for meningsfulle grensebetingelser for materialer som kan forventes ved aktuelle geografiske lokasjoner. Selv om dette ikke er diskutert nærmere i denne rapporten kan det henvises til flere studier som har undersøkt hvordan klima burde modelleres og inkorporeres i simuleringsverktøy (12), (13), (14) og (15).

2 Teoretisk bakgrunn

2.1 Teglstein

Teglsteinen er den største komponenten i et murverk og teglets materialeegenskaper er dominerende for vannopptaket i en murkonstruksjon. Egenskapene til teglsteinen er avhengig av råmaterialet, tilsetninger og produksjonsmetode.

2.1.1 Fremstilling

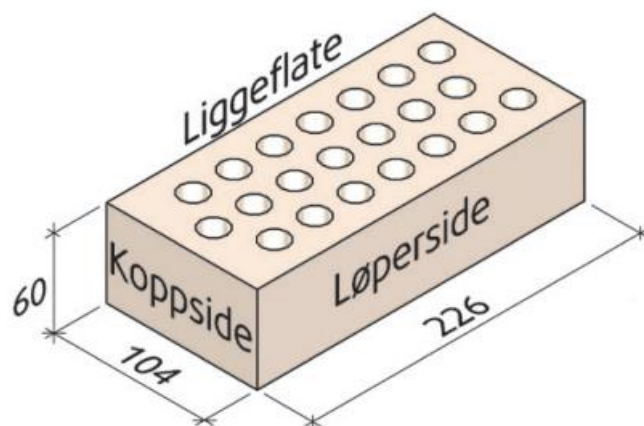
Tegl er et svært bestandig byggemateriale og har vært benyttet i Norge siden slutten av 1100-tallet (16). Teglframstilling var et utpreget håndarbeid hvor en blanding av leirholdig jord, vann og tilslag ble formet i en form. Det var viktig med en god konsistens på massen slik den var lett å presse ut i formen samt, at den slapp formen når den ble vendt, slik at den «sto» uten vesentlige deformasjoner. Ved teglproduksjon på 1950-tallet finnes det dokumentasjon som viser at teglsteinen ble tørket i friluft og ble dekket til med presenning dersom det regnet kraftig. Det samme ble gjort dersom de ble utsatt for mye sol da kun små tørkesprekker var tillatt. For å skjære i rå stein ble det brukt ståltråd (17).

I dag er grunnprinsippene for produksjonen fortsatt de samme, selv om hele prosessen er fullautomatisert, helt fra inntak av råstoff til ferdigstilling av murproduktet. Nå blir leiren formet ved strengpressing (ekstrudering) eller støpning i form og massen blir tørket ved 1100 °C. Rødfargen til den klassiske norske teglsteinen kommer fra jernoksider som blir tilsatt. Dersom man ønsker en annen farge kan andre utvalgte oksider tilsettes leiren. Lys tegl oppnås ved at det tilsettes kalk og det er også vanlig å tilsette noe chamotte (knust tegl), sagflis og sand for å bedre steinens formbarhet samt å øke teglets sugsevne og frostmotstandsevne. Dersom man ønsker tegl med lavere densitet (lett-tegl) tilsettes polystyrenkuler som fordampes under brenning og gir teglsteinen en grovere porestruktur (18). I Tabell 1 er det presentert et eksempel på to teglsteintyper med meget forskjellige materialeegenskaper og som finnes på markedet i Norge.

Tabell 1 – Eksempler på materialeegenskaper til vanlige teglsteintyper på det norske markedet (18)

Betegnelse			Minuttsug	Vann- absorpsjon
Farge	Densitet [kg/m ³]	Trykkfasthet [N/mm ²]	[kg/m ² ·min]	[volum- %]
Rød, brun	2 150	> 45	1,5	10
Rosa, oker, lys	1 750	> 35	4,5	25

Frem til rundt 1890 ble veggene murt massive, men etter hvert ble de erstattet av hulltegl. Fordelene ved dette var en redusert vekt og raskere uttørking, noe som var spesielt viktig i områder utsatt for mye slagregn. Sjansene for frostskaider ble mindre og veggens varmeisoleringssevne ble noe bedre (16). I Norge i dag er nesten all teglstein som produseres hulltegl med hullandel på 20-35 %. Dimensjonen som blir brukt er 226 mm x 104 mm x 60, se Figur 4. Massiv tegl er aktuelt i for eksempel vindusoverdekninger hvor liggeflaten blir synlig, eller ved spesielle krav til brannmotstand eller lydisolering (18).



Figur 4 – Normalformat for norskprodusert hulltegl (18)

2.1.2 Poresystem

Når regnvann har landet på den ytre overflate av en bygning, blir det ledet mot bakken på grunn av tyngdekraften. Vann vil alltid følge den ruten som bruker minst energi og dersom vannet er i kontakt med store kapillærporer med stort nok sug, sprekker eller andre skader i murverket med mindre strømningsmotstand, vil vannet kunne trekke/strømme innover (19).

Et materiales egenskaper når det kommer til fuktbinding og fukttransport er i stor grad avhengig av dets poresystem. I et poresystem er de påvirkende faktorene form, størrelse og fordeling. I teglstein er det vanlig at porediameterne i det relevante porevolumet befinner seg i mellom en størrelses orden på 1 nanometer opp til millimeterdimensjoner. Det er ofte vanlig å dele porene inn i mikroporer (porediameter $< 10^{-8}$ m) og makroporer (resterende). Teglstein med en stor andel mikroporer vil adsorbere mer vann i det hygroskopiske spekteret (omgivelser med RF < 95 %) på grunn av effekten av kapillær kondensasjon (7). Er derimot teglsteinen eksponert for vann i væskeform vil det kapillære trykket i de mindre porene dempe absorpsjonsraten (20). Dette betyr at teglstein og mørtel med en høyere andel makroporer vil ta opp vann raskere. Dette vil være tilfellet så lenge en kilde med flytende vann er tilgjengelig, men om denne kilden fjernes vil omfordelingen av det absorberte vannet i materialet domineres av kapillærkreftene til mikroporene.

Det er utviklet flere metoder for å kartlegge porestørrelsesfordelingen, men den mest vanlige er ved *MIP* (mercury intrusion porosimetry) som måler omfanget av kvikksølvinntrengning i tørt materialet som funksjon av det påsatte hydrostatiske trykket. Alle porer som har et kapillærtrykk som er mindre enn dette hydrostatiske trykket blir fylt av kvikksølv. En omfattende beskrivelse av denne metoden finnes i (20).

2.2 Mørtel

Mørtelens hovedoppgave er å binde sammen teglsteinene i et murverk. Samvirket mellom teglstein og mørtel er avgjørende for murverkets tetthet, bæreevne og fukttransport. For å oppnå best mulig resultat er det derfor viktig at man velger rett mørteltype til den aktuelle teglsteinstypen.

2.2.1 Mørtelkomposisjon og betegnelser

Mørtel er en blanding av forskjellige bindemidler, ofte vann, tilslagsmaterialer og eventuelle tilsetninger. Hvilke typer bindemiddel som brukes avgjør navnet til mørtelen og vanlige mørtelbetegnelser er (21):

- Kalkmørtel (*K*-mørtel)
- Sementmørtel (*C*-mørtel)
- Kalk-sementmørtel (*KC*-mørtel)
- Mursementmørtel (*M*-mørtel)

I tillegg til dette oppgis det vekten til tilslagsmaterialet. En *KC 20/80/440* vil for eksempel være sammensatt av 20 kg kalk (*K*), 80 kg sement (*C*) og 440 kg tilslagsmateriale.

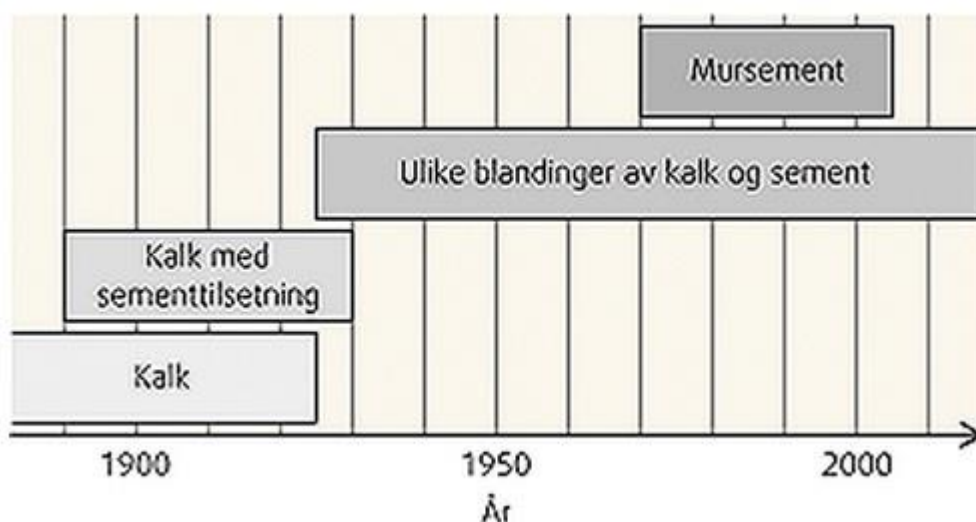
Tilsvarende vil en *M 100/635* bestå av 100 kg bindemiddelet per 635 kg tilslagsmateriale.

Det finnes mørtelklasser som er definert på grunnlag av trykkfastheten alene. Klassene betegnes i følge *NS-EN 998-2* (22) som *M1*, *M2*, *M5*, *M10*, *M15* og *M20* hvor tallet forteller minimumskravet til målt trykkfasthet i N/mm^2 . Dersom mørtelen skal brukes til konstruksjonens ytre vange skal *M5* eller bedre brukes. Dersom veggen blir utsatt for store klimapåkjenninger eller er en del av det konstruktive bæresystemet bør *M10* eller høyere benyttes (23).

Med tanke på konsept deler man mørtel inn i følgende typedefinisjoner:

- Funksjonsmørtler hvor produsentens sammensetning og fremstillingsmetoden blir valgt for å oppnå bestemte egenskaper som for eksempel *M5*
- Reseptmørtel hvor fremstillingen er utført med et forhåndsbestemt blandingsforhold. Mørtelens egenskaper blir antatt ut fra angitte bestanddeler. *KC 20/80/440* er en reseptmørtel (22).

Figur 5 viser de mest dominerende bindemidlene brukt i mørtel fra slutten av 1800-tallet frem til i dag. Da klimaforhold samt overføring av kunnskap var ulik fra landsdel til landsdel, varierte tidspunktet for overgangene fra en bindemiddeltypen til en annen. Frem til 1915 var det karakteristisk med kalkmørtler hvor kalken (CaO) i gjennomsnitt utgjorde 30-40 % av mørtelens vekt (24).



Figur 5 – Bindemidlene som ble mest brukt i mur- og pussmørtler fra slutten av 1800-tallet (24)

Etter 1915 ble det introdusert mer og mer sement i mørtlene. I Tabell 2 presenteres de mest sentrale egenskapsforskjellene som oppnås ved å tilsette kalk og sement i en mørtel.

Tabell 2 - Sentrale egenskapsforskjeller ved kalkrike og sementrike mørtler (25)

Kalkrik mørtel	Sementrik mørtel
Deformerbar	Lite fleksibilitet
Gunstig fukttransport	Langsom fukttransport
Begrenset frostmotstand	Høy bestandighet
Avhengig av tilgangen på CO ₂ for å herde og opprettholde fasthet.	Høy fasthet
Langsom herding	Herder raskt
God heftetabling	Uegnet for svak teglstein

I 1960 årene ble mursement introdusert i Norge. M-mørtler er i likhet med KC-mørtler sammensatt av sement og kalk. Som et resultat av dette får man en mørtel som har god smidighet samt evne til å ta opp bevegelse i tillegg til å ha god fasthet og bestandighet. M-mørtler har derimot en mer finmalt sement samt konsistensforbedrende og luftinnførende stoffer med hensyn på henholdsvis smidighet og frostbestandighet (16).

I Byggforskserien (26) blir det presentert flere parametere som avgjør kvaliteten på mørtelen. Med kvalitet så er det ytelsen til mørtelen med tanke på materialegenskaper som gjelder, men også anvendeligheten er viktig. Når man jobber med en mørtel ønsker man god konsistens slik at den er lett å jobbe med. I Tabell 3 er det presentert noen av de mørtelkvalitetene til muring med orienterende verdier.

Tabell 3 – Orienterende verdier for sentrale egenskaper til ulike mørteltyper (26)

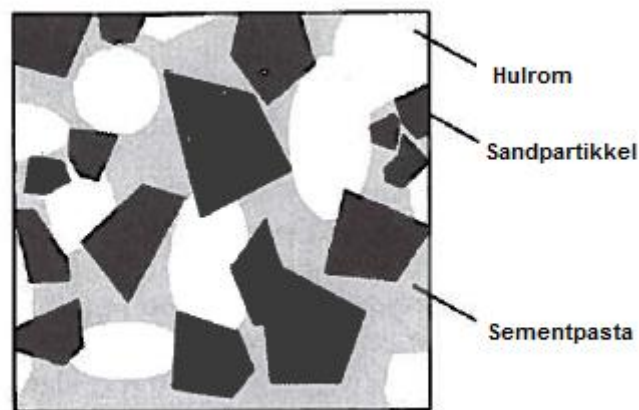
Mørteltype	Vannbehov (v/c-tall)	Luftinnhold (volum %)	Vanntapsmotstand (relativ)	Separasjon (relativ)
C-mørtel	0,7 – 0,8	4-8	Liten	Noe
C-mørtel med silikatstøv	0,7	4-14	Middels	Liten
KC 20/80/440	0,8 – 0,9	4-8	Middels	Noe
KC 35/65/520	1,0	4-8	Middels	Noe
KC 50/50/610	1,2	4-8	Stor	Liten
M 100/380	0,7	12-18	Stor	Liten
M 100/510	0,7	12-18	Stor	Liten

Disse mørtlene representerer noen av de vanligste typene som finns på markedet og det er noen viktige faktorer å ta hensyn til ved vurdering av funksjonalitet. Noen direkte sammenligninger er presentert nedenfor:

- Sammen med vannbehovet er mørtelens evne til å holde på vannet (vanntapsmotstand) en vesentlig parameter. En sterkt sugende stein og en C-mørtel med liten vanntapsmotstand vil føre til at mørtelen herder med et underskudd av vann noe som vil resultere i dårlig heftetabling.
- Med tanke på frostmotstandsevne og smidighet er luftinnholdet av stor betydning. Dersom luftinnholdet overskrider ca. 15 % vil tetthet, styrke og heftfasthet (grad av kontakt) synke. Samtidig vil for lavt luftinnhold gå utover mørtelens frostmotstandsevne.
- Når det kommer til separasjon finnes det flere arbeidstekniske ulemper som kan oppstå. Ved stor separasjon vil konsistensen på mørtelen lett kunne endres og derfor kreve stadig omrøring slik at partiklene i mørtelen holder seg jevnt fordelt. Mens mursement- og kalkmørtler har liten tendens til separasjon, er denne tendensen klart større for sementmørtler.
- Det er stor forskjell på porestrukturen til kalk- og sementmørtler. Kalkmørtler kan deformeres og har gode evner til å ta opp og avgi fuktighet raskt. Dette gjør at kalkmørtler får helt andre bevegelser ved last og fuktendringer enn sementmørtler(27). Sementmørtler har en porestruktur som tillater mindre fleksibilitet noe som kan føre til sprekkdannelser i murbygninger med bevegelse. Til gjengjeld har C-mørtler bedre fasthetsegenskaper og raskere herding.

2.2.2 Poresystem og hygroskopiske egenskaper

Porestørrelsesfordelingen er avhengig av komposisjonen av mørteltypene og hvordan herdeprosessen utarter seg. I en mørtel vil porevolumet i stor grad bestå av hulrom imellom sand og sementpastaen og disse porene vil stort sett være makroporer. I sementpastaen derimot vil det være et nettverk av mikroporer (sand kan antas ikke å inneholde kapillært vann), noe som vil si at en høy bindemiddel-sand-andel vil sørge for mer sementpasta mellom sandkornene og dermed øke andelen mikroporer og senke andelen hulrom. I praksis betyr dette at komposisjonen av bindemiddelet bestemmer hvor kapillært aktiv, eller absorberende en mørtel vil være.



Figur 6 - Skjematisk fremstilling av strukturen til mørtel (20)

Brocken (20) utførte en omfattende studie der flere typer mørtel ble undersøkt for bl.a. porøsitet og kapillær vannabsorpsjon. De forskjellige mørtlene var varianter av vanlig *portlandsement*-mørtel, en *KC*-mørtel og en *M*-mørtel (bindemiddelet besto av sement og kalkstein). Resultatene viste at for *KC*-mørtelen økte porøsiteten og absorpsjonen ettersom *v/c*-tallet økte. Det ureagerte vannet dannet hulrom og dermed økte andelen makroporer som igjen økte vannopptaket. I *M*-mørtelen ble det vist samme økning i vannabsorpsjon da både *v/c*-tallet økte og bindemiddel-sand-forholdet ble senket.

2.2.3 Tilslag og tilsetningsstoffer

Mørtel analyser gjort på mørtler før 1940 viser at eldre mørtler kunne inneholde aske fra kalkbrenning eller knust tegl for å øke mørtelfastheten. Det ble også funnet organisk materiale som dyrerester som gir mørtelen luftporer og dermed bedre frostmotstandsevne og formbarhet (24).

Ved rehabilitering av historisk murverk brukes reparasjonsmørtler som kan bestå av forskjellige typer tilslag og tilsetningsstoffer for å gi mørtelen bedre egenskaper. Noen mer moderne tilsetninger er presentert under.

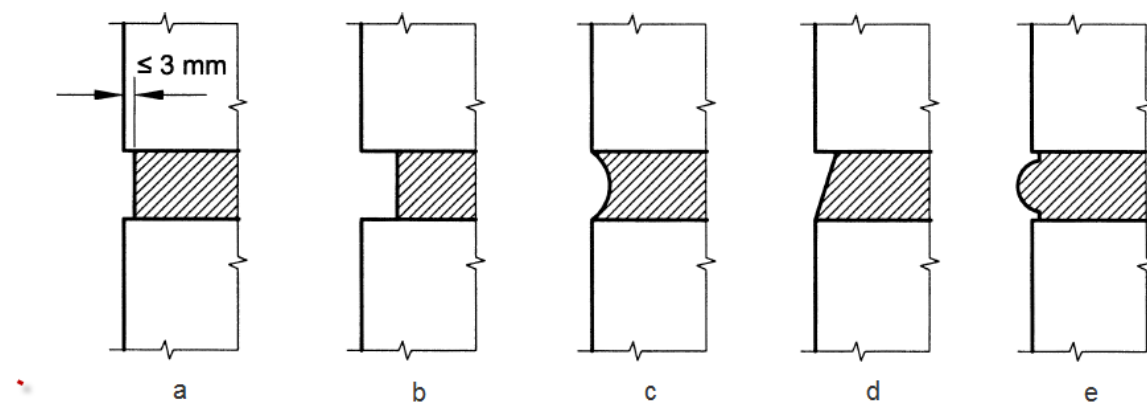
Eksperimentelle resultater fra Corinaldesi (28) sitt forsøk på mørtel med forskjellige typer resirkulert tilslag viste at heften mellom mørtel og teglsteinen ble bedre, sammenlignet med

referansemørtelen. Dette gjaldt spesielt finere tilslag (72 % betong, 25 % mur, 3 % bitumen) fra ombyggingsprosjekter. Til tross for bedre heft blir den mekaniske styrken redusert.

Ved å legge til korte karbonfibre tilsvarende 0,5 masse- % av sementen kan bindingsstyrken mellom mur og mørtel øke med 150 % i strekkapasitet og 110 % i skjærkapasitet, gitt at fugetykkelsen holder seg konstant. Dersom fugetykkelsen får minke fritt grunnet vekten av steinen over øker strekkapasiteten med 50 % og skjærkapasiteten med 44 %. I tillegg til vekten bidrar også tørkesvinn grunnet tillegget av karbonfibre til at fugen krymper (29).

2.2.4 Fugeutforming

En betydelig del av vanngjennomgangen i et murverk går gjennom mørtelfugene. Derfor er det viktig at man velger rett fugetype og rett tykkelse på fugen. For best mulig resultat må utforming av fugene skje mensmørtelen fortsatt er formbar og fersk.



Figur 7 – Forskjellige fugeutforminger (30)

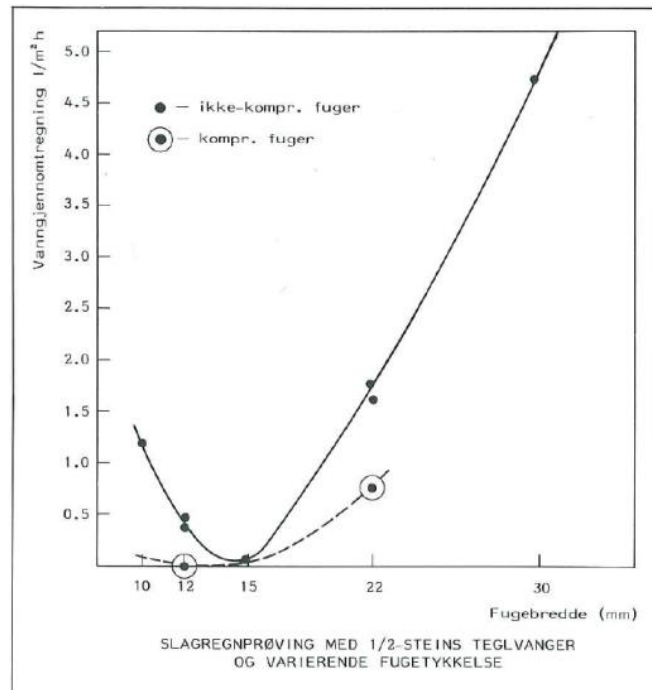
De vanligste fugetypene er illustrert i Figur 7 og omtales i NS 3420-N:2012 (30) som:

- a) Rett fuge avtrukket i plan med vegg
- b) Inntrukket rett fuge, (utkrasset)
- c) Konkav fuge, komprimert
- d) Skrå skyggefuge, komprimert
- e) Pølsefuge

Med tanke på slagregns er det komprimerte fugetyper som gir best tetthet, se c) og d). Slike fuger utføres med et egnet fugeverktøy som presser de ytre luftporene ut slik at fugen blir tett. Rett avtrukne eller utkrassede fuger uten komprimering vil resultere i betydelig større vanngjennomgang da de ofte ikke er tilstrekkelig tette (31). Pølsefugen er en variant som har blitt benyttet på en del av de historiske murbyggene (32).

Waldum (33) utførte et forsøk der ulike fugetykkelser, mureteknikker og mørteltyper samt komprimering av fuger ble sammenliknet opp mot hverandre med tanke på vanngjennomgang. Resultatene viste en sterk økning i vanngjennomgang med fugetykkelser større enn 15-16 mm og tykkelsen burde heller ikke være mindre enn 12 mm som også vil føre til økt vanngjennomgang, se Figur 8. Komprimering av fugene førte til redusert vanngjennomgang sammenliknet med avtrekking i plan med vegg. Videre var det ingen

stor forskjell mellom mørteltype *KC 20/80/440* kontra *M 100/510*, men mureteknikken hadde derimot innvirkning på vanngjennomgangen. Dersom mørtelen ble lagt over stussfugen og hakket ned med skjea (murspaden) ble vanngjennomgangen større enn når mørtelen ble smurt på koppflaten før mursteinen ble lagt ned.



Figur 8 – Fugetykkelsens sammenheng med vanninntrenging under slagregnsprøving på teglsteinsvegg, utført av Waldum (33)

2.3 Impregnering

Impregneringen kan endre relevante materialegenskaper for både teglstein og mørtel og dermed bidra til å redusere vannopptaket i en murkonstruksjon uten synlig å endre overflaten.

Impregnering har tradisjonelt ikke vært så vanlig å bruke grunnet kort varighet. De mest eldre impregneringsmidlene ble fort brutt ned av UV-ståling, sur nedbør samt temperatursvingninger. Nye impregneringer er stadig under utvikling og baserer seg i stor grad på nanoteknologi. De nyeste typene holder seg lenger og gir et bedre estetisk inntrykk, da regn bidrar til å gjøre impregnerte fasader selvrensende. Impregnering er også et energisparende tiltak da økt fuktinnhold bidrar økt energitap når overflaten tørker ut.

2.3.1 Prinsipp

Hovedegenskapen til en impregnering er å forhindre kapillær vannabsorpsjon.

Absorpsjonsraten er avhengig av mengden og størrelsen på porene, porestrukturen og kontaktvinkelen mellom vanndråpene og poreveggen. Det grunnleggende prinsippet for kapillær vannabsorpsjon ligger i den mekaniske likevekten beskrevet av Young-Laplace-likningen for en væske-gass-menisk i en sylindrisk pore (20):

$$p_g - p_l = \frac{2 \sigma}{r} \cos \varphi \quad (1)$$

Hvor:

p_g = trykket i gassfasen [Pa]

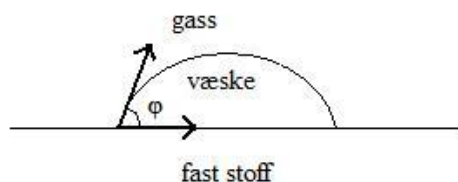
p_l = trykket i væskefasen [Pa]

σ = overflatespenningen [N/m]

r = poreradiusen [m]

φ = kontaktvinkelen [°]

φ er definert som vinkelen mellom tangenten til væske-gas-overgangen og tangenten til væske-faststoff-overgangen konstruert fra punktet der de tre fasene møtes i menisken, se Figur 9.



Figur 9 – Kontaktvinkelen til en væskedråpe i trefasepunktet (20)

For vann er kontaktvinkelen innenfor $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$. Siden kapillærtrykket er definert som trykkforskjellen mellom væske- og gassfasen ($p_c = p_l - p_g$) ser man ut fra likning 1 at dette trykket vil bli negativt for vann og dermed bli tatt opp i materialet. Eksempelvis vil kvikksølv ha en kontaktvinkel mellom 90° og 180° og dermed et positivt kapillærtrykk slik at denne væsken ikke blir tatt opp i porene på materialet. Ved å impregnere en flate øker man kontaktvinkelen til vann til over 90° (ca. 120° - 140°) og på den måten reduserer/stopper absorpsjonsevnen til muren.

2.3.2 Impregneringstyper

Impregneringer kan ha forskjellig struktur og egenskaper. Penetreringsevnen er avhengig av teglsteinens sugeevne, porøsiteten, fuktmetningsgraden, type impregneringsmiddel, type løsemiddel og hvordan impregneringsmiddelet påføres (34). Varigheten er ikke entydig definert men 15 år er imidlertid realistisk å forvente (35).

Impregnering består av en uorganisk del som binder seg kjemisk til poreveggen og en organisk del som støter vannet bort. De vanligste impregneringene er silikonharpiks, silan (polymer) og siloxan (oligomer), og alle er basert på grunnstoffet silisium (36). En kombinasjon av silan og siloxan (35) har også vist gode resultater.

Det samme har impregneringstyper basert på nanopartikler (37). *NanoPhos SA* har utviklet *Surfapore C* som har vist gode resultatet ved prøving mot kloridinntrengning og vannabsorpsjon i prøver utført av *SINTEF*(38). Det er en vannbasert impregnering med frittstående nanopartikler som har alle de viktigste egenskapene til en silikonbasert impregnering i tillegg til å være miljøvennlig.



Figur 10 – Teglstein impregnert med *Surfapore-C* (39)

Silikonharpiks er sammensatt av store molekyler og fungerer derfor godt på tørre materialer med grov porestruktur. Waldum (33) utførte et forsøk hvor resultatene viste at murverk med liten tykkelse på mørtelfugen fikk noe redusert vanngjennomgang når behandlet med silikonharpiks, mens prøvene med stor fugebredde faktisk hadde større vanngjennomgang enn de ubehandlede prøvene, se Tabell 4.

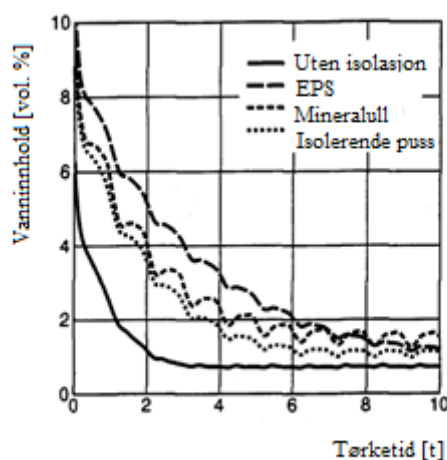
Tabell 4 - Resultater fra impregneringsundersøkelsen utført av Waldum (33)

Fugetykkelse [mm]	Vanngjennomgang [l/m ³]				Kompr. fuger
	«Ubehandlet»		Impregnert		
	KC 20/80	M 100/510	KC 20/80	M 100/510	
10	1,17		0,76		≈ 0
12	0,40	0,47	0,31	0,6	
15	0,03	0,08	≈ 0		
22	1,76	1,62	1,88	1,74	0,75
30	4,69		5,79		

Impregnering påføres nødvendigvis ikke kun på veggens overflate. En metode som innebærer termisk og hermetisk injisering er blitt brukt i *UWM's* laboratorium for bygningsfysikk i *Olszyn* (40). Metoden er basert på å lage en strukturell blokade mot fukt i porestrukturen ved å injisere en termoplastisk sammensetning av parafin voks inn i veggen. Teknologien har fått godkjennelse og anbefalinger av *Building Research Institute i Warszawa* etter vellykkede resultater på historiske bygninger.

2.3.3 Forbehandling

Fukt i et impregnert murverk tørker ved diffusjon gjennom det impregnerte sjiktet (41). Dersom impregneringen ikke har tilstrekkelig høy vanddamppermeabilitet vil fuktighet kunne akkumulere seg i murveggen og det bør velges en dampåpen impregnering. Det stilles imidlertid også krav til veggens fuktinnhold før påføring, noe som fremmer viktigheten av å undersøke fasaden før impregneringen påføres. Sprekker og riss som er dype og gjennomgående (> 1 mm) må fjernes da impregneringsmidler ikke har rissoverbyggende evner. Riss kan medføre lokal nedfuktning som videre kan føre til ytterligere saltutfellinger og skjolder (42). Partier med frostskafer må tas ut og fuger må være velfylte og ha god fasthet. Smuss og saltutfellinger som kan skyldes vannoppsug fra grunnen må også fjernes før behandlingen. Dersom muren skal etterisoleres innvendig bør man påføre impregneringen en stund før isolasjonen legges, da isolasjonen bidrar til å senke uttørkingsraten til muren, se Figur 11 (43).



Figur 11 – Tørkeraten til et impregnert murverk med og uten forskjellig typer innvendig isolering (43).

I følge Nemeč (44) kan man ved hjelp av en kvantitativ nøytronradiografimetode, basert på *imaging plate neutron detectors (IP-NDs)*, gjøre kvasi-sanntidsmålinger av hydrogenholdige materialer som vann og impregneringer. Ved hjelp av konsentrasjonsprofiler kan man bestemme inntrengningsdybde og bevegelseshastigheten på hydrofobe midler i en teglprøve. Videre kan man se på effekten til impregneringen i faseovergangen mellom ikke-polarbundet silikonharpiks og vann, samt og finne effektiviteten til impregneringen ved hjelp av forskjellene i den kjemiske strukturen til silanmonomeren.

2.4 Puss

Pussbehandling av en murfasade er et godt tiltak mot fuktskader da den øker veggens bestandighet overfor klimapåkjenninger (45). Dersom det er ønskelig med et spesielt utseende (overflate struktur, farge) eller mulighet til å rette ujevnheter i underlaget kan en fasadepuss være et godt alternativ. Til tross for positive egenskaper vil murverkets naturlige estetikk tildekkes noe som gjør at det ofte ikke er ønskelig å behandle tidligere upusset murverk av høy historisk og arkitektonisk verdi. Pussbehandling er allikevel en vanlig praksis, spesielt i området med høy klimapåkjenning slik som i store deler av Norge.

2.4.1 Pusstyper og tilsetningsstoffer

De siste årene har det vært en kraftig økning i interessen for kalkpuss. Dett er grunnet en større forståelse for betydningen av å renovere eldre og historiske bygninger med materialer som i størst mulig grad tilsvare de opprinnelige(25). I følge *Marie-Victoire* (46) er kalkbasert puss ikke å foretrekke foran sementbasert puss. Fra et hygroskopisk standpunkt kan sementbasert puss ha samme funksjon som en kalkbasert type. Grunnen til at man bruker en blanding av kalk og sement er blant annet fordi kalk gir bedre feste med muren, men i realiteten er slike kommersielle materialer ofte ikke optimalisert ved alle ytelsesaspekter blant annet grunnet økt porøsitet (47). Ved restaurering av historiske bygninger finnes det likevel strenge krav til bruk av sement da materialet historisk sett ikke er korrekt å bruke. I slike tilfeller blir pozzolan-tilleggsstoffer (slamstein, metakaolin etc.) som har positiv effekt på kalk, brukt til å gjøre pussen mer bestandig (48). For å oppnå en sprekkfri puss med lite svinn som i tillegg er tilpasset fuktbelastninger fra kyststrøk, kreves en mer kompleks sammensetning (49, 50). Pazera (51) demonstrerer at man ved å bruke resirkulert tre eller avisepapir sammen med etterslipt skumisolasjon ikke bare kan redusere vekten med 40 % og tykkelsen med 50 %, men man kan også redusere svinn, forbedre sprekkmotstanden og tillate alternativ armering.

Vejmelková (52) utførte målinger på kalk-metakaolinpuss og sammenlignet materialeegenskapene med kommersielle kalkpusser. Resultatene viste at pussen fikk 3-5 ganger bedre styrkeegenskaper, 25 % reduksjon i vanndamppermeabilitet, 20 % reduksjon i vannabsorpsjonskoeffisient og en høy økning i fryse- og tinemotstand. Den eneste fordelen den beste kommersielle pussen hadde var lavere væsketransport, men kalk-metakaolinpuss kan oppnå samme verdi ved å bruke hydrofoberende tilsetningsstoffer som for eksempel *Zinc stearate* (53).

2.4.2 Pussystemer

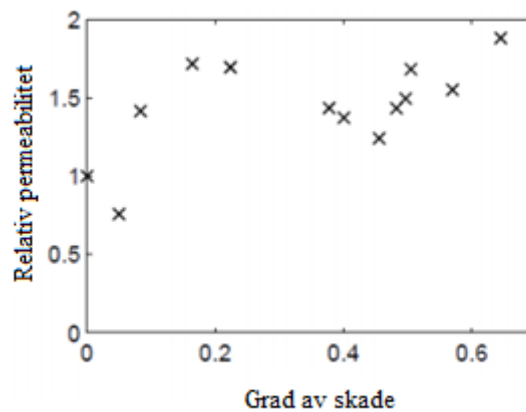
Canada Mortgage and Housing Corporation(54) viste at et 2-lags pussystem hadde tilnærmet like hygroskopisk ytelse som et 3-lags pussystem. Vannabsorpsjonen hadde en marginalt større sikkerhetsfaktor for 3-lags-pussystemet, men begge systemene ble mettet med vann innen noen timer til en dag med kontinuerlig vannpåkjenning.

Kvande et al. (47) testet forskjellige pussystemers kapasitet mot regnpenetrasjon og konkluderte med at grunningssjiktet alltid burde være en sement-basert puss, spesielt ved steder med kraftig nedbør. Med tanke på mye slagregn mente de at et 2-lags pussystem ikke ville være tilstrekkelig og at et 3-lags pussystem måtte brukes. De fleste pusstypene motsto

vannmengden de ble utsatt for alene, men det var vannmengden sammen med luftrykkpåkjenningen som utgjorde den største forskjellen.

2.4.3 Analysering av skadet puss

Rouchier (55) har gjort en studie på en forenklet modell som estimerer den direkte effekten mekanisk nedbrytning har på sementbaserte materialers vanndamppermeabilitet og vanninnhold. Ved å bruke vanndamppermeabiliteten ble utviklingen til vanninnholdet for en hel fuktighetssyklus estimert. Tiltros for at modellen fikk større usikkerhet etter noen få dager med simulering, ble resultatene relativt korrekte. Dette tillater en beleilig og rask sammenligning mellom intakt og skadet materiale og vil dermed gi bedre innsikt i skadede materialers oppførsel. Resultatene viste at vanninnholdet i prøvene fluktuerte med høy amplitude under de daglige fuktighetssyklusene, noe som indikerer økt mekanisk og kjemisk nedbrytning. Videre økte vanndamppermeabiliteten med økt *grad* av skade, se Figur 12. Dette vil påvirke et byggs termiske egenskaper da termisk konduktivitet øker ved økende vanninnhold og densitet (56).



Figur 12 – Vanndamppermeabilitetsmålinger plottet mot *grad* av skade i forsøk utført av Rouchier (55)

2.5 Fukttransport i murverk

I dette kapitlet gjøres det rede for teorien bak de egenskapene som er målt og presentert i denne rapporten. Målingene som ble gjennomført er densitet vannabsorpsjon, minuttug, kapillær vannabsorpsjon og skjærfasthet på teglstein, mørtel og oppmurte pilarer

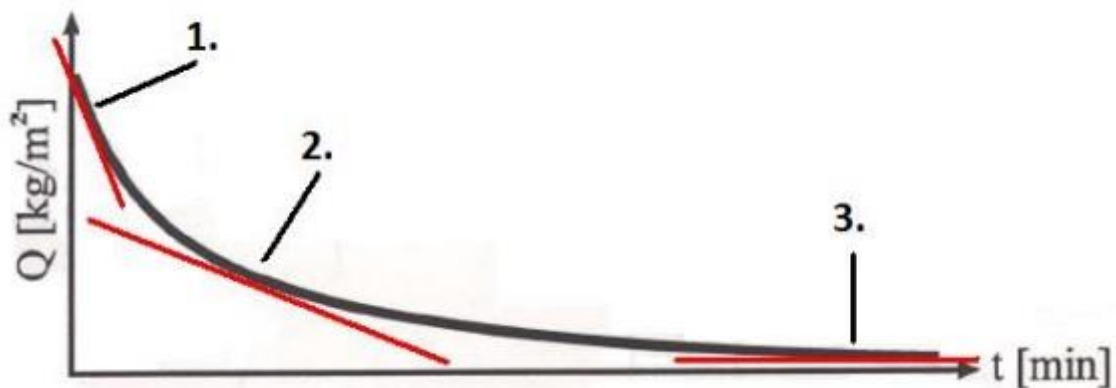
2.5.1 Fuktbevegelse i porøse materialer

Fuktbevegelsen i teglstein, mørtel og andre hygroskopiske materialer er en kombinasjon av damp- og væskestrømmer. Disse strømmene blir i stor grad påvirket av temperatur- og fuktgradienter og egenskapene til materialet strømmen går i. I *EN ISO 15148 (57)* blir fuktbevegelsen inndelt i tre forskjellige stadier.

- 1. Ved lav luftfuktighet skjer fukttransporten utelukkende ved dampdiffusjon. Her kan vanndamppermeabiliteten bestemmes av *dry cup-testen*, som er definert i *ISO 12572 (58)*.
- 2. Ved høyere relativ fuktighet, opp til rundt 95 %, er det en blanding av dampfylte porer og porer med væske. I disse porene skjer transporten ved en simultan strøm av damp og væske. Dette gjør at permeabiliteten, som måles av *dry cup-testen* under isoterme forhold, får en eksponentiell vekst på grunn av væskestrømmen.
- 3. Over 95 % RF, avhengig av materialet, er massestrømmen dominert av transport i væskefasen og kalles ofte det overhygroskopiske området. Dette tilsvarer at materialet blir dyppet i vann eller kraftig fuktet som ved f.eks. slagregn. Sorpsjonen i dette området kan vanligvis ikke bestemmes av sorpsjonskurven og presenteres ofte som en funksjon av kapillærtrykket (*suction curve*).

Når et materiale avgir fukt til omgivelsene skjer det en desorpsjon og grunnlaget for denne prosessen er diffusjon, se Figur 13. Uttørking skjer i tre faser, med følgende inndeling (59):

- Fase 1: materialet er helt vannmettet og fordampningshastigheten er avhengig av hvor raskt luften i omgivelsene rundt kan oppta materialets fuktighet.
- Fase 2: menisker begynner å danne seg i porene og fukttransporten skjer ved kapillærtransport. Ved ytterligere fall i RF vil fukttransporten også skje ved diffusjon.
- Fase 3: mesteparten av fuktigheten er fordampnet og det er ikke lenger meniskdannelse i porene. Fordampningen av den resterende fuktigheten skjer utelukkende ved diffusjon.



Figur 13 De tre desorpsjonsfasene der Q er vanninnhold og t er tid (59)

2.5.2 Kontaktflaten: Fukktransport igjennom materialsjikt

Fukktransport i porøse materialer har blitt nøye studert igjennom de siste 20-30 årene. Fokuset har i lengre tid ligget på å utforme teorier for transporten i individuelle materialer og mye av den tilgjengelige litteraturen og standarder har dette lagt til grunn (20). Det er imidlertid blitt mer og mer tydelig at disse teoriene ikke alltid lar seg anvende der transporten brer seg over flere ulike materiallag og behovet for en bredere forståelse av de komplekse transportmekanismene har blitt større. Et typisk eksempel på dette er transporten igjennom kontaktflaten mellom teglstein og mørtel i fugene på en murvegg.

Vannekstraksjon fra mørtelen under muring

Teglsteiner er relativt dampåpne og de har høy absorpsjonsevne, mens mørtel er mer damptett med lav absorpsjonsevne. For å oppnå god heft er det viktig at teglsteinen og mørtelen har kompletterende samvirkeegenskaper (60). Dette innebærer at mørtelen har vanninnhold, konsistens, porestruktur og vanntapsmotstand avstemt etter steinens sugsevne da grunnlaget for god heft dannes i de første minuttene etter at steinen er kommet i kontakt med fersk mørtel. Minuttsug er en særdeles viktig parameter for heftetableringen da den tar for seg teglsteinens vannopptaksevne det første minuttet den er i kontakt med vann. Denne sugsevnen er gradert og betegnelsene som blir brukt er vist i Tabell 5.

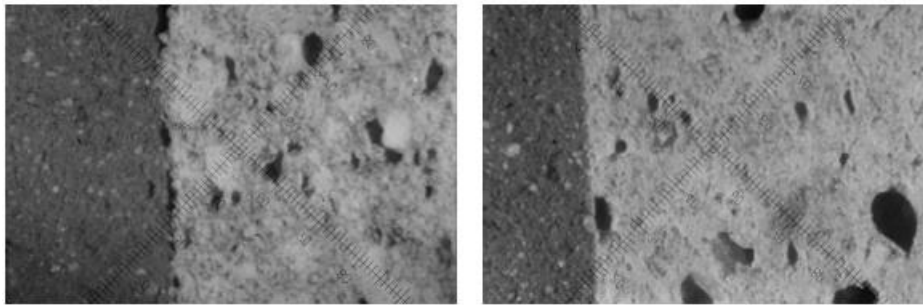
Tabell 5 - Gradering av minuttsug (60)

Sugeevne	Minuttsug (s_1) [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$]
Lavt sug	$s_1 < 1,0$
Moderat sug	$s_1 = 1,0 - 2,5$
Høyt sug	$s_1 = 2,5-4,0$
Meget høyt sug	$s_1 > 4,0$

I arbeidet utført av Madsø (11) blir det anbefalt å bruke teglstein med moderat sugsevne noe som betydde at kalkrike KC-mørtler eller magrere mursementmørtler burde brukes. For lite sugende stein med minuttsug $< 1 \text{ kg}/\text{m}^2$ kan sementrik mørtel med begrenset vanntapsmotstand og stiv konsistens brukes. I undersøkelser utført av Palmer (61) sies det at et slikt lavt minuttsug hindrer steinen i å tappe mørtelen for vann (gjøre mørtelen sprø) og dermed bidrar til bedre utvikling av heft. Videre har teglstein med lavt minuttsug bedre fasthet sammenlignet med teglstein med høyt minuttsug.

Dersom en sterkt sugende stein (minuttsug $> 4 \text{ kg}/\text{m}^2$) er ønskelig, anbefales det å bruke spesialmørtler med tilsetningsstoffer som øker vanntapsmotstanden (cellulosederivater, peraminer o.a.). 1-2 minutters hel neddykking av en sterkt sugende stein i et vannbad kort tid før muring er også en til tak som reduserer sugsevnen og den har vist seg å ha en så gunstig effekt at man kan oppnå samme heftetablering som en moderat sugende stein (60). På byggeplass anbefales det at man senker hele teglpaller (småpaller med 84 stein) ned i en vannbalje ved hjelp av en løfteanordning før muring. Ved overdekninger bør høyt sugende teglstein forvannes, spesielt i alle de tre nederste skiftene. Dersom det er vinter må en slik forvanning kombineres med tildekking og oppvarming (62).

Derluyn et al. (63) utførte en detaljert studie om våt- og tørrherdet mørtel sine hygroskopiske egenskaper. Porøsiteten og det kapillære fuktinnholdet viste seg å være større for våtherdet enn tørrherdet mørtel, mens densiteten ble mindre. Da vanndampmotstandsfaktoren er avhengig av porøsiteten, blir mørtler med økt porøsitet også mindre damptette. Med økende porøsitet øker også absorpsjonsevnen til mørtelen. Begge mørteltypene hadde et opprinnelig v/c tall = 0,5, men grunnet teglsteinens fuktopptak sank v/c-tallet til 0,35 og 0,47 for henholdsvis tørr og våtherdet mørtel. I sjiktet mellom teglstein og tørrherdet mørtel ble det derfor funnet synlige luftporer, også kalt komprimeringsporer, mens sjiktet mellom mur og våtherdet mørtel viste ingen porer, se Figur 14. Reduksjonen av mørtelens v/c-tall fører til hurtig komprimering av mørtelen og redusert heft mot muren.



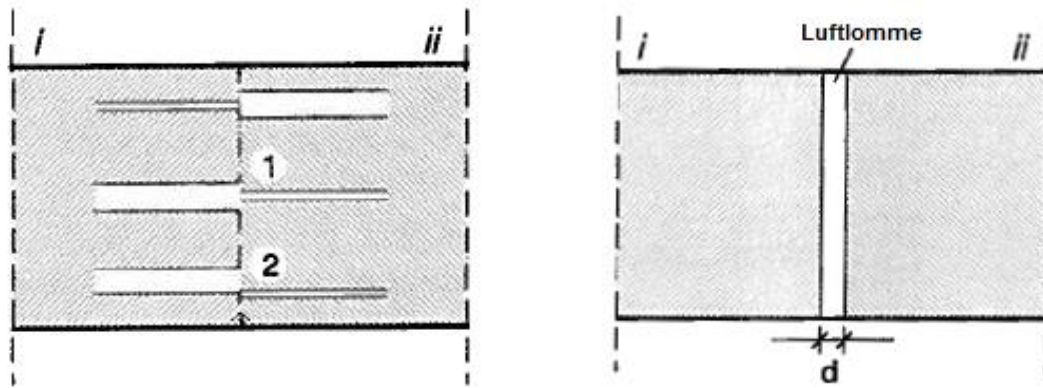
Figur 14 – Venstre: Heftsonen for tørrherdet mørtel. Høyre: Heftsonen for våtherdet mørtel (63).

Hydraulisk kontakt

Antagelsen full kontakt mellom forskjellige materialsjikt er den største usikkerheten som oppstår når teoretiske studier og simuleringer sammenlignes med reelle konstruksjoner. Diskontinuiteten og irregularitetene i kontaktflaten forårsaker områder med fuktlagring og kondensasjon. Hvis det i tillegg etterisolereres innvendig kan situasjonen bli verre da man får et kaldere murverk, økt risiko for kondensasjons og dannelsen av flere grensesnitt hvor skader kan oppstå(64).

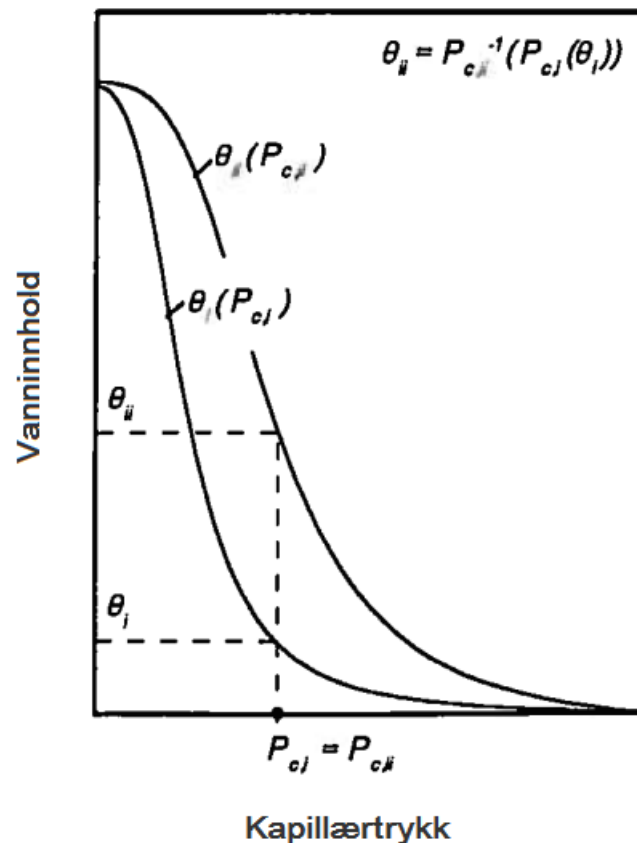
Et murverk er et ikke-homogent materiale som på grunn av muring og pusslegging sørger for at vann må transporteres mellom to (ofte ulike) materialer som er i såkalt *hydraulisk kontakt* med hverandre (65). Hydraulisk kontakt er et fysisk grensesnitt som inndeles i (20):

1. Perfekt hydraulisk kontakt - når de porøse materialene inter-penetrerer hverandre.
2. Ufullstendig hydraulisk kontakt:
 - a. Naturlig kontakt – når de porøse materialene er i fysisk kontakt med hverandre uten inter-penetrering, se Figur 15 til venstre.
 - b. Luftlag – når en luftlomme, typisk noen millimeter bred, eksisterer mellom to materialer, se Figur 15 til høyre.



Figur 15 - Ufullstendig hydraulisk kontakt mellom material (i) og (ii). Venstre: Naturlig kontakt. Høyre: Luftlag (20).

Ved perfekt hydraulisk kontakt blir det antatt et kontinuerlig kapillærtrykk over materialsjiktet og om disse to materialene er like (eksempelvis tegl mot tegl) vil transportlikninger for et monolittisk materiale være gjeldende. For to forskjellige porøse materialer vil man her, om kapillærtrykket plottes mot fuktinnhold, observere et hopp i fuktinnhold men det vil være det samme kapillære trykket i materialsjiktet, se Figur 16.



Figur 16 – illustrasjon av perfekt hydraulisk kontakt over materialsjiktet mellom to porøse materialer med ulike kapillærtrykk-kurver (20)

Ufullstendig hydraulisk kontakt antas å være et resultat av enten naturlig kontakt, et luftlag eller en kombinasjon av disse to. Det er et fenomen som det er blitt gjort mye forskning på og det er flere studier som rapporterer om observasjoner som indikerer en slik effekt (66), (67), (20) og (68). Denne observerte effekten blir modellert slik at selve materialsjiktet blir gitt en egen parameter som blir omtalt som en sjikt-permeabilitet (*interface permeability*), eller som en sjiktmotstand (*interface resistance*). Denne sjiktpermeabiliteten (K_{sjikt}) skal ta hensyn til både naturlig kontakt og luftflommer og kan uttrykkes som:

$$K_{sjikt} = - \frac{q_{sjikt}}{P_{k,ii}(w_{l,ii}) - P_{k,i}(w_{l,i})} \quad (2)$$

Hvor:

K_{sjikt} = sjiktpermeabilitet [s/m]

q_{sjikt} = fuktstrømmen igjennom sjiktet som transporteres fra material i til material ii [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]

P_k = kapillærtrykket ved fuktinnhold w_l . [Pa]

Naturlig kontakt finner sted når to materialer er i fullstendig fysisk kontakt med hverandre men porestrukturen i de respektive materialene passer ikke sammen. Dette betyr at varmeledningen kan anses som uhindret mens fukttransporten ikke kan det. Som vist i Figur 15 (til venstre) kan denne diskontinuiteten i porestrukturen være enten som tilfelle 1 der porene er i full kontakt eller som i tilfelle 2 der de ikke er det. Dette vil føre til en økning (tilfelle 1) eller en toppverdi (tilfelle 2) i kapillærstrømmotstanden i kontaktflaten.

I tilfellet med en luftspalte (Figur 15) imellom materialene vil fuktstrømmen bli transportert igjennom et hulrom med stillestående luft og med en omformulering av likning 2, som utledes i (20), kan sjiktpermeabiliteten uttrykkes som en sammenheng avhengig av tykkelsen til luftspalten og kapillærtrykkkurven, som vist i likning 3.

$$K_{luftlag} = - \frac{\frac{\delta_a \cdot p_{vs}}{d} \cdot \left(e^{\frac{v_1 \cdot P_{k,ii}(w_{l,ii})}{RT}} - e^{\frac{v_1 \cdot P_{k,i}(w_{l,i})}{RT}} \right)}{P_{k,ii}(w_{l,ii}) - P_{k,i}(w_{l,i})} \quad (3)$$

Hvor:

$K_{luftlag}$ = luftlagspermeabilitet [s/m]

δ_a = vanddamppermeabiliteten [s]

p_{vs} = mettet damptrykk [Pa]

d = tykkelsen på luftlaget [m]

v_1 = molart volum til vann i væskefasen [m^3/mol]

R = gasskonstanten [$\text{J/K} \cdot \text{mol}$]

T = absolutt temperatur [K]

Depraetere et al. (68) introduserer *ekte hydraulisk kontakt* som et fjerde begrep innen hydraulisk kontakt. Denne formen for hydraulisk kontakt dannes når mørtel herder i direkte kontakt med et porøst hygroskopisk materiale, slik som teglstein, og er et resultat av den vannstrømsjonen fra mørtelen som oppstår. Denne vannstrømmen vil føre bindemiddelpartikler i mørtelen mot kontaktflaten og i noen tilfeller penetrere teglet. Det vil si at ikke bare vil porestrukturen til mørtelen i nærheten av kontaktflaten bli påvirket, men også porestrukturen til mørtel. Depraetere skriver videre at det ikke lengre er snakk om en *kontaktflate* men en *kontaktzone*. Denne kontaktsonen, med en tykkelse som kan variere mellom 50 μm og 1,5 mm, består av mørtel og tegl med en porestruktur som er forskjellig fra resten av de respektive materialene.

Derluyn (63) observerte i sitt forsøk at kun 20-30 % av overflatearealet av den herdete mørtelen var i god heft med teglsteinen. Det ble forklart med: (a) Poresystemet til teglsteinen samsvarte ikke med poresystemet til mørtelen (poreradiusen til teglet var 100 ganger større enn for porene til mørtelen), altså en naturlig kontakt; (b) en endring i porestrukturen i mellomstjiktet grunnet blokkering av porene som følge av formering av mørtelpartikler i teglporene; (c) en reduksjon i kontaktflaten grunnet komprimeringsporer.

2.6 Håndtering av væsketransport i numeriske simuleringer

I løpet av de siste tiårene har numerisk simulasjon av fukt- og varmetransport blitt en av de vanligste undersøkelsesmetodene og det er blitt utviklet mange verktøy som (69), (70), (71), (72), (73), (74) og (75). Disse har og blitt både utvidet og videreutviklet slik som i (76) og (77).

Væsketransport er en utslagsgivende transportmekanisme for den numeriske modellen. Per tidsenhet kan det transporteres mer enn 10 ganger så mye vann i væskefasen enn det gjør ved dampdiffusjon (78). Det er dermed viktig at bestemmelsen av de koeffisienter som tar hensyn til væsketransporten blir bestemt på en best mulig måte. Dette avsnittet diskuterer metoder for å modellere væsketransporten generelt i numeriske modeller, men det er også lagt hovedvekt på prinsippene som simuleringsverktøyet *WUFI* baserer seg på da dette programmet ble benyttet i den numeriske analysen diskutert senere i denne rapporten.

2.6.1 Absorpsjonskoeffisienten

Vannabsorpsjonskoeffisienten (A_w) er definert som målingen av absorbert vann, i væskefase, inn i overflaten av et materiale. Denne koeffisienten har vist seg å gi en god indikator på materialets væsketransportegenskap. Den europeiske standarden *EN ISO 15148* (57) beskriver metoden for bestemmelsen av A_w som sier noe om hastigheten av kapillær absorpsjon, fra kontinuerlig nedbør eller slagregn.

Vannabsorpsjonskoeffisienten (A_w) er definert som helningen i kurven der akkumulert vanninnhold plottes mot kvadratrotten av tid, se likning 4. Eksempler på hvordan vanninnholdskurven kan utvikle seg er vist i Figur 17 og Figur 18.

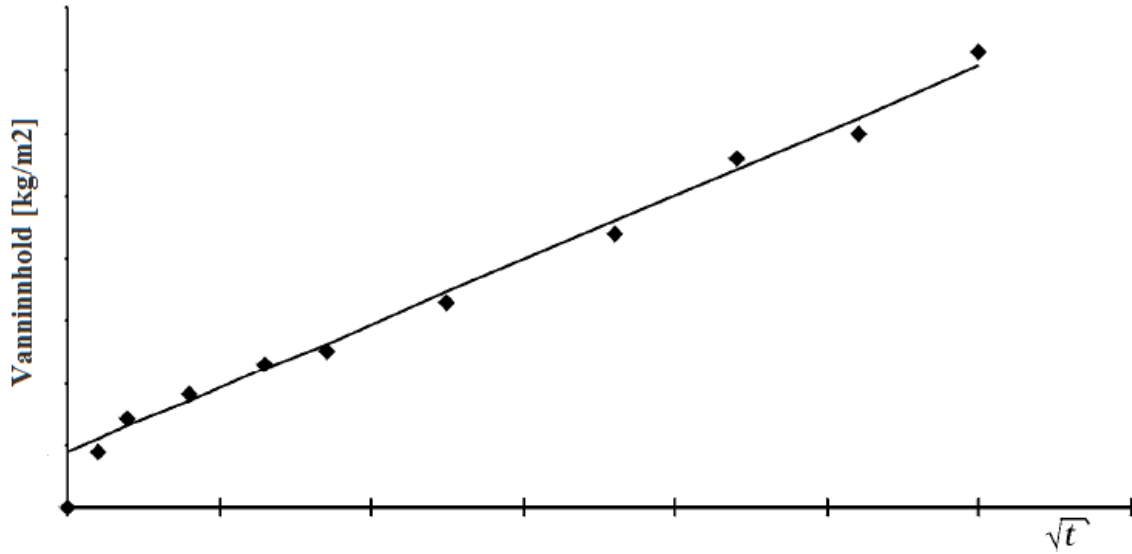
$$i = A_w \cdot t^{0,5} \tag{4}$$

Hvor:

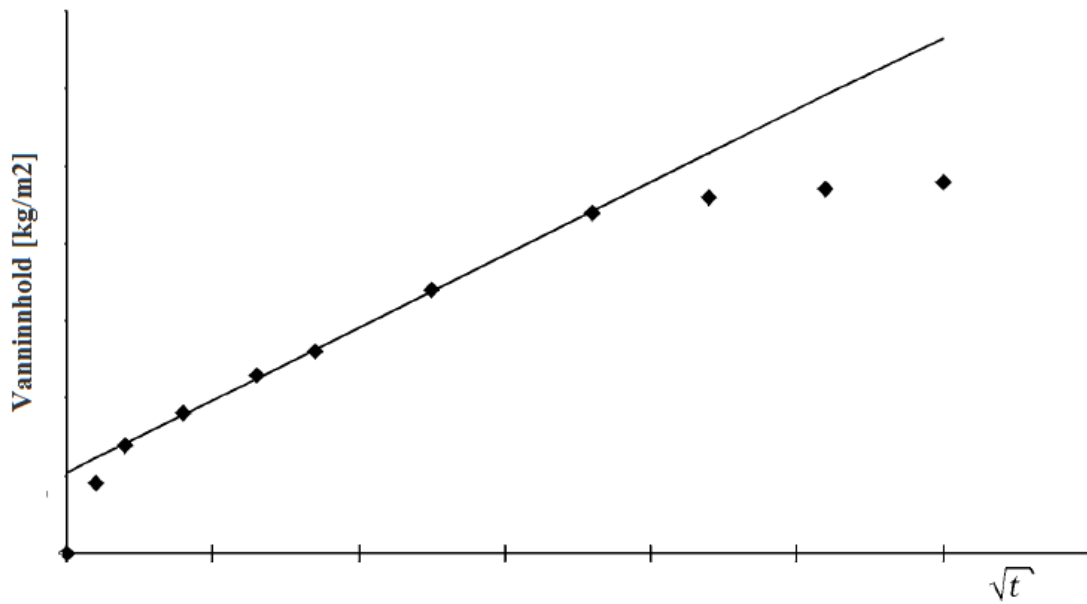
i = vanninnhold [kg/m^2]

A_w = vannabsorpsjonskoeffisienten [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$]

t = tid [$\text{s}^{0,5}$]



Figur 17 - Utviklingen til vanninnholdet i en prøve som ikke når kapillær metning i måleperioden (57)



Figur 18 – Utviklingen til vanninnholdet i en prøve hvor kapillærporene blir fylt opp i måleperioden (57)

Vannabsorpsjonskoeffisienten (A_w) som er beskrevet i den europeiske standarden, og som er benyttet i denne oppgaven, beskriver utelukkende den tidsavhengige absorpsjonen der materialet er i direkte kontakt med vann. Det betyr at denne verdien ikke kan brukes til å beskrive omfordelingsprosessen.

2.6.2 Væsketransportkoeffisienter

Bakgrunn

I undersøkelser gjennomført av Künzel (79) diskuteres det hvorvidt væsketransporten kan bli modellert som et diffusjonsfenomen. Selv om overflatediffusjon og kapillær væsketransport opptrer samtidig, under fukttransporten i det kapillære området, argumenteres det for at sammenhengen vist i likning 5, kan være en god tilnærming til fukttransporten.

$$g_w = -D_w(w) \cdot \text{grad}(w) \quad (5)$$

Hvor:

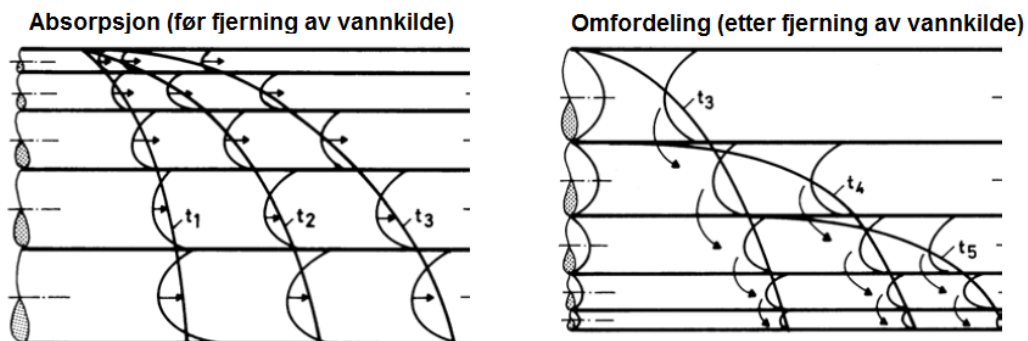
g_w = væskeflukstettheten [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

$D_w(w)$ = væsketransportkoeffisienten [m^2/s]

w = vanninnhold [kg/m^3]

Dette er på grunn av at en diffusjonslikning viser samme relasjon mellom vektøkning og kvadratroten av tid som prosessen under kapillært vannopptak gjør. Som bakgrunn for utviklingen av likning 5 ligger det en antagelse om at poresystemet består av parallelle, sylindriske kapillærporer med varierende diameter. Disse er antatt sammenkoplet uten noen motstand og at trykket i alle porene ved et gitt tverrsnitt er i likevekt. Denne sammenhengen og diffusjonsmodellen underbygges videre av Künzel som utførte forsøk der vanninnholdsprofilene for flere porøse materialer ble gjenskapt med en tilfredsstillende nøyaktighet om det ble brukt en væsketransportkoeffisient som varierte eksponentielt med vanninnholdet.

Det må skilles mellom væsketransport som skjer under oppfukning og væsketransport som skjer under uttørking (78, 79). Dette er to forskjellige grensebetingelser, henholdsvis tilgang på en fuktkilde på overflaten og ikke i kontakt med fritt vann, som fremkaller to forskjellige væsketransportkoeffisienter.



Figur 19 – Kapillærtransportmodellen. Venstre: Kapillærporer etter fjerning av vannkilde. Høyre: Kapillærporer i kontakt med vann (78)

Figur 19 viser en skjematisk fremstilling av kapillærporene både i kontakt med fritt vann (til venstre) og med vannkilden fjernet (til høyre). Som en kan observere vil det formes en ny menisk i porene ved overflaten som ikke lengre er forsynt med vann. Dette stopper allikevel ikke videre vanntransport å fortsette da de mindre porene gradvis vil suge til seg vannet fra de større porene, grunnet den høyere kapillære sugekraften, og vannet vil gradvis omfordele seg i materialet. Siden denne omfordeling skjer primært i de mindre kapillærporene vil transporthastigheten være mye lavere enn ved frie vannopptaket og det er dermed nødvendig med en annen væsketransportkoeffisient under disse forholdene. Væsketransportkoeffisienten som blir diskutert i dette kapittelet deles da inn i følgende to bidrag:

Væsketransportkoeffisient for kapillærsug (D_{ws}): Beskriver opptaket av vann når den absorberende flaten er fullstendig fuktet. Dette kan i den bygningsfysiske konteksten representere regn på en fasade og er den som undersøkes i denne rapporten.

Væsketransportkoeffisient for omfordeling (D_{ww}): Beskriver spredningen av det absorberte vannet etter at fuktingen av den absorberende flaten er avsluttet, dvs. når ikke noe nytt vann absorberes og det resterende vannet i materialet begynner å omfordele seg.

Bestemmelse av væsketransportkoeffisientene

Væsketransportkoeffisientene kan bestemmes ved å måle den transiente vannprofilen til bygningsmaterialet. For å kunne anskaffe slike målinger og profiler er det nødvendig med utstyr som tar i bruk *NMR*-, gammastråling eller mikrobølgeteknikker og slikt utstyr kan på en ikke-destruktiv og kontinuerlig måte, måle både profilet til vannopptaket og omfordelingen, som vist i bl.a. (20, 78, 79). Metoden går ut på at en prismeformet materialprøve nedsenkes delvis i vann og absorpsjonen igangsettes. Etter den har nådd et bestemt fuktinnhold fjernes vannkilden slik at materialet omfordeler vannet rundt i sin porestruktur. Koeffisientene bestemmes deretter ved å etterberegne de målte resultatene via numerisk simulasjon.

I arbeid utført av Binder A., et al. (80) beskrives en ny målemetode kalt *Capillary Condensation Redistribution (CCR) test*, som tar hensyn til ikke-isoterme forhold og motsatt rettet væske og damptransport. Konvensjonelle målemetoder krever isoterme forhold og utføres ved at materialet blir satt i direkte kontakt med vann i væskefasen. Her dominerer væsketransporten i større kapillærporer men den målte væskehastigheten vil ikke være gjeldende ved lavere fuktinnhold eller ved andre fuktingsmekanismer. I denne rapporten er det satt fokus rundt egenskapene i det overhygroskopiske området, dvs. til materialer som normalt er utsatt for store mengde flytende vann og der konvensjonelle målemetoder er tilstrekkelig. Men for å skaffe materialdata som kan beskrive væsketransporten ved alle fuktnivåer er det nødvendig med større nøyaktighet.

De nevnte målemetodene er meget kompliserte og kostbare å gjennomføre og det finnes få kilder som har målinger på materialer gjennomført på denne måten. I det neste avsnittet er det derfor presentert noen tilnæringsmetoder som gjør det mulig å beregne disse koeffisientene baser på laboratoriemålinger som er mindre kostbare.

Tilnærminger til væsketransporten

I store deler av det hygroskopiske området (opp til rundt 50 % RF) er vannmolekylene så sterkt bundet til poreveggene at fukttransport i væskefasen kan neglisjeres. Ved å bruke den målte sorpsjonskurven i det hygroskopiske området for materialene kan væsketransportkoeffisienten beregnes. Dette ble gjort for mange av de vanligste byggematerialene av Krus (78) og det viste seg at alle materialene fikk væsketransportkoeffisienter med en verdi rundt $2,0 \cdot 10^{-10}$. Krus anbefaler derfor å bruke denne som en fiksert verdi til fuktinnholdet ved RF 80 % (w_{80}).

I beregningsprogrammet for fukt- og varmetransports, *WUFI*, plottes verdiene til væsketransportkoeffisientene inn i en tabell i sammenheng med det tilsvarende vanninnholdet. Det har vist seg at for de fleste mineralske bygningsmaterialer kan økningen av D_w , med hensyn på vanninnhold, estimeres med en eksponentiell funksjon som spenner seg over tre tierpotenser. Når disse forholdene gjelder kan relasjonen mellom absorpsjonskoeffisienten og D_{ws} tilnærmes til:

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot (A_w/w_f)^2 \cdot 1000^{(w/w_f) - 1} \quad (6)$$

Hvor:

$D_{ws}(w)$ = væsketransportkoeffisienten for kapillærsug [m^2/s]

A_w = Kapillær vannabsorpsjonskoeffisient [$kg/m^2 \cdot s^{0,5}$]

w = vanninnhold [kg/m^3]

w_f = mettet vanninnhold [kg/m^3]

Med likning 6 kan *WUFI* generere en tabell med estimerte verdier for D_{ws} , og de eneste inndataverdiene som er nødvendig er A_w og fuktlagringsfunksjonen som gir vanninnhold ved tilsvarende RF. Tabellen som genereres gir D_{ws} -verdien for de tre verdiene ved vanninnhold ved RF lik 0, 80 og ved metning. Tilsvarende blir tabellen for omfordelingskoeffisienten (D_{ww}) generert på samme måte, med det unntaket at D_{ww} ved mettet vanninnhold er satt til $D_{ws}(w_f) / 10$, ettersom studier har vist at omfordelingskoeffisienten til de fleste materialer er rundt en tiendedel lavere enn ved kapillærsug (79). Ved å benytte den nevnte tilnærming til væsketransportkoeffisientene, som sier at de er eksponentiell avhengighet til fuktinnholdet, kan *WUFI* bruke en logaritmisk interpolasjon mellom de verdiene som er plottet inn av brukeren.

Det blir spesifisert i *WUFI* sin brukerveiledning (6) at dette kun er en grov tilnærming og selv om den er påvist med god nøyaktighet i flere tilfeller, så gjelder den ikke for alle materialer. Spesielt formen på kurven som genereres kan være meget unøyaktig.

2.6.3 Fuktlagringsfunksjonen

Et kapillæraktivt materiale i kontakt med flytende vann vil ta opp dette vannet helt til det når mettet vanninnhold (w_f). Denne verdien, sammen med vanninnholdet ved 80 % RF (w_{80}), blir i *WUFI* betraktet som standard materialdata siden de er kjent for de fleste materialer (6).

Fuktlagringsfunksjonen i *WUFI* er en tabell som viser den relative fuktigheten og det tilsvarende vanninnholdet i materialet. Tabellen kan innholdet et vilkårlig antall punkter som *WUFI* vil interpolere mellom slik at tilsvarende vanninnhold ved 0 til 100 % RF (som tilsvarer w_f) genereres. Da det er begrensninger rundt målemetodene for bestemmelse av sorpsjonskurven over 95 % RF består fuktlagringsfunksjonen av verdier fra målinger fra både sorpsjonsforsøk (opp til rundt 95 % RF) og trykkplateforsøk (over 95 % RF).

Sorpsjonsisotermer i det hygroskopiske området bestemmes ved å veie materialprøver plassert i ulike RF til likevekt er nådd, slik at likevektsvanninnholdet kan bestemmes. Den ønskede luftfuktigheten kan bli oppnådd enten ved hjelp av mettede saltløsninger eller i klimakamre med tørre og fuktige luftstrømmer(81). For bestemmelse av sorpsjonsisotermer brukes *EN ISO 1257* (58).

Som tidligere nevnt blir sorpsjonen i det overhygroskopiske området blir ofte fremstilt i en *suction curve* eller vannretensjonskurve og den bestemmes av et trykkplateforsøk. Prinsippet bak testen er basert på likevekten som eksisterer mellom overtrykket i trykkplatekammeret og suget under menisken i de vannfylte porene (82). Siden overtrykket kan reguleres med tilstrekkelig nøyaktighet kan man oppnå høy presisjon med tanke på RF. Forsøket bruker prøver med vakuummettet vanninnhold da prøver ved kapillær metning fortsatt inneholder lukkede luftporer. Disse prøvene blir plassert i kammeret hvor de blir utsatt for et kontrollert overtrykk, som medfører at en bestemt mengde porer blir tømt for vann i samsvar med deres porestørrelse. Når likevekten er nådd blir prøvenes fuktinnhold målt ved veing før neste trykksteg settes i gang(83). For bestemmelse av vannretensjonskurven brukes *ISO 11274* (84).

I de tilfeller det ikke eksisterer målinger for sorpsjonen til et materiale er det også her utviklet en tilnæringsmetode. For de fleste materialer kan fuktlagringsfunksjonen, med tilfredsstillende nøyaktighet, estimeres ved funksjonen som beskrives av likning 7.

$$w(\varphi) = w_f \cdot \frac{(b - 1) \cdot \varphi}{b - \varphi} \quad (7)$$

Hvor:

$w(\varphi)$ = fuktinnholdet ved tilsvarende φ [kg/m^3]

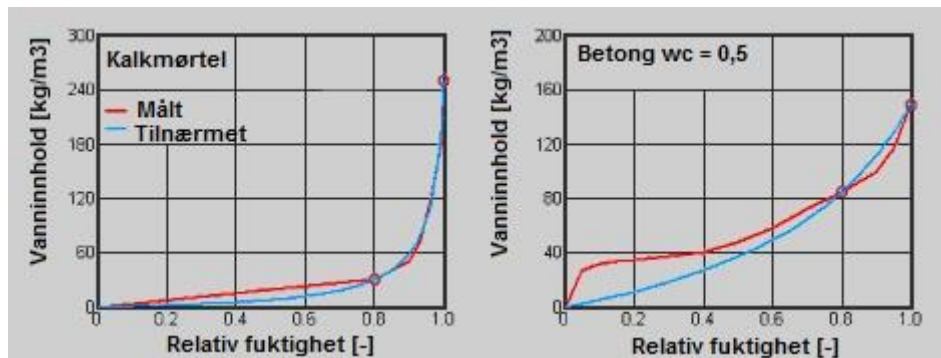
w_f = mettet fuktinnhold [kg/m^3]

φ = Relativ fuktighet [-]

b = tilnæringsfaktor [-]

Her er det tilstrekkelig å spesifisere w_{80} og w_f for at fuktlagringsfunksjonen genereres. Igjen er det viktig å presisere at dette er en tilnærming som ikke passer alle materialer og siden dette er en gjennomsnittssorpsjon vil det for materialer med sterk hysteresis kunne oppstå et større

avvik. I Figur 20 er det vist to eksempler på hvordan fuktlagringsfunksjonen estimeres ved å sammenligne en kalkmørtel og en type betong.



Figur 20 – Venstre: Fuktlagringsfunksjonen til en kalkmørtel. Høyre: Fuktlagringsfunksjonen til en betong med $v/c = 0,5$ (6).

3 Laboratorieundersøkelser

3.1 Valg av materiale

Materialene ble valgt på bakgrunn av materialelegenskaper benyttet av Johansson et. al (5). Flere moderne mørteltyper brukt ble også brukt. Tilgang på materialer, både med tanke på leveringstid og tilgjengelighet, var en begrensende faktor.

3.1.1 Tegl

Det ble til sammen brukt 11 teglsteinsprøver som ble nummererte fra 0 til 10.

- Teglsteinen som ble brukt var av type *Struktur oker lys* som er produsert av *Bratsberg teglverk*. Tegltypen ble valgt da den har samme materialelegenskaper som teglsteinen brukt i samarbeidsprosjektet mellom *BAT*, *SINTEF* og *Chalmers* (5). Den hadde et svært høyt minuttug ($4,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}$) noe som er et karakteristisk trekk for mange eldre tegltyper.

3.1.2 Pilar

Pilarene ble murt opp av tre teglsteiner med mørtelfugetykkelser på 15 mm. Vi murte opp seks prøveserier med fem pilarer i hver serie. Til muring ble det brukt en spesiallaget aluminiumsform til sammenmuringen. Formen gjorde det mulig å mure pilarene under kontrollerte forhold og med samme fugetykkelse, se Figur 21.



Figur 21 – Venstre: Aluminiumsform. Høyre: Muring med aluminiumsform

Prøvestykkene ble murt opp og inndelt i systemet vist i Tabell 6:

Tabell 6 - Beskrivelse av pilarene

Mørtel type	Fugetype	Tilstand på teglstein	Antall prøvestykker
Weber base KC 50/50	Avtrukket ¹	Tørr ³	3
Weber base KC 50/50	Komprimert ²	Tørr ³	5
Weber base KC 35/65	Komprimert ²	Tørr ³	5
Weber Murmørtel M5	Komprimert ²	Tørr ³	3
Weber Murmørtel M5	Komprimert ²	Våt ⁴	5
Weber mix M5 SS	Komprimert ²	Tørr ³	5

Som det går frem av tabellen er det et ulikt antall prøvestykker. Dette er fordi det ble nødvendig å forkaste utvalgte prøvestykker grunnet dårlig heftutvikling under herdeprosessen. Fugene ble ikke trukket av/komprimert på baksiden for at resultatet skulle bli mest mulig likt det som gjøres i praksis. Forsøkene ble utført etter 25 døgn med herding, se Figur 22. Under herdingen var pilarene dekket til med plast for å hindre rask uttørking og uheldige herdeforhold. I laboratoriet ble rommets temperatur og relative fuktighet målt til å være henholdsvis 22°C og 29 %.



Figur 22 - Herding av prøvestykker

¹ Rett fuge avtrukket i plan med veggliiv, se avsnitt 2.2.4

² Konkav fuge, komprimert, se avsnitt 2.2.4

³ I likevekt med temperatur og relativ fuktighet i forsøkslokalet, se avsnitt 4.3.2

⁴ Ett minutt full neddykking i vann før muring.

3.1.3 Mørtelfuge

Mørtelfugene ble meislet ut av pilarene slik at resultatene vil være mest mulig likt virkelige forhold. I noen tilfeller ikke var det mulig å meisle fugene uskadd ut av pilaren og det ble da benyttet en sag for å skjære de ut. Dette gjelder for fugene fra prøveserie *M5 fuktet*.

Mørteltypene som ble brukt var:

- *KC 50/50* ble valgt da det er denne mørtelen som ble brukt i det nevnte samarbeidsprosjektet (5). Mørtelen var i tillegg representativmørtler fra tidlig 1900-tallet..
- *KC 35/66* ble valgt da dette er en aktuell reparasjonsmørtel. Som et tiltak i rehabiliteringen av murkonstruksjoner er det en god løsning å etterspekke de siste 20 mm av fugene med en slik mørtel for å oppnå god regntetthet.
- *M5* ble valgt da dette er en svært vanlig mørteltype i dag. Den er billigere og har i tillegg høyere strekk- og skjærkapasitet enn de typene som er nevnt tidligere. Den er best egnet til stein med moderat minuttsug.
- *M5 SS* ble valgt da dette er en gunstig mørtel for denne tegltypen. Den har tilsvarende fasthetsegenskaper og sammensetning av kalkfiller sement og sand som *M5*, men den er tilpasset tegl med høyt minuttsug grunnet tilsetninger som sørger for en høyere vanntapsmotstand.

3.1.4 Impregnering:

Alle teglstensprøvene samt ni mørtelfuger ble impregnert. De ni mørtlene besto av tre mørtelprøver fra prøveseriene *KC 50/50 avtrukket*, *KC 50/50 komprimert* og *M5 fuktet*.

- Impregneringen som ble brukt var av type *Siloxane PD* som er produsert av *Prosoco*. Den ble valgt etter anbefaling fra Jesper Borg, daglig leder i *impregneringsgruppen*, ettersom produktet har god penetreringsdybde, lang levetid samt har scoret godt på flere ytelses- og miljøtester.

3.1.5 Målte egenskaper

For å kunne dokumentere betydningen av heftsonen for fuktopptak i murverk utførte vi vannabsorpsjonsforsøk på murte pilarer samt teglstein og mørtelfuger hver for seg. Det ble også gjort forsøk på impregnert teglstein og mørtelfuger. Resultatene gir reelle inputparametere til den numeriske modellen samt økt forståelse for oppførselen til materialene. De målte parameterne er presentert i Tabell 7:

Tabell 7 – Oversikt over hvilke prøver forsøkene ble utført på

	Teglstein	Mørtelfuge	Pilar	Impregnert teglstein	Impregnert mørtelfuge
Minuttsug	X				
Densitet	X				
Vannabsorpsjon	X				
Kapillær vannabsorpsjon	X	X	X	X	X
Skjærfasthet			X		

3.2 Minuttsug

3.2.1 Prøvemethode

Teglsteinsprøvene ble satt i et tørkeskap, som holdt 105°C, i tre døgn. Arealet til både liggeflaten og løpersiden ble målt før selve målingene ble utført i henhold til *NS 3000* (85). En vekt med av type *Mettler PS 15* ble brukt til å veie prøvene. Teglsteinens liggeflate ble deretter vætet i et kar som holdt en konstant vannstand på 10 mm og veid på ny etter ett minutts neddykking, se Figur 23. Samme prosedyre ble deretter utført på løpersiden. Den oppsugede vannmengden ble beregnet etter likning:

$$s_1 = \frac{P_m - P_t}{l \cdot b} \quad (8)$$

Hvor:

s_1 = minuttsug [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$]

P_m = teglsteinens vekt etter ett minutts neddykking [kg]

P_t = teglsteinens vekt i tørr tilstand [kg]

l = flatens lengde [m]

b = flatens bredde [m]



Figur 23 - Forsøksoppsett minuttsug

3.2.2 Resultater

Resultatene fra minuttugsforsøket samt gjennomsnittsverdier og standardavvik er presentert i Tabell 8.

Tabell 8 - Resultater minuttugsforsøk

Stein nr.	Minuttug - Liggeflate [kg/m ² min]	Minuttug - Løpersiden [kg/m ² min]
0	4,3	3,7
1	4,2	4,0
2	4,1	3,6
3	3,7	3,8
4	4,7	3,6
5	4,6	3,9
6	4,2	3,6
7	4,0	4,1
8	4,3	3,9
9	4,1	3,8
10	4,0	3,4
Gjennomsnitt	4,2	3,8
Std. avvik	0,3	0,2

3.2.3 Kommentar

Forsøket ble utført uten komplikasjoner og alle resultatene var innenfor toleransen på mellom +/- 0,5 og +/- 1 kg/(m²·min). Ifølge teglets datablad skulle liggeflaten ha et minuttug på 4,5 kg/m²·min, noe som kan tyde på at produsenten har lagt til en sikkerhetsfaktor med tanke på uregelmessigheter som kan oppstå i materialet. Løpersiden hadde som forventet et lavere minuttug enn liggeflaten ettersom løpersiden har en glatt overflate uten synlige riss eller sprekker. Dette er gunstig da flaten er direkte utsatt for regnpåkjenning.

Målingen av flatearealene ble forenklet til kun å ta én måling midt på flaten fra hver side. *NS 3000* (85) spesifiserer at man skal ta middelverdien av fire målinger på hver side.

3.3 Densitet og vannabsorpsjon

3.3.1 Prøvemethode

Densitet og vannabsorpsjonsmålingene har tilnærmet lik fremgangsmetode og er av den grunn presentert sammen. Målingene for densitet ble utført i henhold til *NS 3000(85)*, men med et arrangement utført av Noralf Bakken ved *SINTEF*, se Figur 24. Målingene for vannabsorpsjon ble gjennomført i henhold til *NS-EN 772-21 (86)*. For dette forsøket ble P_t fra minuttugsprøvingen benyttet videre og steinene ble tørket på ny ved 105 °C over to dager. Etter ett døgn vannlagring ble teglsteinen veid i både friluft og steinen i luft og nedsenket i vann hvorefter dens densitet og vannabsorpsjon ble regnet ut etter følgende likninger:

$$\rho = \frac{P_t \cdot e}{P_l - P_v} \quad (9)$$

Hvor:

ρ = teglsteinens netto densitet [kg/dm³]

e = vannets densitet [kg/dm³]

P_t = teglsteinens vekt i tørr tilstand [kg]

P_l = teglsteinens vannmettede vekt i luft [kg]

P_v = teglsteinens vannmettede vekt nedsenket i vann [kg]

$$\text{Masseprosent [\%]} = \frac{(P_l - P_t) \cdot 100}{P_t} \quad (10)$$

Hvor:

P_t = teglsteinens vekt i tørr tilstand [kg]

P_l = teglsteinens vannmettede vekt i luft [kg]

$$\text{Volumprosent [\%]} = \frac{(P_l - P_t) \cdot 100}{P_l - P_v} \quad (11)$$

Hvor:

P_t = teglsteinens vekt i tørr tilstand [kg]

P_l = teglsteinens vannmettede vekt i luft [kg]

P_v = teglsteinens vannmettede vekt nedsenket i vann [kg]



Figur 24 - Forsøksoppsett for veing av tegl neddykket i vann

3.3.2 Resultater

Tabell 9 viser resultatene fra målingene på teglsteinene samt gjennomsnittsverdier og standardavvik.

Tabell 9 - Resultater densitets- og vannabsorpsjonsforsøk

Stein nr.	Nettodensitet, ρ_{netto}^5 [kg/m ³]	Bruttodensitet, ρ_{brutto}^6 [kg/m ³]	Vannabsorpsjon [Masse- %]	Vannabsorpsjon [Volum- %]
0	1697,6	1205,4	17,3	29,4
1	1724,5	1235,5	16,1	27,7
2	1691,5	1198,7	17,4	29,4
3	1711,7	1229,3	16,2	27,7
4	1688,7	1200,0	17,7	29,8
5	1692,0	1214,0	17,6	29,8
6	1686,0	1179,1	17,9	30,1
7	1691,7	1214,7	17,4	29,4
8	1699,8	1199,4	17,4	29,6
9	1715,4	1232,9	16,8	28,8
10	1727,1	1242,6	16,0	27,6
Gjennomsnitt	1702,4	1213,8	17,1	29,0
Std. avvik	14,1	19,5	0,7	0,9

3.3.3 Kommentar

Ifølge produsentens produktdatablad skulle densiteten til teglsteinen være 1750 kg/m³ med densitetsklasse D1 ± 10 %. Resultatene fra målingene som ble utført viser verdier litt i underkant av leverandørens beskrivelse.

Etter 24 timers vannedsenkning ble det målt en vannabsorpsjon på 29 volum- %. Dette er litt i overkant av produktbladets spesifikasjon på 25 volum- %. Dette er imidlertid å forvente da det ble målt en lavere densitet. Resultatene viste at selv om en teglsteinprøve hadde et høyt minuttsg, så hadde den nødvendigvis ikke høy vannabsorpsjon.

⁵ Densiteten til teglsteinen hvor porer tilgjengelig for vanninntrenging er ekskludert fra volumet.

⁶ Densiteten til teglsteinen hvor alle porer er inkludert i volumet.

Prøvene ble lagret i et vannbad i kun ett døgn da det ble sett på som tilstrekkelig. *NS 3000* (85) spesifiserer ett døgn med halve teglsteinen under vann og deretter to døgn med hele under vann for densitetsforøket. Dette ville sørget for en bedre nøyaktighet på målingene, men et større vannopptak ville medført en økt P_l noe som kun ville gitt et større avvik fra produsentens spesifikasjoner.

Resultatene viser avvik i materialegenskaper innenfor samme materialtype, noe en burde være oppmerksom på ved en fuktteknisk vurdering av en murkonstruksjon. For å være sikker på at riktige vurderinger blir gjort anbefales det med grunnlag i disse resultatene å gjøre laboratoriemålinger på aktuelle materialer som skal undersøkes.

3.4 Kapillær vannabsorpsjon

3.4.1 Prøvestykker

Både steinene, pilarene og mørtelfugene ble målt i dette forsøket i nevnt rekkefølge. Alle prøvestykkenes ligge- og koppflate ble på forhånd malt med en damptett epoksy for å sikre 1-dimensjonale forhold. For både pilarene og teglsteinene ble hullene i tillegg tett med damptett teip. Alle teglsteinene hadde en merkbar forskjell i ruhet på løpersidene sine, noe som kommer av produksjonsmetoden. I en reell situasjon ville løpersiden med den fineste overflaten blitt brukt som fasadeside, noe som også ble gjort i dette forsøket.

Etter å ha utført forsøket på de nevnte prøvene ble teglsteinene og noen utvalgte mørtelprøver impregnerert med *Siloxane PD*. Deretter ble det utført nye målinger for å dokumentere impregnerings effekt på den kapillære vannabsorpsjonen.

NS-EN ISO 15148 (57) anbefaler at rommet hvor forsøket skal finne sted burde ha en lufttemperatur på 18°C – 28°C og med en RF innenfor 0,4 – 0,6. Temperaturen og RF i laboratoriet ble målt til 22°C og 29 % RF noe som ikke helt møter anbefalingene fra standarden.

3.4.2 Prøvemethode

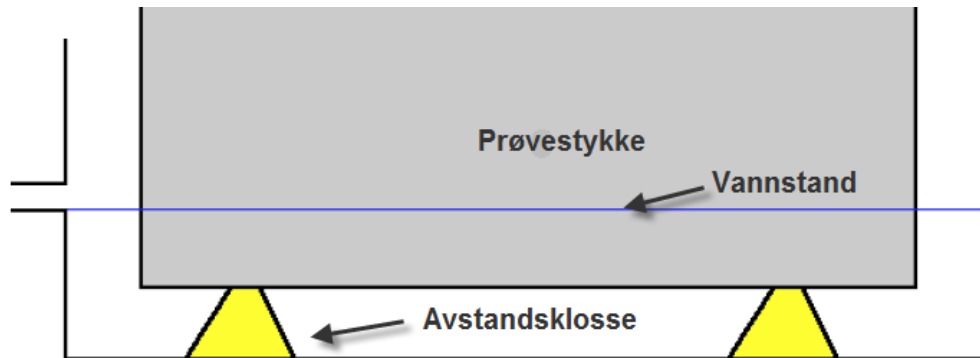
Prøvingen ble utført i henhold til *NS-EN ISO 15148 (57)*. *NS-EN 1015-18:2002 (87)* beskriver målingen av kapillær vannabsorpsjon for en kubeformet mørtelprøve støpt i en stålform. Siden herdeforholdene er annerledes for en mørtel støpt i en stålform enn for en mørtel som herder mellom to teglsteiner, var det ønskelig å undersøke vannabsorpsjonen på mørtelfuger som har herdet i et murverk. For øvrig ble metoden som beskrives i standarden fulgt.

For teglsteinene samt mørtelfugene ble det benyttet et kar med installert vannpumpe og drenering som holdt vannstanden konstant på 10mm under hele måleprosessen, se Figur 25. Grunnet plassmangel under målingen av pilarene, måtte det i tillegg brukes fire kar som krevde manuell etterfylling. I karene ble prøvestykkene lagt med løpersiden ned i vannet på to avstandsklosser, se Figur 26. Da mørtelfugene ikke kunne stå på fasadesiden på egenhånd, ble det bygget et improvisert støttesystem..



Figur 25 – Venstre: Vannkarets vannpumpe. Høyre: Dreneringssystemet til vannkaret

Vannopptaket til steinene ble målt ved å ta dem opp fra vannkaret for så å veie dem. Veingen ble utført på en vekt av type *Mettler PS 15* som hadde en nøyaktighet innenfor det var kravet i standarden. Teglsteinene og pilarene ble i veid etter 10 minutter og 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, og 24 timer, mens mørtelfugene ble veid etter 15 minutter og 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 og 24 timer grunnet redusert absorpsjonsrate. De impregnerte prøvene ble kun veid etter 10 minutter og 6, 24 timer da hovedmålet var å dokumentere effekten etter en betydelig vannpåkjenning.



Figur 26 - Forsøksoppsett kapillær vannabsorpsjon

Dataene ble registrert fortløpende under målingene og det ble generert en funksjon som plottet endringen i vekt på prøvestykket mot kvadratroten av tiden. Ved hjelp av denne kurven kunne t_f leses av, som er den tiden der den lineære sammenhengen mellom absorbert vann og kvadratroten av tid avsluttes. Det er denne tiden som ble brukt til å bestemme absorpsjonskoeffisienten. Når t_f var definert kunne den kapillære absorpsjonskoeffisienten beregnes ut i ifra følgende likning:

$$A_w = \frac{m_{t_f} - m_0}{\sqrt{t_f}} \quad (12)$$

Hvor:

A_w = absorpsjonskoeffisienten [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$]

m_{t_f} = vekten av prøvestykket ved tiden f [kg]

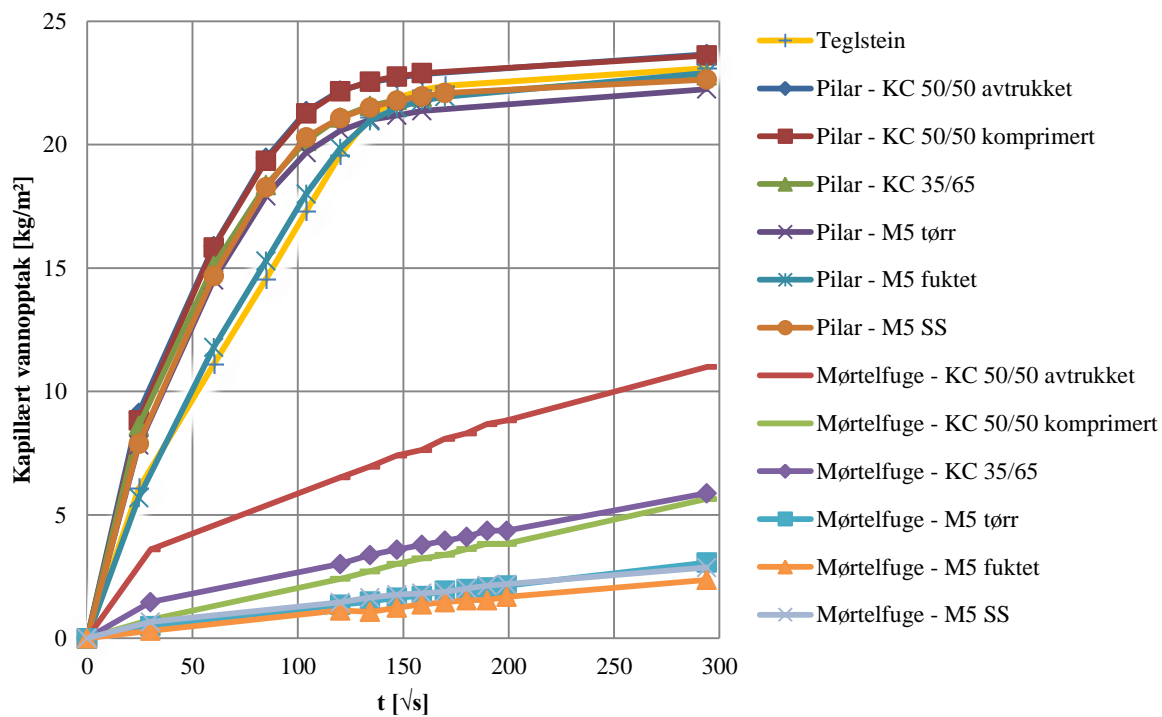
m_0 = vekten av prøvestykket i tørr tilstand [kg]

t_f = tiden ved f [s]

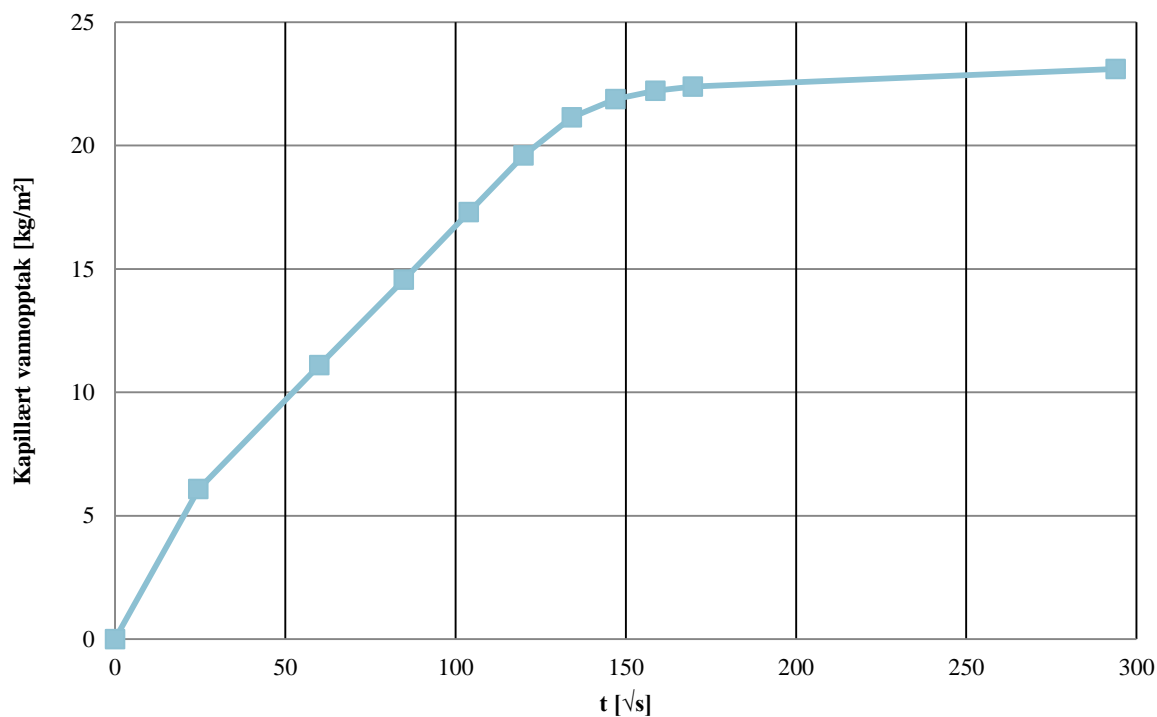
Videre ble tiden der knekkpunktet til kurven fant sted t_{knekk} definert. Dette ble gjort ved hjelp av regresjon ettersom grafene ikke hadde et tydelig knekkpunkt. Denne verdien ga en indikasjon på når de kapillære porene var fylt opp.

3.4.3 Resultater

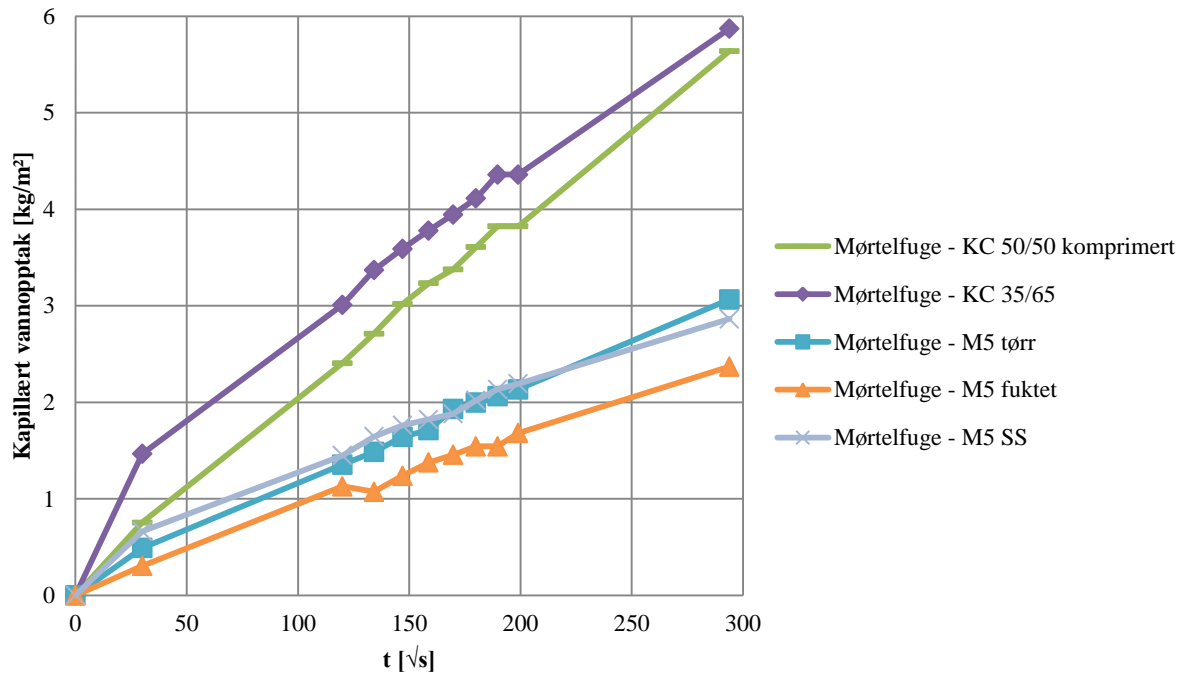
Her presenteres resultatene fra målingene gjort på det kapillære vannopptaket. Figurene presentert i dette avsnittet viser mengde absorbert vann (kg/m^2) plottet mot kvadratroten av tid for de utførte forsøkene.



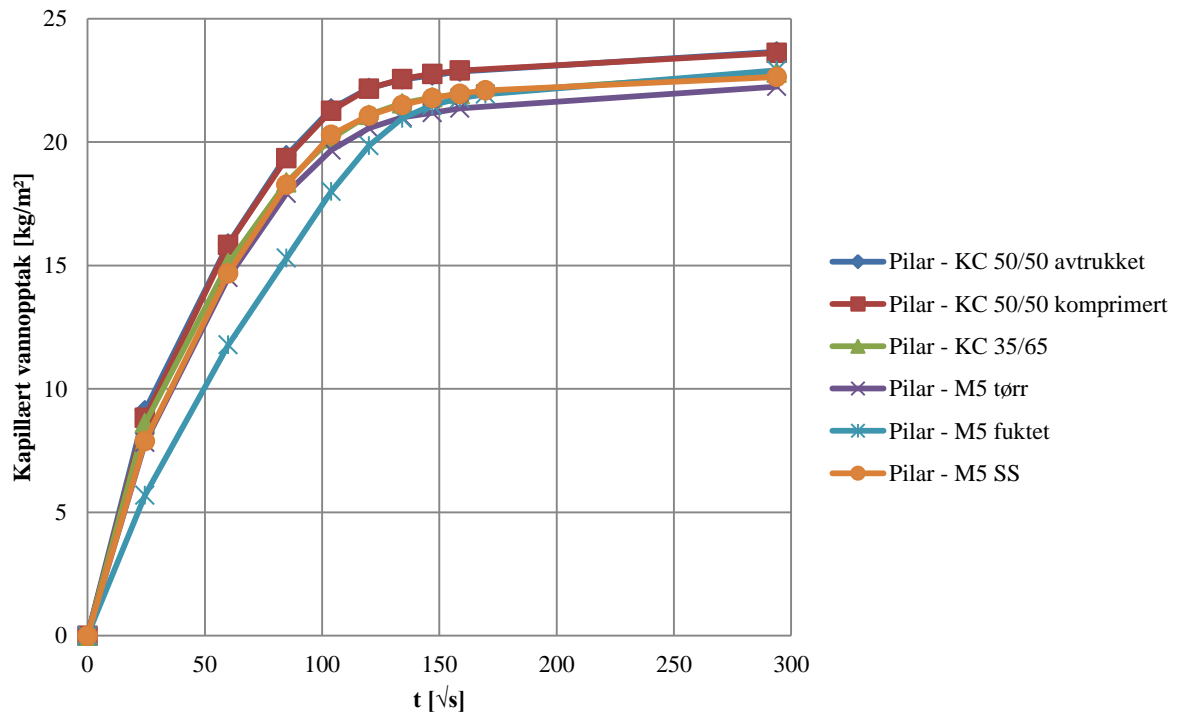
Figur 27 – Kapillært vannopptak: Middelkurvene til alle prøvene



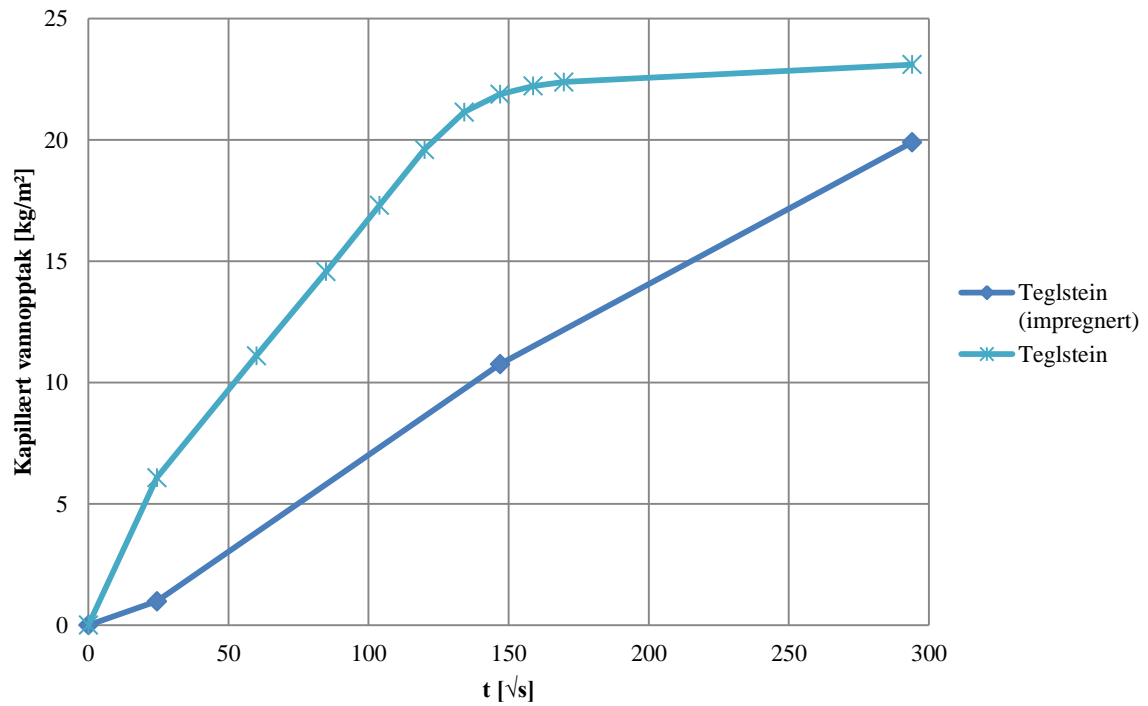
Figur 28 - Kapillært vannopptak: Middelkurven til teglsteinsprøvene



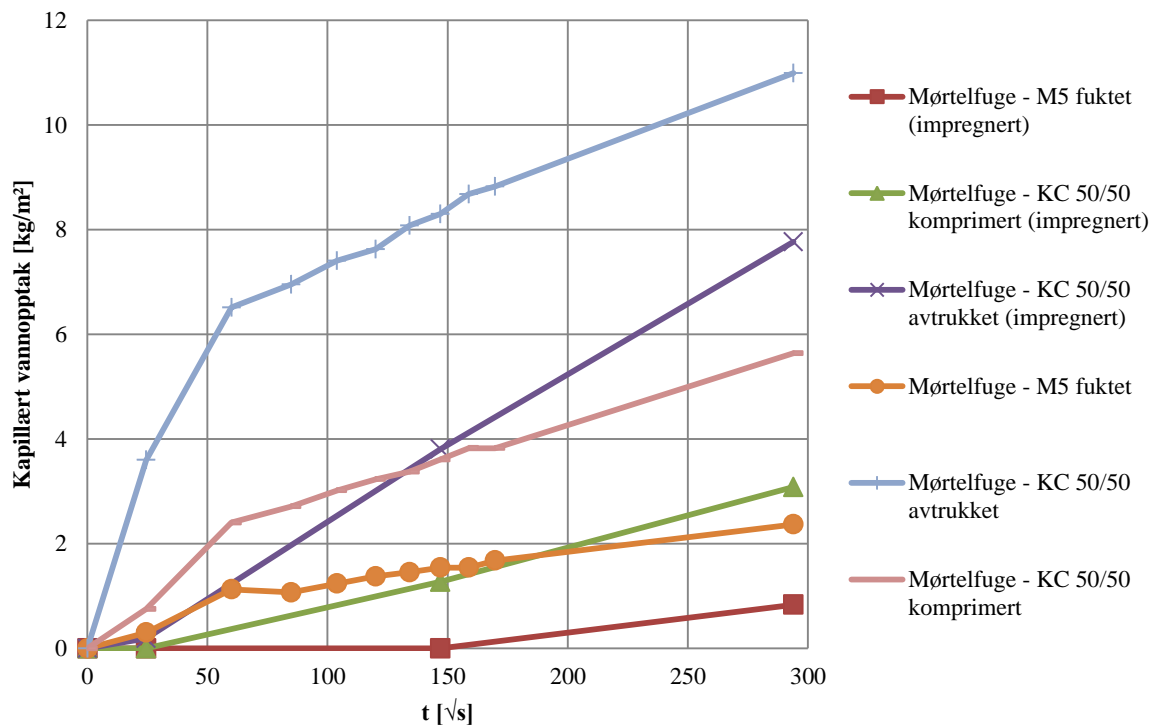
Figur 29 - Kapillært vannopptak: Middelkurvene til mørtelfugene med unntak av KC 50/50 avtrukket da den kommer tydelig frem i Figur 27



Figur 30 - Kapillært vannopptak: Middelkurvene til pilarene



Figur 31 - Kapillaert vannopptak: Middelkurvene til impregnert teglstein samt dens middelkurve i ubehandlet tilstand



Figur 32 – Kapillaert vannopptak: Middelkurvene til de impregnerte mørtelprøvene samt deres middelkurver i ubehandlet tilstand

Tabellene nedenfor viser tallresultater fra de utførte målingene, samt de antagelser som er gjort for å bestemme den kapillære absorpsjonskoeffisienten.

Tabell 10 - Resultater fra kapillær vannabsorpsjon av teglstein

Materiale	t_f [h]	$A_{w,tf}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	$A_{w,24}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	t_{knekk} [h]	Δm_{24} [kg/m ²]
Teglstein	5	0,138	-	5,4	23,2

Tabell 11 - Resultater fra kapillær vannabsorpsjon av pilerer

Materiale	t_f [h]	$A_{w,tf}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	$A_{w,24}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	t_{knekk} [h]	Δm_{24} [kg/m ²]
KC 50/50 avtrukket	3	0,155	-	3,5	23,7
KC 50/50 komprimert	3	0,157	-	3,5	23,6
KC 35/65	3	0,145	-	3,5	22,8
M5 tørr	3	0,149	-	3,5	22,3
M5 fuktet	5	0,139	-	5,3	22,9
M5 SS	3	0,156	-	3,5	22,6

Tabell 12 - Resultater fra kapillær vannabsorpsjon av mørtelfuger

Materiale	t_f [h]	$A_{w,tf}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	$A_{w,24}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	t_{knekk} [h]	Δm_{24} [kg/m ²]
KC 50/50 avtrukket	-	-	0,0314	-	11
KC 50/50 komprimert	-	-	0,0206	-	5,6
KC 35/65	-	-	0,0187	-	5,9
M5 tørr	-	-	0,0109	-	3,1
M5 fuktet	-	-	0,0086	-	2,4
M5 SS	-	-	0,0092	-	2,9

Tabell 13 – Resultater fra kapillær vannabsorpsjon av impregnerte prøver

Materiale	A_{w24} impregnering [kg/m ² ·s ^{0,5}]	Δm_{24} [kg/m ²]	$\frac{A_w \text{ impregnering}}{A_w}$	$\frac{\Delta m_{24} \text{ impregnering}}{\Delta m_{24}}$
Teglstein	0,0702	19,9	0,51	0,86
Mørtelfuge - M5 fuktet	0,0031	0,8	0,36	0,35
Mørtelfuge - KC 50/50 komprimert	0,0114	3,1	0,56	0,55
Mørtelfuge - KC 50/50 avtrukket	0,0281	7,8	0,90	0,71

3.4.4 Kommentar

Teglsteinen hadde som forventet en høyere A_w -verdi enn mørtlene, men den nådde metning tregere enn alle pilarene, etter ca. 5,4 timer, noe som er overraskende. Teglsteinen suger adskillig mye mer vann enn mørtlene og til sammenligning absorberer den over dobbelt så mye som den mest sugende mørtelfugen over et tidsrom på 24 timer. Oppsettet til absorpsjonsforsøket til teglstein er vist i figur i Figur 33.



Figur 33 – Teglstein i vannbad

I Figur 27 og Figur 29 viser mørtelfugene en tydelig forskjell i ytelse. Det observeres et tydelig skille i prestasjonene til reseptmørtlene (*KC*-mørtlene) sammenlignet med funksjonsmørtlene (*M5* mørtlene) da alle *KC*-mørtelvariantene har et høyere vannopptak enn *M5*-variantene. Det kan observeres også en forskjell mellom de forskjellige variantene av *KC*-mørtlene. *KC 50/50 avtrukket* skiller seg svært negativt ut i forhold til både *KC 50/50 komprimert* og *KC 35/65* med tanke på fuktopptak, se Figur 27. Dette indikerer at fugeutformingen utgjør en stor forskjell, noe som er tydelig da *KC 50/50 avtrukket* har 60 % høyere A_w og i underkant av 50 % høyere Δm_{24} enn *KC 50/50 komprimert*. Oppsettet til absorpsjonsforsøket til mørtelfugene er vist i Figur 34.

Av pilarene var *M5 fuktet* den prøveserien som viste klart best ytelse, noe som viser at forvæting av stein har en markant og positiv innvirkning. Det viser også at forvæting er et mer effektivt tiltak sammenlignet med å bruke mørtel som er tilpasset stein med høyt og middels sug. Dette gir en god indikasjon på, at en mørtel med tilstrekkelig tilgang på vann i herdeprosessen sørger for en finere porestruktur og et lavere vannopptak.



Figur 34 - Mørtelfuger i vannbad

Det har i dette forsøket blitt valgt en svært ugunstig stein og Figur 27 viser at teglsteinen er den som i stor grad bestemmer ytelsen til pilarene. Valg av mørteltype viser seg at ikke har vesentlig innvirkning på resultatene og differansen mellom den beste mørteltypen (*M5 tørr*) og den verste (*KC 50/50*) med tanke Δm_{24} er kun $1,4 \text{ kg/m}^2$. Med tanke på A_w er forskjellen $0,018 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$ hvor *M5 fuktet* skiller seg ut som den beste prøveserien. Ifølge målingene har fugeutformingen heller ingen stor innflytelse på pilarenes resultater til tross for stor differanse da fugene ble målt separat.

Som Figur 27 illustrerer, med unntak av *M5 fuktet*, absorberer pilarene betydelig mye mer de første fem timene enn en teoretisk sammensetning av teglstein og mørtel pr m^2 ville tilsi. Denne økningen i vannabsorpsjon gir grunn til å tro at heftsonen, som oppstår i grensesnittet tegl/mørtel, gir et betydelig bidrag til vannopptaket. Som diskutert tidligere ser det ut til at mørtelfugene i *M5 fuktet* er den mørtelen som har hatt en mest fullstendig herding. Da det er denne pilarprøven som helt klart presterte best og som utviklet seg nesten helt likt med målingene av ren teglsteinen, indikerer det at det her har skjedd en tilnærmet fullstendig heftdannelse. Dette underbygger også påstanden om at bedre heft vil redusere vannabsorpsjonen i et murverk.

Allerede etter to timer kunne man observere vann på overflaten av pilarene, spesielt på teglsteinene i midten da de har én heftsoner på hver side, se Figur 35. En kunne også observere at mørtelfugene fortsatt var helt tørre på overflaten.



Figur 35 - Overflatefukt på pilarer mur med KC 50/50

Observasjoner under forsøket antydnet at pilar *M5 fuktet* hadde oppnådd best kontakt med teglet, da vannet ikke trengte like lett gjennom heftsonen som for pilar *KC 50/50*, vist i Figur 35. Etter hvert jevnet forskjellene seg ut som et resultat av at de kapillære porene ble fylt opp, se Figur 30. Med unntak av *M5 fuktet* hadde faktisk alle pilarene samme t_{knekk} -verdi.

Med tanke på A_w og Δm_{24} viser pilarene med *KC 35/65* bedre resultater sammenlignet med *KC 50/50 komprimert* enn da mørtelfugene ble sammenlignet. Dette kan tyde på at kalkens bidrag til bedre heft gir større utslag enn dens bidrag til å gjøre porestrukturen finere og mer motstandsdyktig overfor vannpenetrasjon generelt i fugen. Videre viser målingene bedre resultater for pilarer med *M5 tørr* sammenlignet med *M5 SS* enn da mørtelfugene ble sammenlignet. Grunnen til dette er uklar, men det kan tenkes at tilsetningsstoffene som bidrar til høyere vanntapsmotstand og dermed bedre herdeforhold påvirker heftetableringen negativt på en annen måte.

For impregneringsforsøkene ble det observert en markant bedring både for teglsteinen og for mørtelfugene. A_w for teglsteinene har sunket så betraktelig at prøvene i løpet av 24 timer ikke har rukket å nå knekkpunktet. Videre kan det se ut som om impregneringen har best effekt i løpet av de første 10 minuttene da helningen i dette tidsrommet er slakkere enn ved resten av opptaket, noe som er motsatt av det den tilsvarende kurven før impregnering viser. Dette kan tyde på at effekten av impregneringen avtar med tid, men det er ingen tvil om at impregneringen virker over hele måleperioden.

For mørtelfugen fra *M5 fuktet* viser impregneringen ypperlige resultater da vannet ikke har klart å penetrere impregneringen i løpet av de første 6 timene med konstant vannpåkjenning. *KC 50/50 komprimert* holder seg tørr de første 10 minuttene og videre holder den 30 % lavere A_w enn den tilsvarende ubehandlede fugetypen. *KC 50/50 avtrukket* får en stor reduksjon i mengden vann absorbert etter 24 timer, men med tanke på A_w har den forholdsvis den klart laveste reduksjonen av alle prøvene. Dette kan være grunnet avtrukne fugers større andel av større porer, da impregneringen ikke er rissoverbyggende.

Det var ugunstig at den målte RF i laboratoriet var noe lavere enn det standarden anbefaler da dette kan ha bidratt til en høyere avdunsting til omgivelsene enn det som er ønskelig.

Vannkarene som de murte pilarene sto i måtte justere slik at avstandsklossene var i vater og siden det måtte manuell etterfylles og vatres bidro dette til en usikkerhet på +/- 5 mm. Det målte arealet av sugeflaten til mørtelfugene vil ha en usikkerhet da det ikke ble tatt hensyn til de komprimerte fugenes krumme geometri.

3.5 Skjærfasthet

3.5.1 Bruddtyper

Skjærprøvene ble utført for å kunne verifisere en indikert god heftdannelse ved hjelp av skjærkapasitet.

Følgende bruddtyper var forventet:

1. Brudd i mørtelen
2. Brudd i steinen
3. Brudd i heftsonen

Det ble kun observert brudd av type 3. For å skille bruddtypene fra hverandre ble de kategorisert som følger:

- A. Underkant av øverste fuge – et slikt brudd kan ha oppstått da denne fugen kun ble belastet av én steins tyngde under herdeprosessen.
- B. Overkant av nederste fuge – et slikt brudd kan ha oppstått grunnet for lang tid fra mørtelfugen ble lagt til neste stein ble lagt.

Den øverste fugen er fugen som lå øverst mens prøvene herdet.

3.5.2 Prøvemethode

Prøvingen ble basert på *NS 3105(88)* og *NS-EN 1052-3(89)* og utført i en *Lloyd Universal*-prøvemaskin. Prøvestykkene ble opplagt på stålklosser med trefiberplater som mellomlegg da det ikke var mulig å oppdrive rullelager av typen som *NS-EN 1052-3 (89)* anbefaler, se Figur 36. Lasten ble påført på den midterste steinen sentrisk med en belastningshastighet på 40 N/sek til prøven gikk til brudd. Prøvemaskinen registrerte bruddlasten hvorefter fastheten ble beregnet ved hjelp av likning 13:

$$\tau_0 = \frac{F}{2A} \quad (13)$$

Hvor:

τ_0 = Skjærfastheten [Mpa]

F = Last ved brudd [N]

A = Tverrsnittsarealet av prøvestykket parallelt med liggefugen [mm²]



Figur 36 – Venstre: Trefiberplaten som ble brukt som mellomlegg i opplagerne. Høyre: Forsøksoppsettet i prøvemaskinen etter endt belastning med bruddtype B som resultat.

3.5.3 Resultater

Alle resultatene fra skjærprøvingen er presentert i Tabell 14

Tabell 14 - Resultater skjærprøving

Prøveserie	Skjærfasthet [MPa]	Spredning [MPa]	Bruddtype
Pilar - KC 50/50 avtrukket	0,0733	0,0698 - 0,0770	B
Pilar - KC 50/50 komprimert	0,0567	0,0489 - 0,0690	B
Pilar - KC 35/65	0,0760	0,0575 - 0,1054	B
Pilar - M5 tørr	0,0766	0,0506 - 0,0919	B
Pilar - M5 fuktet	0,1040	0,0631 - 0,1579	A
Pilar - M5 SS	0,0787	0,0625 - 0,0898	A

3.5.4 Kommentar

Resultatene samstemmer med det som ble indikert i vannabsorpsjonsforsøkene. Pilar *M5 fuktet* har en betydelig større skjærfasthet sammenlignet med de andre prøveseriene noe som indikerer en velutviklet heftzone, men også her har resultatene en stor spredning. Til tross for god heftutvikling er den målte skjærfastheten under kravet til *NS 3120 (90)* på 0,2 MPa. De resterende prøveseriene har tilnærmet lik skjærfasthet med unntak av Pilar *KC 50/50 komprimert* som i noen grad skiller seg ut som den svakeste prøveserien. Det er ingenting, med tanke på materialegenskapene til denne prøveserien, som skulle indikere dette resultatet. Da det ikke er en tydelig lavere kapasitet sammenlignet med de andre seriene er det ikke grunnlag nok til å trekke entydige konklusjoner. Dette kan være et resultat av flere ting som bl.a. diskuteres i neste avsnittet.

Prøvestykkene ble plassert i maskinen med øyemål. Dette kan ha resultert i at lasten ikke hadde et perfekt sentrisk treffpunkt. Ujevne fuger vil også bidra til sprikende resultater da den midterste steinen ikke vil ligge 90° på kraftretningen. Det ble i tillegg ikke benyttet ekstra trykkbelastning i form av å la en teglstein hvile på pilaren under herdeprosessen. Skjærprøvingen ble utført på alle pilarene etter absorpsjonsforsøkene og dermed var pilarene malt med epoksy. Epoksyen vil kunne bidra med ekstra motstand og dermed medføre små avvik i resultatene.

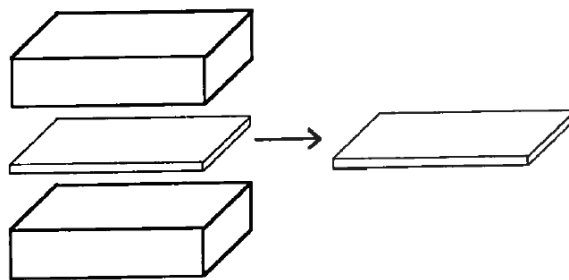
4 Numerisk analyse

I denne delen av oppgaven presenteres resultater av de numeriske simulasjonene som ble gjennomført. Det var ønskelig å få en oversikt over hvilke materialparametere som må bestemmes for å kunne modellere fukttransporten i et murverk, slik at det blir en tilfredsstillende sammenfalling med de målte resultatene fra laboratoriet. For å gjennomføre analysen ble WUFI, som er et verktøy for simuleringer av koblet varme og fukttransport, brukt.

Mange studier bruker numeriske modeller for å undersøke fuktutviklingen i murkonstruksjoner. Disse studiene dreier seg ofte om problematikken i forbindelse med frostsprengning og mugg- og råtevekst, da numerisk simulasjon er en god metode for å kunne si noe om konstruksjoner, i forskjellige klima, vil nå kritiske fuktmengder. Mange studier bruker også numeriske beregninger for å undersøke om etterisolering av historiske murbygg vil skape fuktrelaterte problemer med innfelte bjelkeender.

4.1 Erfaringer fra tidligere undersøkelser

Flere studier har undersøkt heftsoneproblematikken og selv om det er liten tvil i at dette fenomenet har stor innvirkning på fuktopptaket, så er heftsonen så kompleks i sin natur at ingen gode analytiske modeller eksisterer (68). Heftsoneproblemet kjennetegnes i litteraturen som et motstandssjikt i kontaktflaten mellom to porøse materialer (slik som teglstein og mørtel) som grunnet ufullstendig hydraulisk kontakt sørger for en nedbremsning av vanntransporten fra det ene materialet til det andre. I litteraturen er det foreslått flere teknikker for å ta hensyn til de endrede materialegenskapene i heftsonen i numeriske simulasjoner. Krus (78) modellerte kontaktflaten ved å introdusere et materiallag, med 1 mm tykkelse og redusert fukttransport, i mørtelen ved kontaktflaten, mens resten av mørtelen hadde de samme materialegenskapene som for de målte prøvestykkene. Brocken (20) valgte å anta perfekt hydraulisk kontakt mellom mørtel og teglsteinen i simuleringene og i stedet endre hele mørtelfugens egenskaper i henhold til målinger gjort på mørtelfuger som hadde herdet mellom teglstein, se Figur 37.



Figur 37 – Mørtelfuge som har herdet mellom teglsteiner (20)

Det ble konkludert med at å endre fuktlagringsfunksjonen i det overhygroskopiske området hadde en større innvirkning enn det å endre på fukttransporten. Depraetere (68) valgte å legge inn et *hakk* i kontaktflaten og dermed, ved å endre på lengden til hakket, kunne arealet der teglet og mørtelen er i fysisk kontakt med hverandre varieres for å tilpasse simuleringene til målte verdier.

4.2 Metode

Programvaren som ble brukt var den norske versjonen av *WUFI 2-D Pro 3.3* som er et simuleringsverktøy for samlet fukt- og varmetransport i bygningskomponenter, utviklet av *Fraunhofer-Institut für Bauphysik* i Tyskland. *WUFI* støtter både en- og todimensjonal analyse og i denne oppgaven ble en todimensjonal analyse utført.

WUFI er basert på de samlede likningssystemene og numeriske løsningsteknikkene utarbeidet av Künzel (79). Ved simuleringer av konstruksjoner i reelle klima er det kritisk for tolkningen av resultatene å være klar over hvilke forenklinger som ligger til grunn i modellen. For væsketransporten gjør *WUFI* følgende forenkling:

- *WUFI* utelukker flere væsketransportmekanismer ettersom de sjeldent opptrer eller at de delvis mangler en akseptert transportmodell. Dette gjelder hydraulisk strøm, elektrokinese, osmose og væskestrøm som følger av gravitasjonskreftene.

For å undersøke om det var mulig å gjenskape laboratoriemålingene i *WUFI* var det nødvendig å kjøre simuleringer av bare teglstein og mørtel hver for seg før de oppmurte pilarene kunne undersøkes. For de murte pilarene ble det gjennomført en analyse av heftsoneteknikker der det var ønskelig å bestemme egenskaper som kan brukes til å modellere effekten av heftsonen.

Teglstein og mørtelfuge

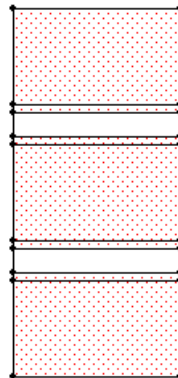
Absorpsjonsforsøkene til teglsteinen og mørtelfugen *KC 50/50 komprimert* ble simulert først. Dimensjonene på modellene for teglstein og mørtelfugen var henholdsvis 104 · 226 · 60 mm og 104 · 226 · 15 mm som var det samme som materialene benyttet i laboratorieundersøkelsene. For teglsteinen ble det gjennomført en parameteranalyse som undersøkte hvilken effekt de forskjellige fukttransportrelaterte materialparametrene hadde å si på modelleringen av vannabsorpsjonen og de simulerte resultatenes samsvar med de målte resultatene.

Murte pilarer

Det som skilte denne undersøkelsen fra de undersøkelsene funnet i litteraturen er at fuktstrømmen har gått parallelt med heftsonen i de gjennomførte forsøkene og heftsonen har dermed bidratt til økt vannopptak. I litteraturen er heftsonen først og fremst et sjikt som bidrar til økt motstand i fuktgjennomgangen mellom to materialer og ingen har, så langt forfatterne er bekjent, undersøkt heftsonens bidrag til det økte vannopptaket ved væting av fasaden. For de murte pilarene var målet å undersøke om det var mulig å lage en modell som tok hensyn til denne effekten av heftsonen. For å gjøre dette ble det satt opp et testregime som tok for seg flere modelleringsteknikker inspirert fra litteraturen. For hver av disse teknikkene ble det forsøkt å bestemme en kombinasjon av parametre som ga best samsvar med laboratoriemålingene. Testsystemet ble delt inn i følgende oppsett:

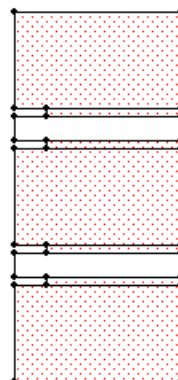
- *Metode 1*: Heftzone modellert som et ekstra materiallag mellom mørtel og tegl.
- *Metode 2*: Lik *metode 1*, men lengde på kontaktflaten til det ekstra materiallaget varierte.
- *Metode 3*: Deler av mørtelen ble erstattet med et materiale med høyere vannopptak.
- *Metode 4*: Homogent/monolittisk materialet ble utformet med alle effekter av tegl, mørtel og heftzone inkludert i materialeegenskapene.

Metode 1: For å modellere heftsonen ble et ekstra materiallag lagt til i alle kontaktflatene mellom mørtel og tegl. Det ble tatt utgangspunkt i *Aerated Clay Brick* (densitet: 600 kg/m^3) fra *WUFI* sin materialdatabase da dette materialet, grunnet sin høye porøsitet og lave densitet, hadde egenskaper som kunne minne om en heftzone. Modellen slik den ble tegnet i *WUFI* er vist i Figur 38.



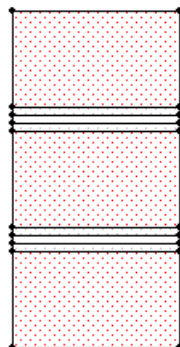
Figur 38 - Modellen til *metode 1* med 5 mm tykke heftsoner i kontaktflatene mellom mørtelfuge og tegl

Metode 2: Her ble det ekstra heftsonematerialet trukket lengre inn i konstruksjonen noe som sørget for at teglet og mørtelen fikk eksponert et større areal som kunne suge vann. Da de murte pilarene viste en meget høy absorpsjonsrate i starten av vannopptaket var det ønskelig å se om det var mulig å påvirke denne raten ved øke den totale sugeflaten. Modellens oppbygning er vist i Figur 39.



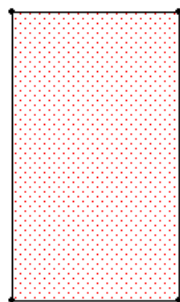
Figur 39 - Modellen til *metode 2* med 5 mm tykke heftsoner i kontaktflatene mellom mørtelfuge og tegl. Heftsonematerialene er inntrukket 20 mm.

Metode 3: Et annet forsøk på å øke absorpsjonsraten var å bytte ut deler av mørtelen, som var det materialet som sugde minst vann, med et materiale som absorberte vann raskere. Dermed kunne forholdet mellom tegl og en mørtel være som normalt, men at mørtelen ble designet for høyere absorpsjon for å ta hensyn til heftsoneneffekten. Det ble tatt utgangspunkt i heftsonematerialet som ble brukt i *metode 1* og modellen vises i Figur 40.



Figur 40 - Modellen til *metode 3* med 5 mm tykke heftsoner i kontaktflatene mellom mørtelfuge og tegl. Her er mørtelfugenes tykkelse redusert fra standardtykkelsen 15 mm til 5 mm.

Metode 4: For å bruke de andre metodene kreves det at man modellerer et murverk med flere materialkomponenter noe som kun kan gjøres i 2-dimensjonale simuleringsprogrammer. I *WUFI* sin database finnes både tegl og mørtel separat, men det er ingen homogene materialer som tar hensyn til effekten av tegl, mørtel og heftsonen kombinert. Ved å ta utgangspunkt i teglsteinen som ble modellert i 4.4.1 ble det forsøkt å modellere et monolittisk homogent teglmateriale som tar høyde for mørtelen og heftsonens bidrag i vannabsorpsjonen, se Figur 41.



Figur 41 – Modellen til *metode 4*, ett homogent materiale.

4.3 Simuleringsspesifikasjoner

4.3.1 Rutenett

Ved valg av rutenett var det beregningshastighet og hvor stor nøyaktighet en ønsker på beregningene som var viktige faktorer å ta hensyn til. I denne oppgaven var det ettersimuleringer av kapillær vannabsorpsjon på murte prøvestykker som ble gjennomført og det var dermed mulig å bruke et rimelig tett rutenett da det var kun en liten konstruksjon med lav simuleringstid som ble brukt.

Det ble erfart at rutenettet hadde en innvirkning på resultatene og det ble dermed bestemt et rutenett som konsekvent ble benyttet videre. På små konstruksjoner, slik som den som ble simulert i denne oppgaven, var det tydelig at dersom rutenettet ikke var tilnærmet likt (antall elementer per areal) på alle simuleringene ble resultatene ikke sammenlignbare.

Tykkelsen på prøvestykkene som ble brukt i laboratorieundersøkelsene var av en halvsteins tykkelse og dermed ble tykkelsen på de simulerte konstruksjonene satt til 104 mm. I *WUFI* blir ønsket geometri tegnet opp ved hjelp av firkanter. Rutenettet ble generert ved at alle komponentene ble delt i to, hvoretter antall elementer i hver halvdel ble bestemt. For teglstein ble anbefalt *middels tetthet* på rutenettet benyttet, noe som resulterte i 52 elementer i hver halvdel i vertikal og horisontal retning. Siden en halv teglstein er 52 · 30 mm vil dette resultere i en rate på 1,73 ruter per mm i vertikal retning. Videre ble samme antall elementer brukt for mørtelen noe som ga en høyere rate men da mørtelen ikke har like stort areal som teglet økte ikke beregningstiden merkbart. Tilslutt ble det brukt en rate på 6 for heftsonematerialet da det var ønskelig med høy nøyaktighet her. Oversikt over antall elementer og rate på materialkomponentene er presentert i Tabell 15.

Tabell 15 - Oversikt over oppbygningen til de valgte rutenettene.

Materiale	Dimensjon [mm]	Antall elementer	Rate [ruter per mm]
Alle	52 (horisontal)	52	1
Tegl	30 (vertikal)	52	1,73
Mørtel	7,5 (vertikal)	52	6,93
Heft	2,5 (vertikal)	15	6

4.3.2 Initialbetingelser

Det ble antatt at materialene var i likevekt med rommet ved forsøksstart og alle materialer ble satt til målte verdier fra forsøkslokalet, henholdsvis 22,2 °C og 29 % RF.

Overflate/Klima

For å kunne simulere den samme vannpåkjenningen prøvene ble utsatt for i det kapillære vannabsorpsjonsforsøket ble en *KLI* fil benyttet. Ved å bruke en slik fil kunne en egendefinere et klima uten å bruke *WUFI* sin omregningsalgoritme. For at et klima som gjenspeiler absorpsjonsforsøket skulle genereres gjennom en slik fil måtte man definere følgende klimaparametere:

- *Regnpåkjenningen* overflaten ble påført [$\text{Ltr}/\text{m}^2\text{t}$]. Denne parameteren ble satt til 10 $\text{Ltr}/\text{m}^2\text{t}$ siden filen skulle simulere et vannbad og det var viktig å sørge for at vannpåkjenningen ikke ble for lave.

- *Temperaturen* i den omkringliggende luften, inne og ute [°C]. Denne parameteren ble satt til 22,2 °C både inne og ute med grunnlag i utførte temperaturmålinger i prøvelokalet.
- *Relativ fuktighet* i den omkringliggende luften [%]. Denne verdien ble satt til 29 % inne med grunnlag i utførte RF-målinger i prøvelokalet og 90 % ute som en basisverdi.

4.3.3 Beregningsparametere

Tidssteg på 24 og 30 ble benyttet avhengig av tidsrommet som ble brukt under de tilsvarende laboratorieforsøkene. Beregningsinnstillingene som ble benyttet var som følger:

- Fuktransportkalkulasjon
- Varmetransportkalkulasjon
- Økt nøyaktighet
- Tilpasset konvergens

4.4 Parameteranalyse av teglsteinen og mørtelfuge

4.4.1 Teglstein

For teglsteinen ble det tatt utgangspunkt i *Solid Brick Masonry*, i *WUFI* sin materialdatabase da det var denne hadde egenskaper som var mest lik den brukte teglsteinen, se (Tabell 16).

Følgende parametere ble substituert med resultater fra laboratorieforsøkene:

- Absorpsjonskoeffisienten
- Mettet vanninnhold
- Vanninnhold med 80 % RF (5).
- Bruttodensitet
- Porøsitet

Da kalkulasjonene ikke var sensitive for den eksakte verdien av maks vanninnhold (vanninnholdet ble aldri over fri metning) ble hjelpefunksjonen for estimering av porøsiteten benyttet (6), som vist i likning 14.

$$Porøsitet = \frac{1 - \rho_{brutto}}{\rho_{netto}} \quad (14)$$

Hvor:

ρ_{brutto} = densiteten til konstruksjonen inkludert alle porer og uthullinger

ρ_{netto} = densiteten til konstruksjonen ekskludert alle porer og uthullinger

I forkant av den første teglsteinsimuleringen (*T1*) ble approksimeringsfunksjonen for å få en bedre tilpasset fuktlagringsfunksjon benyttet, samt approksimeringsfunksjonen for å generere væsketransportkoeffisient (D_{ws}) basert på laboratoriemålt absorpsjonskoeffisient. Alle materialparametere for den første simuleringen er presentert i Tabell 17.

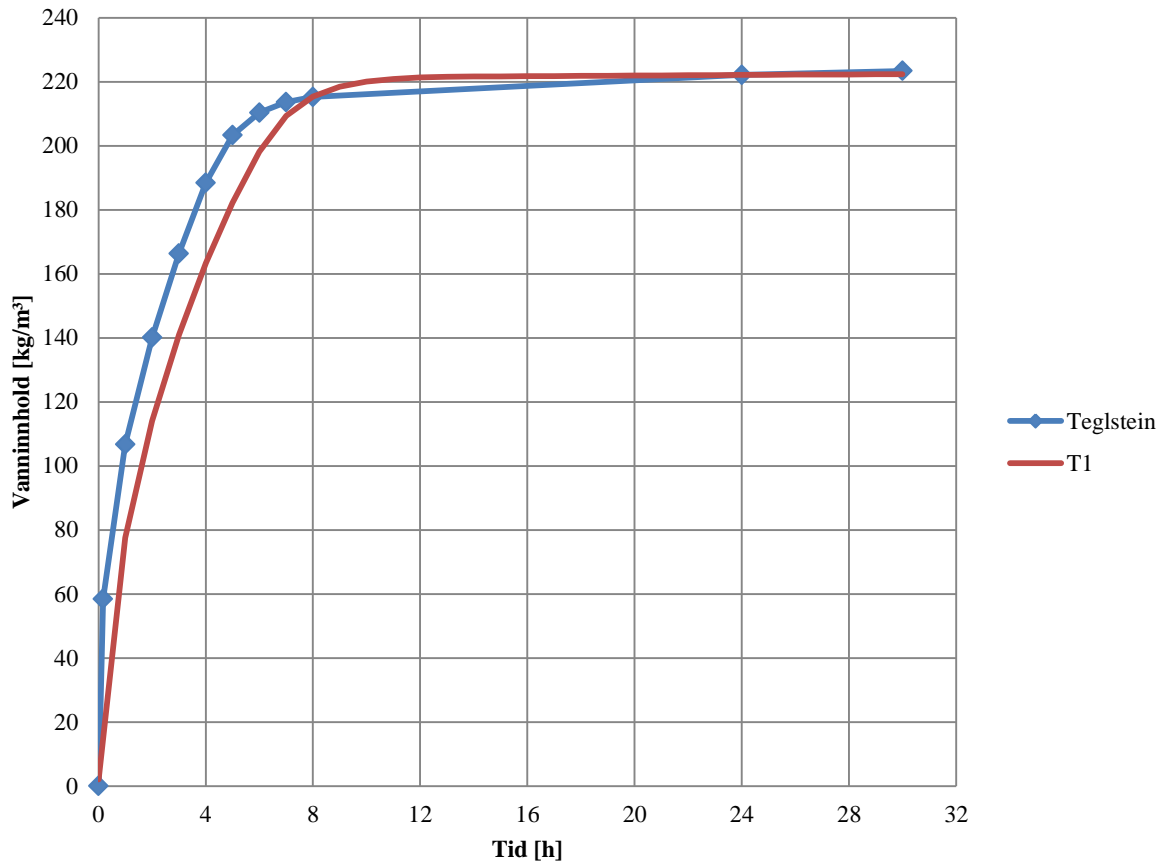
Tabell 16 – Materialeegenskaper til *Solid Brick Masonry* fra *WUFI* sin materialdatabase (6).

Brutto densitet	1900 [kg/m ³]
Porøsitet	0,24 [m ³ /m ³]
Vanninnhold ved 80 % RF	10 [kg/m ³]
Vanninnhold ved 100 % RF	190 [kg/m ³]
Væsketransportkoeffisient ved 80 % RF	2,5·10 ⁻¹⁰ [m ² /s]
Væsketransportkoeffisient ved 100 % RF	1,2·10 ⁻⁶ [m ² /s]
Absorpsjonskoeffisient	0,11 [kg/m ² ·s ^{0,5}]

Tabell 17 – Materialeegenskaper benyttet i simulering *T1*, utarbeidet fra laboratoriemålingene samt Johansson et al. (5).

Brutto densitet	1214 [kg/m ³]
Porøsitet	0,29 [m ³ /m ³]
Vanninnhold ved 80 % RF	18,5 [kg/m ³]
Vanninnhold ved 100 % RF	234 [kg/m ³]
Væsketransportkoeffisient ved 80 % RF	2,3·10 ⁻⁹ [m ² /s]
Væsketransportkoeffisient ved 100 % RF	1,3·10 ⁻⁶ [m ² /s]
Absorpsjonskoeffisient	0,138 [kg/m ² ·s ^{0,5}]

Resultatet fra simulering T1 er presentert i Figur 42 og er vist sammen med det tilsvarende resultatet fra laboratoriemålingene.



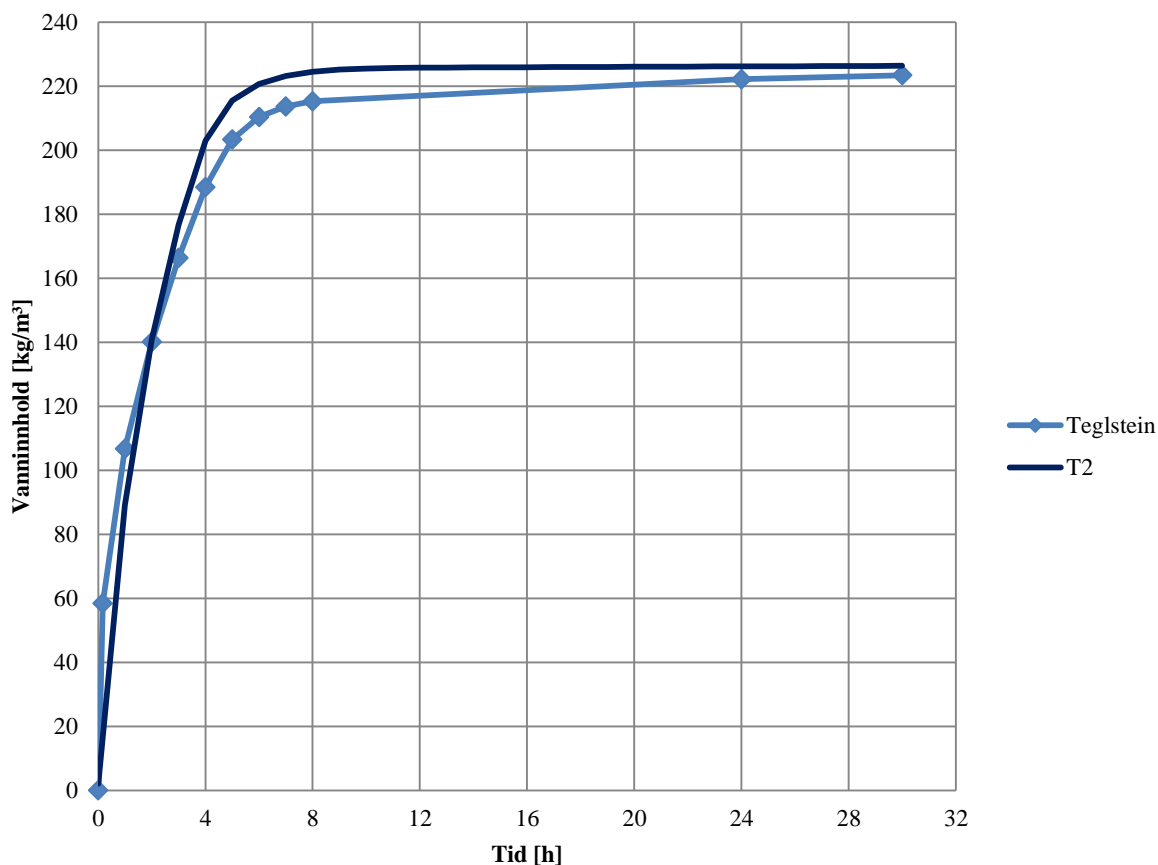
Figur 42 – Resultatet fra laboratoriemålingene til teglstein omgjort til kg/m^3 sammen med resultatet fra første teglsteinssimulering (T1).

Som man kan se jevner begge kurvene seg ut på en lik verdi som var i underkant av 223 kg/m^3 , men simuleringen har en lavere absorpsjonsrate enn laboratoriemålingene viser i begynnelsen.

Før den neste simulasjonen ble materialets oppførsel testet ved endring av fuktrelaterede parametere. Etter flere justeringer ble det observert at porøsitet, dampmotstand, omfordelingskoeffisienten og vanninnhold ved 80 % RF hadde marginal betydning. Dermed ble væsketransportskoeffisienten fra Johansson et al. (5) sine erfaringstall benyttet for å undersøke om absorpsjonsraten ble mer lik de målte verdiene. Endringen ble som vist i Tabell 18 og resultatene er vist i Figur 43.

Tabell 18 - D_{ws} for simulering T1 og T2

Simulering T1: D_{ws} generert av WUFI på bakgrunn av målt A_w		Simulering T2: D_{ws} basert på erfaringstall fra Johansson et al. (5)	
Vanninnhold [kg/m^3]	D_{ws} [m^2/s]	Vanninnhold [kg/m^3]	D_{ws} [m^2/s]
18,5 (RF 80 %)	$2,3 \cdot 10^{-9}$	18,5 (RF 80 %)	$2,5 \cdot 10^{-9}$
234 (RF 100 %)	$1,3 \cdot 10^{-6}$	234 (RF 100 %)	$2,4 \cdot 10^{-6}$

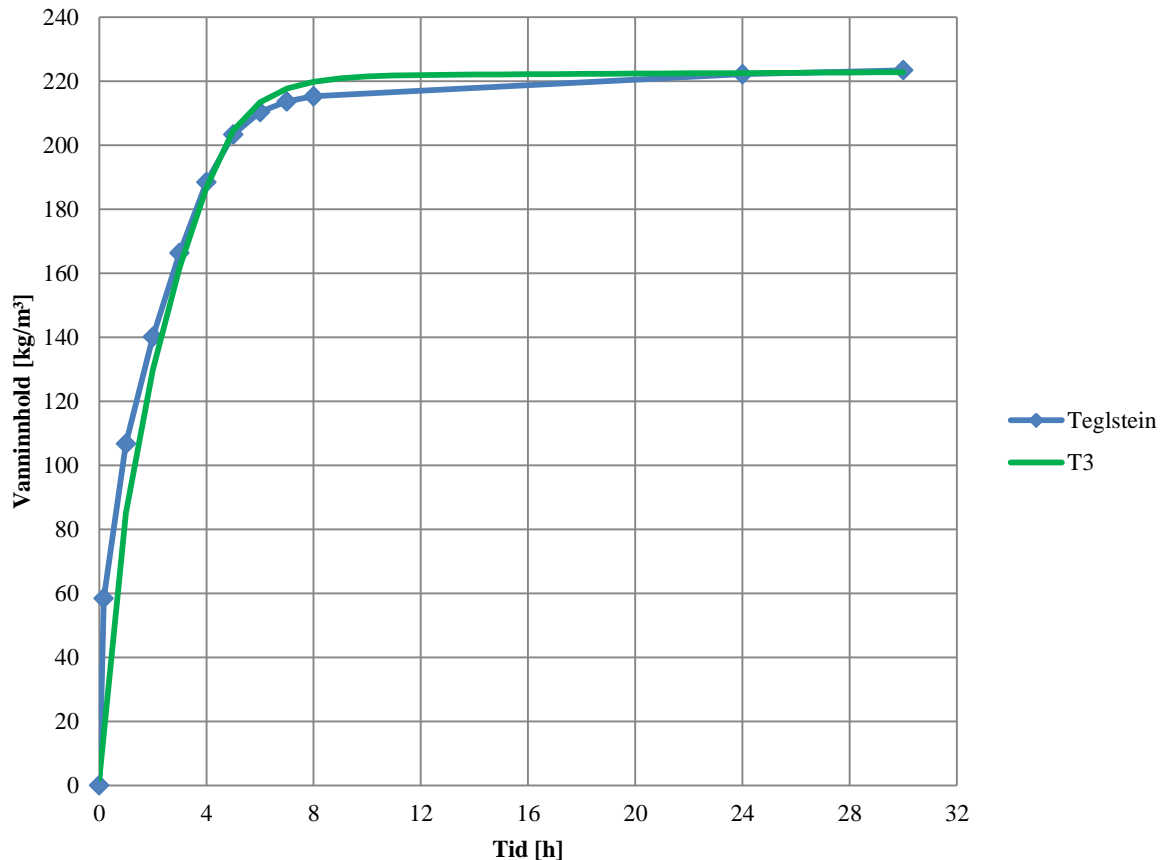


Figur 43 – Resultatet fra laboratoriemålingene til teglstein sammen med resultatene fra teglsteinssimulering T2

Som forventet kan en se at D_{ws} -verdiene fra Johansson et al. har gitt materiale en høyere absorpsjonsrate samt økt vanninnholdet hvor kurven stabiliser seg. Den nye raten og vanninnholdet var høyere enn det som var ønskelig og for å kunne oppnå et resultat som samsvarte med målingene måtte både absorpsjonsraten og vanninnholdet hvor grafen stabiliserte seg senkes. Endringene som ble utført er vist i Tabell 19 og det simulerte resultatet sammenliknet med laboratorieresultatene er vist i Figur 44:

Tabell 19 - D_{ws} for simulering T2 og T3

Simulering T2: D_{ws} basert på erfaringstall fra (5)		Simulering T3 Justert D_{ws} for å tilnærme laboratorieresultatene	
Vanninnhold [kg/m^3]	DWS [m^2/s]	Vanninnhold [kg/m^3]	DWS [m^2/s]
18,5 (RF 80 %)	$2,5 \cdot 10^{-9}$	18,5 (RF 80 %)	$4,5 \cdot 10^{-9}$
234 (RF 100 %)	$2,4 \cdot 10^{-6}$	234 (RF 100 %)	$1,7 \cdot 10^{-6}$



Figur 44 – Resultatet fra laboratoriemålingene teglstein sammen med resultatet fra teglsteinssimulering T3

Som man kan se i Figur 44 var simulering T3 en veldig god tilnærming til absorpsjonsforsøket.

4.4.2 Mørtelfuge KC 50/50 komprimert

For modellen av mørtelfugen ble det tatt utgangspunkt i *Lime Cement Morar, coarse*, fra WUFI sin materialdatabase da denne mørtelen hadde et passende mettet vanninnhold, vist i Tabell 20. I Tabell 21 vises materialegenskapene benyttet i første mørtelfugesimulering (M1) og modellen ble justert med målte verdier for følgende parametere ved første simuleringsforsøk:

- Absorpsjonskoeffisienten
- Mettet vanninnhold

➤ **Bruttodensitet**

Tabell 20 - Materialeegenskaper til *Lime Cement, Mortar, coarse* fra *WUFI* sin materialdatabase (6).

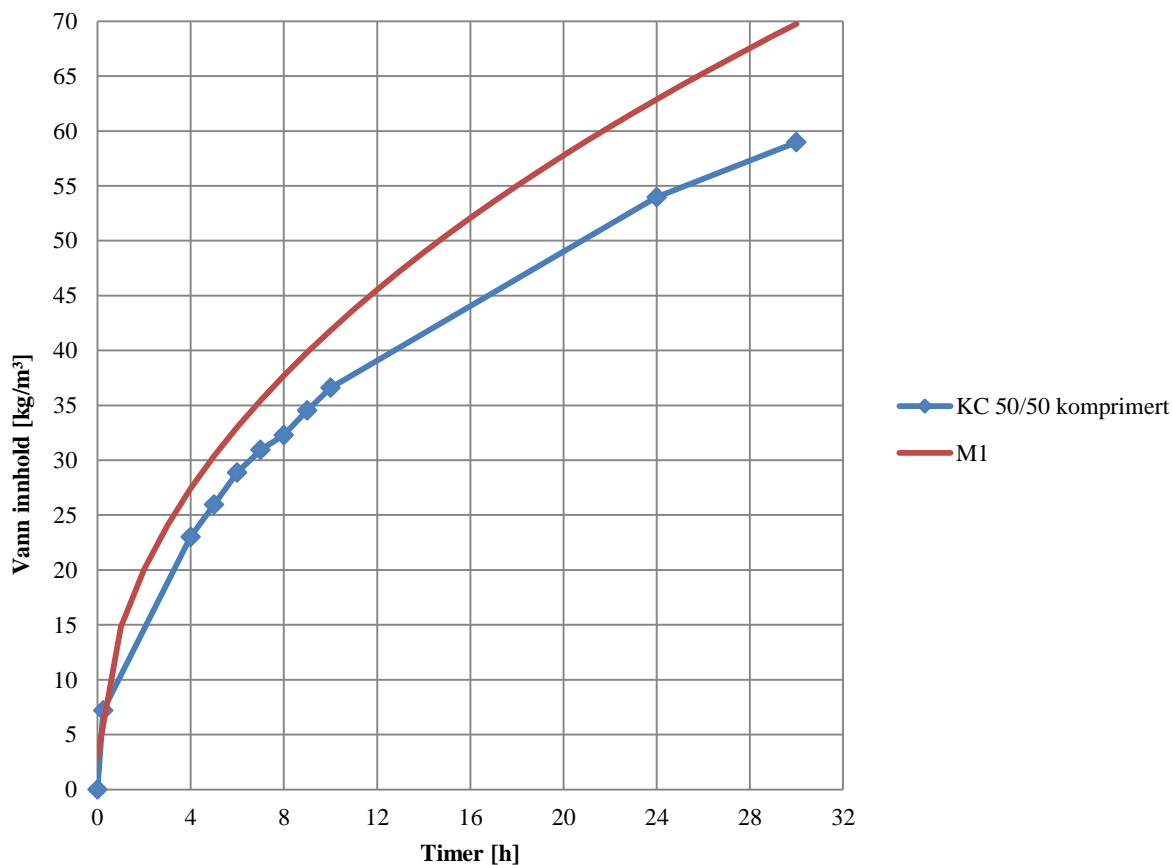
Brutto densitet	1910 [kg/m ³]
Porøsitet	0,25 [m ³ /m ³]
Vanninnhold ved 80 % RF	24,65 [kg/m ³]
Vanninnhold ved 100 % RF	200 [kg/m ³]
Væsketransportskoeffisient ved 80 % RF	1,6·10 ⁻⁹ [m ² /s]
Væsketransportskoeffisient ved 100 % RF	6,9·10 ⁻⁷ [m ² /s]
Absorpsjonskoeffisient	0,085 [kg/m ² ·s ^{0,5}]

Tabell 21 - Materialeegenskaper benyttet i simulering M1, utarbeidet fra laboratoriemålingene samt *Johansson et al.* (5).

Brutto densitet	1653 [kg/m ³]
Porøsitet	0,25 [m ³ /m ³]
Vanninnhold ved 80 % RF	24,65 [kg/m ³]
Vanninnhold ved 100 % RF	155 [kg/m ³]
Væsketransportskoeffisient ved 80 % RF	2,0·10 ⁻¹⁰ [m ² /s]
Væsketransportskoeffisient ved 100 % RF	6,7·10 ⁻⁸ [m ² /s]
Absorpsjonskoeffisient	0,0206 [kg/m ² ·s ^{0,5}]

Materialeegenskapene til mørtelen fra *Johansson et al.* (5) var ikke sammenlignbare da målingene i denne oppgaven ble gjennomført på mørtelfuger som hadde herdet mellom to teglsteiner, mens *Johansson et al.* brukte mørtelprismer som hadde herdet i en metallform.

Også her ble approksimeringsfunksjonen samt genereringsfunksjonen til *WUFI* brukt for å få en henholdsvis bedre tilpasset fuktlagringsfunksjon og væsketransportkoeffisient. Figur 45 viser resultatet av simulering *M1* sammenlignet med det laboratoriemålte resultatet.



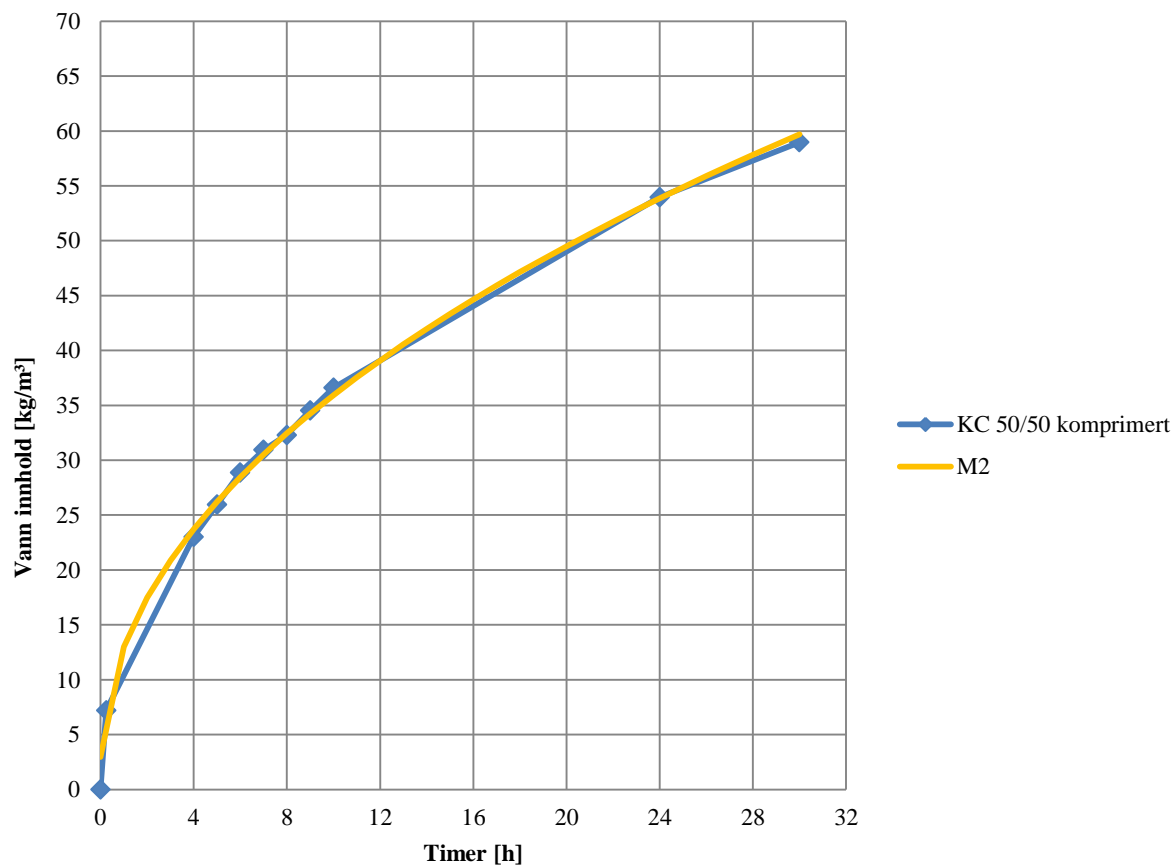
Figur 45 – Resultatet fra laboratoriemålingene til mørtelfuge KC 50/50 komprimert omgjort til [kg/m³] sammen med resultatet fra første mørtelsimulering (M1).

Man kan tydelig se at simuleringen hadde en høyere absorpsjonsrate i begynnelsen. I motsetning til første simulering for teglsteinen tolker *WUFI* absorpsjonskoeffisienten som høyere enn det verdien representerer. Dette var noe overraskende, men det kan være et resultat av at mørtelfugene har herdet mellom teglsteiner og dermed har egenskaper som ikke er tatt hensyn til.

I likhet med simulering T3 for teglsteinen var det ønskelig å senke absorpsjonsraten og D_{ws} ved mettet vanninnhold ble derfor senket. Endringen som ble utført for neste mørtelsimulering (M2) er vist i Tabell 22 og resultatet er vist i Figur 46.

Tabell 22 - D_{ws} for simulering M1 og M2

Simulering M1: D_{ws} generert av <i>WUFI</i> på bakgrunn av målt A_w		Simulering M2 Justert D_{ws} for å tilnærme laboratorieresultatene	
Vanninnhold [kg/m ³]	D_{ws} [m ² /s]	Vanninnhold [kg/m ³]	D_{ws} [m ² /s]
24,65 (RF 80 %)	$2 \cdot 10^{-10}$	24,65 (RF 80 %)	$2 \cdot 10^{-10}$
155 (RF 100 %)	$6,7 \cdot 10^{-8}$	155 (RF 100 %)	$4,5 \cdot 10^{-8}$

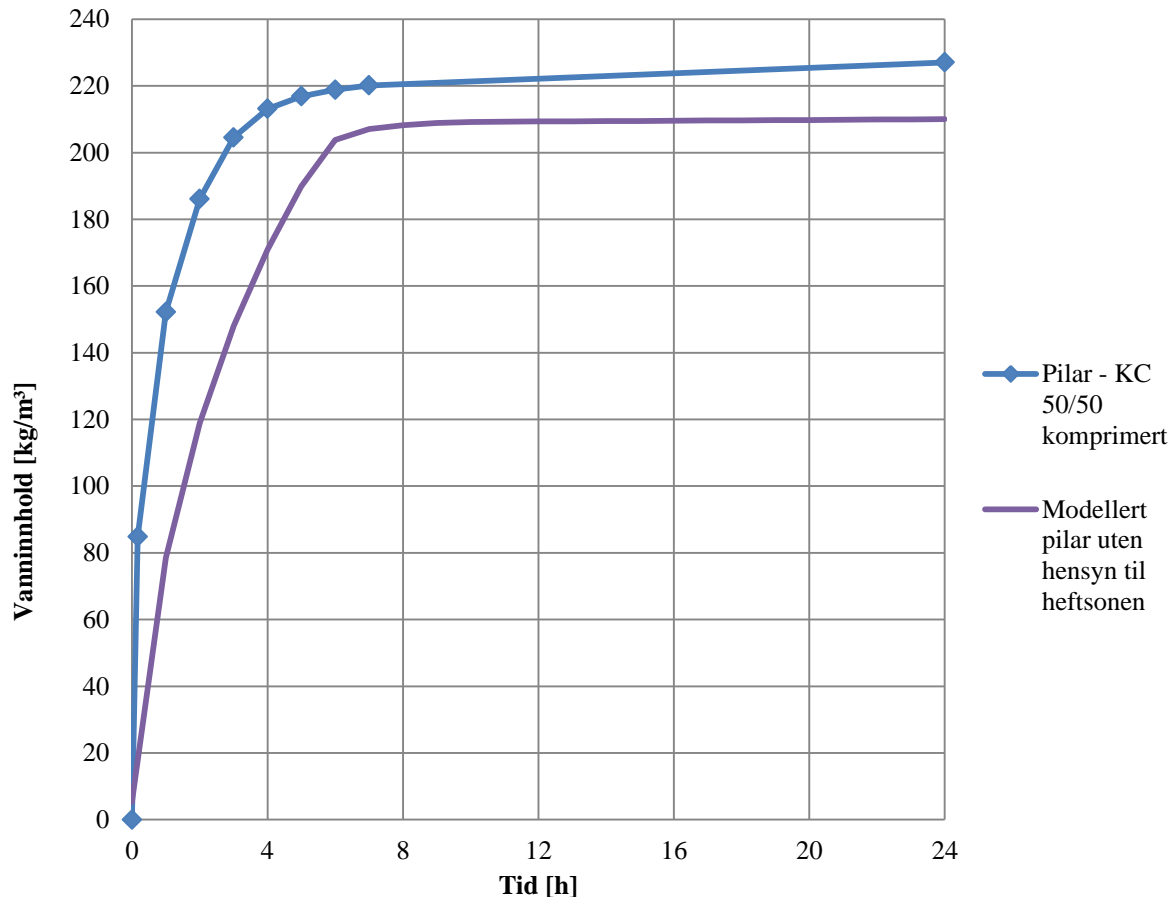


Figur 46 – Resultatet fra laboratoriemålingene til mørtelfuge KC 50/50 komprimert sammen med resultatet fra mørtelsimulering M2.

Som man kan se i Figur 46 er simulering M2 en veldig god tilnærming til absorpsjonsforsøket for mørtelfugen.

4.5 Heftsonetemodeller

Som referanse ble det gjennomført en simulering på en murt pilar der mørtel og tegl hadde perfekt hydraulisk kontakt (uten et heftsonemateriale). Materialelegenskapene til tegl og mørtel ble satt til verdiene fra simulering *T3* og *M2*. Resultatet av denne simuleringen sammenlignet med det laboratoriemålte vannopptaket er vist i Figur 47.



Figur 47 – Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – KC 50/50 komprimert omgjort til [kg/m³] sammen med modellert pilar uten hensyn til heftsonen.

Som forventet resulterte simuleringen i et lavere mettet vanninnhold samt lavere absorpsjonsrate da bidraget til mørtelfugen uten heftsonen var for lavt. Om man kun ser på volumandelene og w_{24} , henholdsvis 86 % og 223,4 kg/m³ for teglet og 24 % og 54 kg/m³ for mørtelen skal kurven teoretisk sett stabilisert seg ved 205 kg/m³, noe som stemmer bra med det simulerte resultatet. Dette viser at det ikke kan antas perfekt hydraulisk kontakt i dette tilfellet mellom mørtel og tegl.

4.5.1 Metode 1 – Heftsonematerialet

Heftsonen ble så forsøkt modellert som et ekstra materialsjikt i mellom mørtel og tegl. For heftsonen ble det tatt utgangspunkt i *Aerated Clay Brick* (density: 600 kg/m³), i WUFI sin materialdatabase, se Tabell 23. Som tykkelser på heftsonematerialet var det for alt under 5 mm vanskelige å justere parameterne da man enten fikk for store eller for små endringer i vanninnholdet. Ved 5 mm var det mulig å justere de ønskede materialparameterne med kontrollerte endringer i simuleringresultatene. Etter flere simuleringforsøk ble det bekreftet

at også for heftsonematerialet var det kun mettet vanninnhold samt absorpsjonskoeffisienten/væsketransportskoeffisienten som påvirket simuleringresultatene.

Materialeegenskapene til heftsonematerialet er presentert i Tabell 24 og resultatet av første simulering er vist i Figur 48.

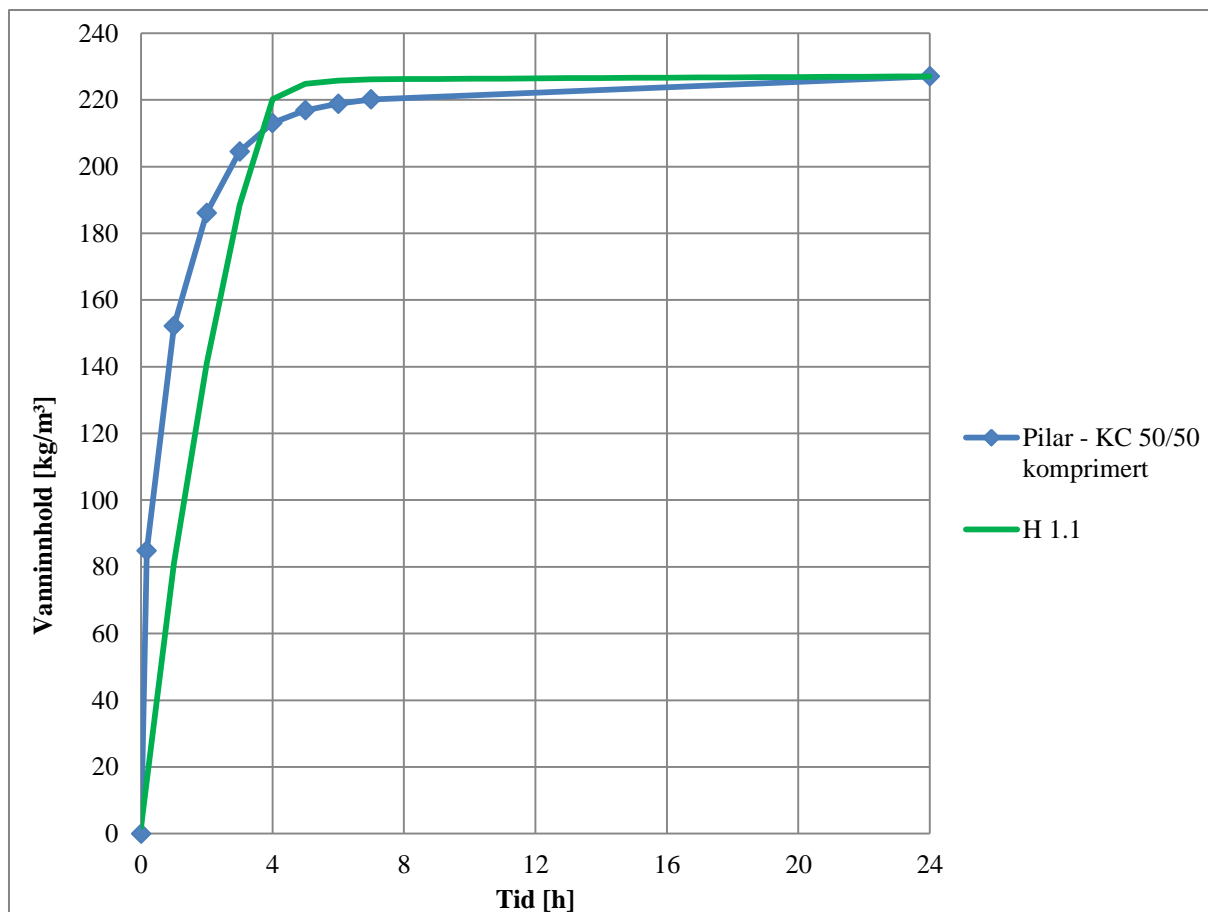
Tabell 23 - Materialeegenskaper til Aerated Clay Brick (density: 600 kg/m³) fra WUFI sin materialdatabase (6).

Brutto densitet	600 [kg/m ³]
Porøsitet	0,77 [m ³ /m ³]
Vanninnhold ved 80 % RF	11 [kg/m ³]
Vanninnhold ved 100 % RF	188 [kg/m ³]
Væsketransportskoeffisient ved 80 % RF	1,4·10 ⁻⁹ [m ² /s]
Væsketransportskoeffisient ved 100 % RF	9,7·10 ⁻⁷ [m ² /s]
Absorpsjonskoeffisient	0,095 [kg/m ² ·s ^{0,5}]

Tabell 24 - Materialeegenskaper benyttet i simulering H 1.1, utarbeidet fra laboratoriemålingene samt Johansson et al (5).

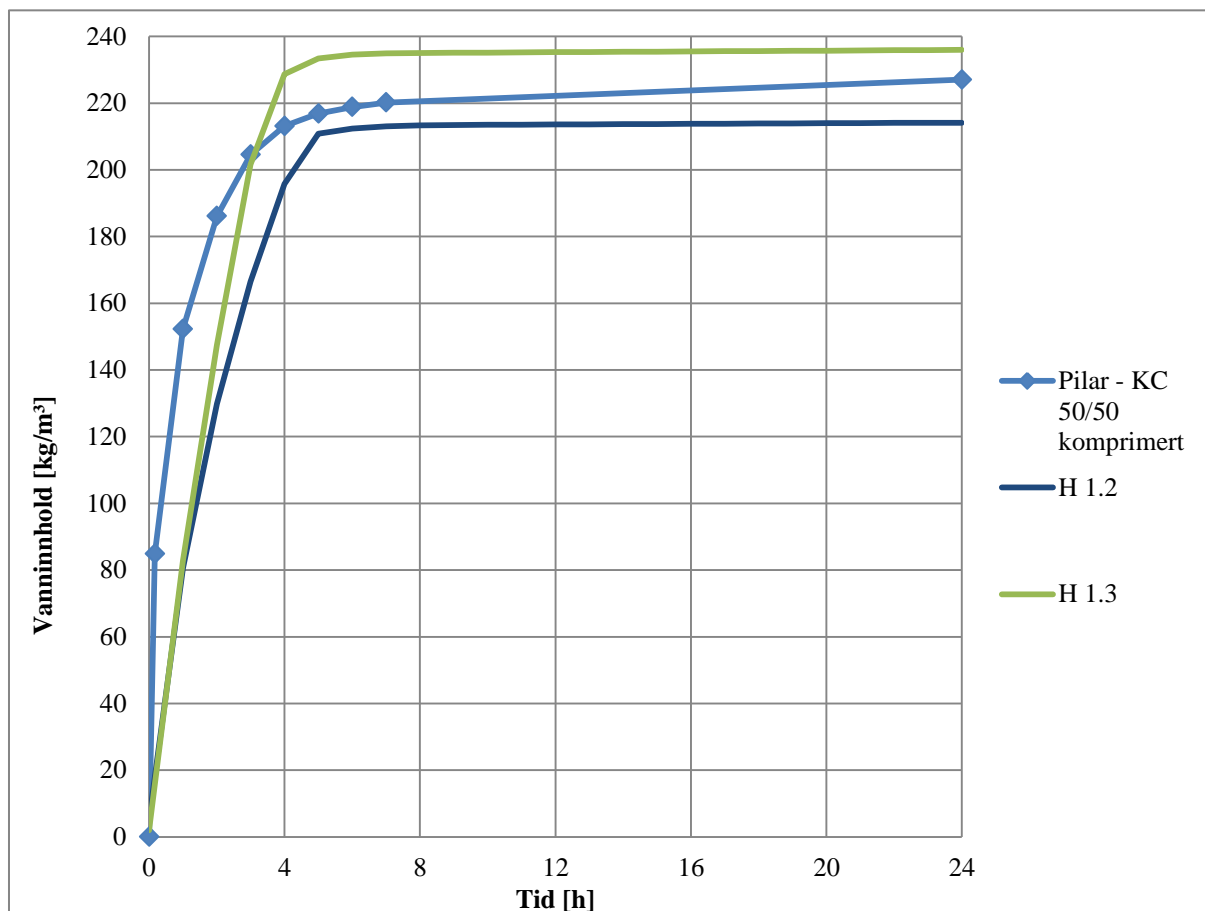
Brutto densitet	600 [kg/m ³]
Porøsitet	0,77 [m ³ /m ³]
Vanninnhold ved 80 % RF	11 [kg/m ³]
Vanninnhold ved 100 % RF	600 [kg/m ³]
Væsketransportskoeffisient ved 80 % RF	3,9·10 ⁻⁸ [m ² /s]
Væsketransportskoeffisient ved 100 % RF	3,4·10 ⁻⁵ [m ² /s]
Absorpsjonskoeffisient	1,8 [kg/m ² ·s ^{0,5}]

Etter flere justeringer av både mettet vanninnhold samt absorpsjonskoeffisienten/væsketransportskoeffisienten for heftsonematerialet ga oppsettet vist i Tabell 24 den beste tillæringen. Denne endringen tilsvarte i tillegg til en økning i mettet vanninnhold fra 188 kg/m³ til 600 kg/m³ også en økning i A_w fra 0,095 til 1,8 kg/m²·s^{0,5} og kurven er vist i Figur 48.



Figur 48 – Resultatet fra laboriemålingene til Pilar – KC 50/50 komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 1.2.

For å fremheve effekten av å endre tykkelsen på heftsonematerialet ble det også utført simuleringer med materialspesifikasjonene fra Tabell 24 med tykkelser på 1 mm og 10 mm, henholdsvis simulering H 1.2 og H 1.3, se Figur 49.

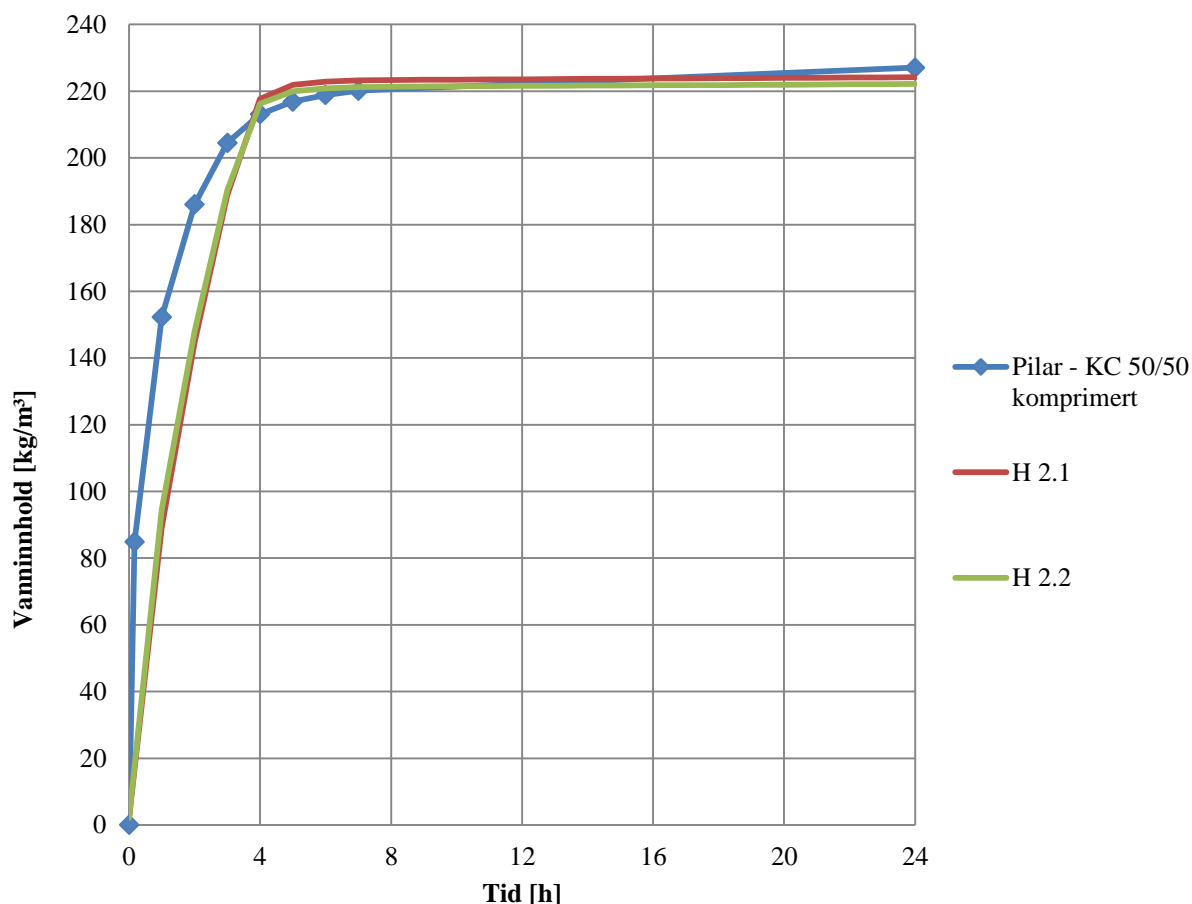


Figur 49 – Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – KC 50/50 komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 1.2 (1 mm) og H 1.3 (10 mm)

Både pilarens mettede vanninnhold og absorpsjonsrate økte med økt tykkelse av heftsonematerialet. Til tross for dette ble ikke raten tilstrekkelig høy med tanke på resultatene fra forsøket

4.5.2 Metode 2 – Inntrekking av heftsonematerialet

Heftsonemateriale som ga den beste tilnærmingen i avsnitt 4.5.1 ble brukt videre i denne undersøkelsen. En tykkelse på 5 mm brukt, der materialet først ble trukket 10 mm inn i konstruksjonen (H 2.1) og deretter 20 mm (H 2.2), se Figur 50.

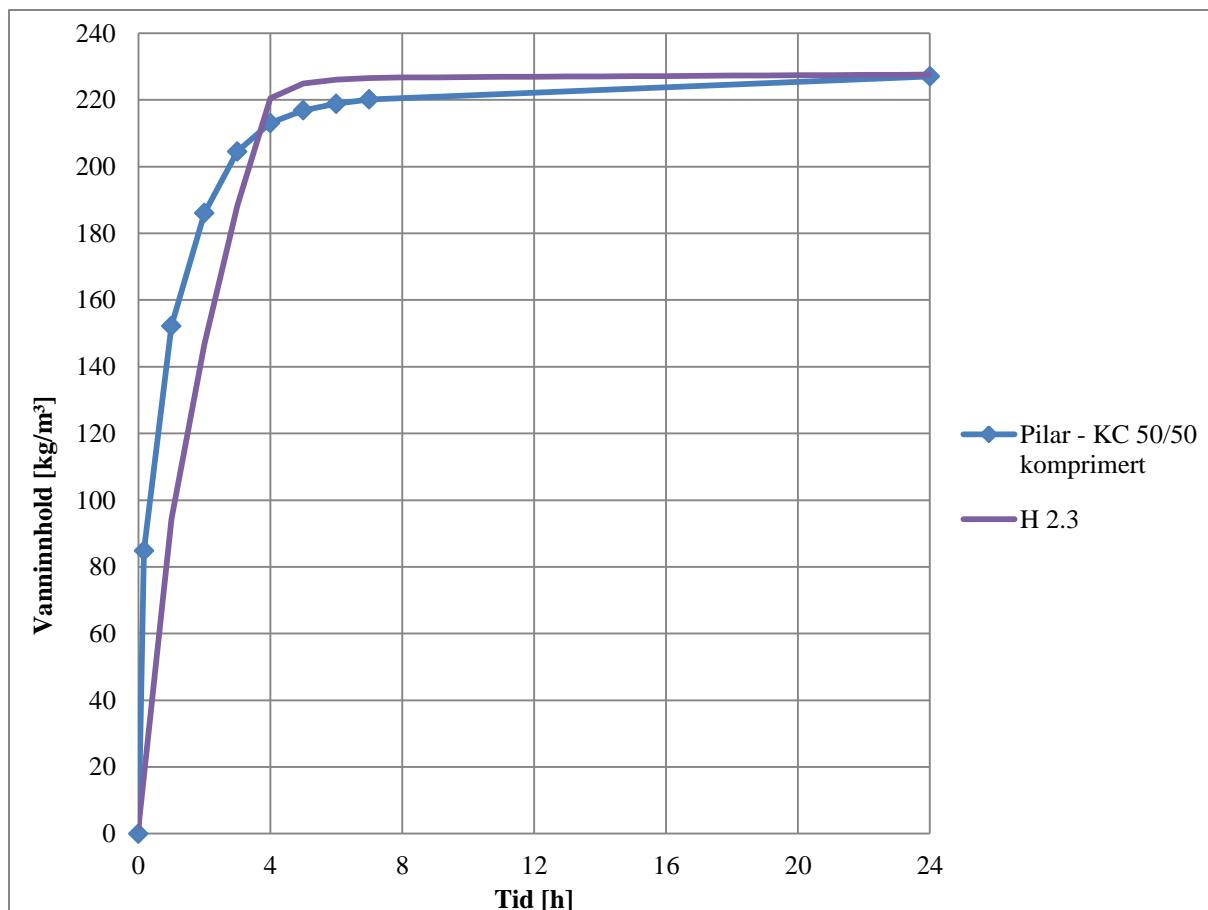


Figur 50 – Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – KC 50/50 komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 2.1 og H 2.2

Som Figur 50 viser, vil en inntrekning av heftsonematerialet medføre en marginal senkning i w_{24} uten å påvirke absorpsjonsraten og begge simuleringene ga en god tilnærming til laboratoriemålingen. Videre justeringer med utgangspunkt i heftsonematerialet med tykkelse på 5 mm og trukket 20 mm inn i konstruksjonen ble utført og endringene er presentert i Tabell 25. Denne kombinasjonen ga det resultatet som var nærmest det målte w_{24} med denne metoden og er vist i Figur 51.

Tabell 25 - D_{ws} for heftsonesimulering H 2.2 og H2.3

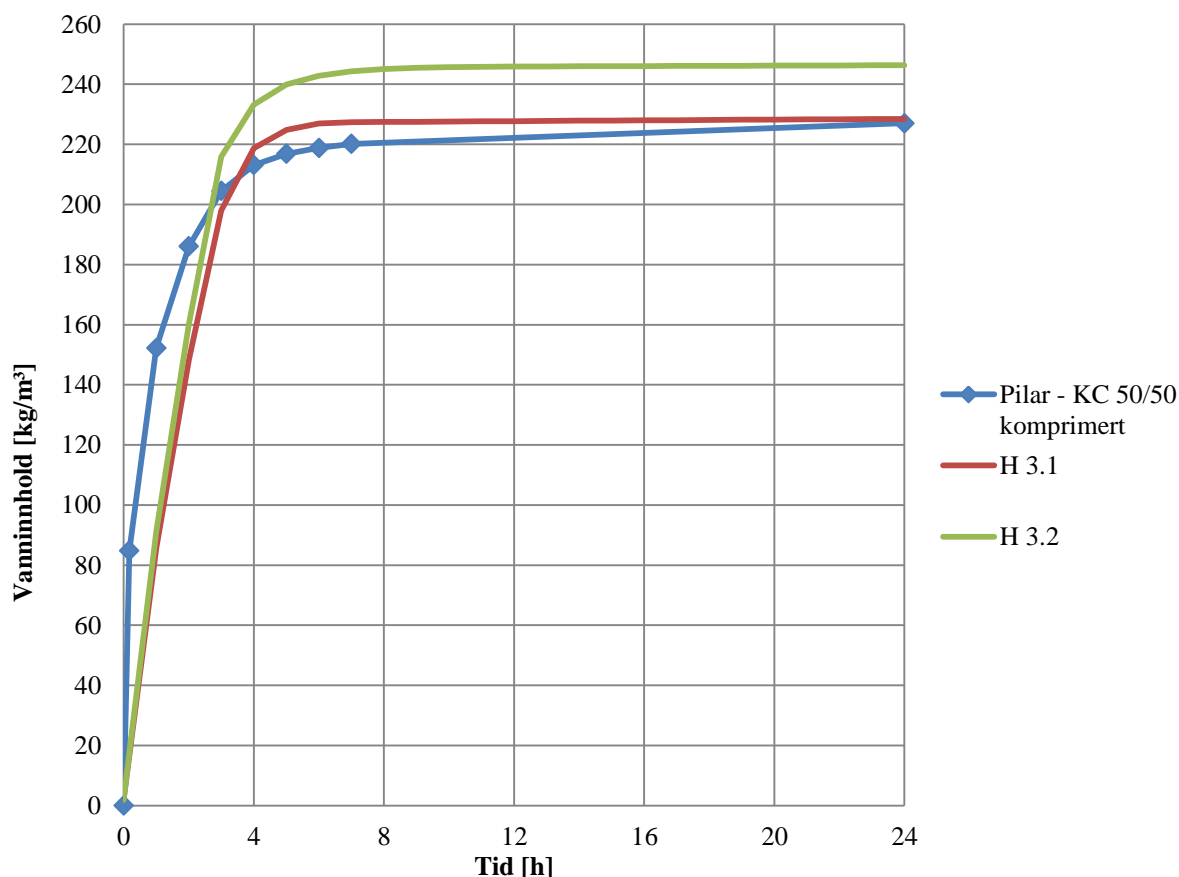
Simulering H 2.2 Heftsonemateriale fra avsnitt 4.5.1		Simulering H 2.3 Justert for tilnærming av målte resultater	
Vanninnhold [kg/m ³]	D_{ws} [m ² /s]	Vanninnhold [kg/m ³]	D_{ws} [m ² /s]
11 (RF 80 %)	$3,9 \cdot 10^{-8}$	11 (RF 80 %)	$2,8 \cdot 10^{-8}$
600 (RF 100 %)	$3,4 \cdot 10^{-5}$	700 (RF 100 %)	$2,5 \cdot 10^{-5}$



Figur 51 – Resultatet fra laboratiemålingene til Pilar – KC 50/50 komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 2.3

4.5.3 Metode 3 – Mørtel delvis byttet ut med heftsonemateriale

Materialet fra simulering *H 1.1* som ga den beste tilnærmingen til den målte vannabsorpsjonen i avsnitt 4.5.1, ble benyttet videre her. 10 mm av mørtelfugen ble først byttet ut med 2 heftsoner på 5 mm hver (*H 3.1*), deretter ble hele mørtelfugen substituert med heftsonematerialet (*H 3.2*). Resultatene er vist i Figur 52.



Figur 52 - Resultatet fra laboratoriemålingene til Pilar – KC 50/50 komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 3.1 og H 3.2

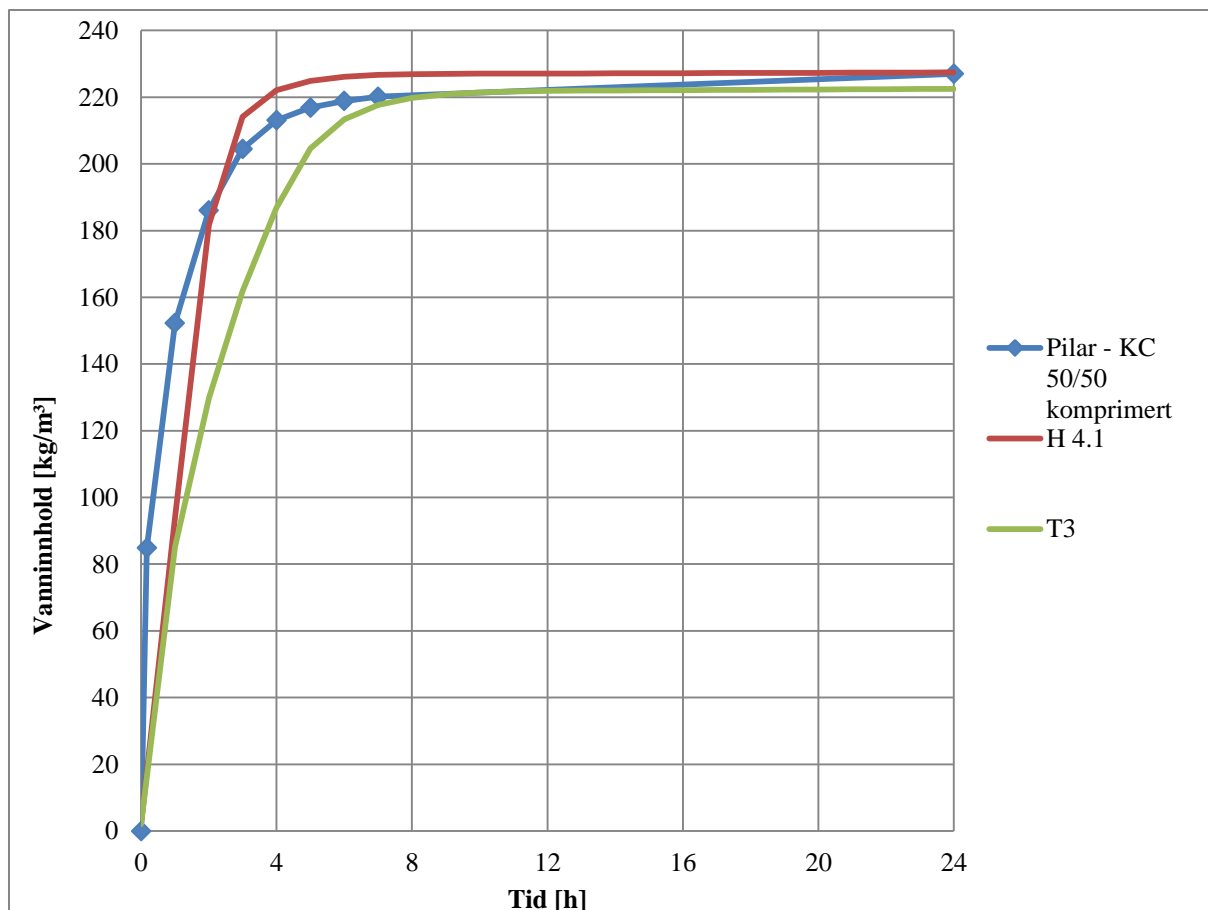
Trenden i kurvene i Figur 52 viser økning i både w_{24} og absorpsjonsrate og denne utviklingen er ikke optimal da det kun er ønskelig med en stigning i absorpsjonsraten uten økning i vanninnhold. H 3.1 og H 3.2 viser en lavere rate enn resultatene fra forsøket og H 3.2 viser i tillegg for høyt vanninnhold. Etter flere justering var det ikke mulig å endre absorpsjonsraten uten å øke w_{24} ved bruk av denne teknikken.

4.5.4 Metode 4 – Homogent materiale

For å gjøre teglsteinssimulering T3 til en tilnærming av pilaren var det nødvendig å øke absorpsjonsraten og w_{24} . Pilaren har også en annerledes krumming på kurven der materialet stabiliserer seg. Endringene som ble gjort er vist i Tabell 26 og resultatet sammenlignet med laboratorieforsøket er vist i Figur 53.

Tabell 26 – D_{ws} teglsteinssimulasjonen og simulering H 4.1

T3		Simulering H 4.1	
Vanninnhold [kg/m³]	D_{ws} [m²/s]	Vanninnhold [kg/m³]	D_{ws} [m²/s]
18,5 (RF 80 %)	$4,5 \cdot 10^{-9}$	18,5 (RF 80 %)	$4,5 \cdot 10^{-9}$
234 (RF 100 %)	$1,7 \cdot 10^{-6}$	234 (RF 100 %)	$6,5 \cdot 10^{-6}$



Figur 53 - Resultatet fra laboratiormålingene til Pilar – KC 50/50 komprimert sammen med resultatet fra pilarsimulering H 4.1 og teglsteinssimulering T3

Som en kan se fra Figur 53 var dette den beste tilnærmingen til de målte resultatene av alle de utprøvede metodene. Her ble absorpsjonsraten rimelig lik de virkelige målingene og vanninnholdet etter 24 timer sammenfaller helt.

4.6 Diskusjon

Teglsteinen

Modelleringen av teglsteinen, mørtelfugen samt det kombinerte materialet fra *metode 4* ga gode tilnærminger til målingene fra laboratorieforskene. Dette var forventet siden disse var alle modellert som homogene materialer der det var lettere å forstå hvordan vanninnholdet endret seg ved justering av aktuelle parametere. Modellene var i tillegg i en større grad (med unntak av *metode 4*) basert på målte verdier noe som bidro til et bedre utgangspunkt for simuleringene.

Teglsteinen var det materialet som, etter noen justeringer, hadde best samsvar mellom simulering og målte verdier. Dette indikerte at med tanke på fukttransport oppførte dette materialet seg som tilnærmet homogent. Dagens teglstein blir produsert under kontrollerte forhold med en moderne produksjonsmetode som gir lite uregelmessigheter i strukturen. Men da væsketransporten ble bestemt av tilnærmingsfunksjonen i *WUFI* ble det observert avvik mellom det simulerte resultatet og laboratoriemålingene (se Figur 42). Laboratorieresultatene viste at teglsteinen absorberte vann mye raskere enn det simuleringene viste i løpet de første åtte timene. Dette var tidsrommet absorpsjonskoeffisienten ble bestemt i, noe som viser at *WUFI* sin tolkning av absorpsjonskoeffisienten i dette tilfellet sørger for en tregere absorpsjon enn det koeffisienten representerer i reelle målinger. Samme observasjon ble gjort av Johannson et al. (5) som undersøkte samme teglsteintype som den benyttet i denne oppgaven og vesketransportkoeffisienten ble også i dette tilfellet bestemt fra tilnærmingsfunksjonen som benyttes i *WUFI*. Resultatene viste at fuktopptaket i laboratoriemålingene gikk mye raskere enn det de numeriske simulasjonene estimerte, noe som indikerer at tilnærmingsfunksjonen for væsketransport, beskrevet nærmere i kapittel 2.6.2, ikke kan brukes som en god tilnærming for dette materialet.

Etter flere justeringer på materialparameterne til teglsteinen ble det observert at porøsitet, dampmotstand og vanninnhold ved 80 % RF hadde marginal betydning. Siden dette forsøket simulerte et fritt vannopptaksforsøk skjedde tilnærmet all fukttransport i væskefasen og dampmotstanden ble dermed irrelevant. Da fasaden på prøvene var i direkte kontakt med vann ble 100 % RF raskt oppnådd og det var dermed dette vanninnholdet som ble bestemmende. Da porøsiteten kun bestemmer grensene for hva maks vanninnhold kunne settes som ga en endring av denne ingen innvirkning på simuleringsresultatene.

For at vannopptaket skulle bli likt laboratoriemålingene var det D_{ws} som måtte justeres. $D_{ws}(w)$ ble som nevnt satt til fikserte verdier for vanninnholdet ved 0, 80 og 100 % RF og interpolering ble benyttet for verdier mellom disse. Av disse fikserte verdiene var det helt klart D_{ws} ved 100 % RF som hadde størst innvirkning på hastigheten til vannopptaket. Ved å endre $D_{ws, 100}$ fra $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, som var verdien beregnet fra tilnærmingsfunksjonen, til en $D_{ws, 100}$ lik $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ble vanninnholdkurven meget godt tilnærmet de målte verdiene. Selv om endringen fra $D_{ws, 80}$ fra $2,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ til $4,53 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ gjorde en liten forbedring i tilpasningen av kurven, så hadde denne verdien en meget liten innvirkning i forhold til $D_{ws, 100}$.

100·

Kurven fra laboratoriemålingene hadde en krumming som det i simuleringene ikke var mulig å oppnå. *WUFI* antar en mer fullstendig fylling av kapillærporene etter stabiliseringen (knekken) noe som sørget for en betydelig lavere absorpsjonsrate i dette området. Det ble dermed vanskelig å simulere hele absorpsjonsforløpet nøyaktig, noe som illustreres i Figur 43 og Figur 44.

Mørtelfugen

Som observert i de numeriske simulasjonene kommer det frem at type mørtel og dens materialeegenskaper har en svært liten direkte innvirkning på fuktopptaket til konstruksjonen. Dette bekreftes av laboratoriemålingene som i Figur 27 viser at selv om de mørteltypene som har påvist størst vannopptak bidrar til minimal økning i vannopptaket på de murte pilarene er dette mest sannsynlig på grunn av dårligere heftetablering. Sammenlignet med teglsteinen og bidraget fra heftsonen blir vannopptaket gjennom mørtelen forsvinnende lite. Her må det presiseres at det er en direkte kobling mellom heftetablering og mørtellegenskaper noe som gjør kunnskap om egenskapene til mørtelen viktig. Brocken (20) forklarer at med tanke på omfordelingen av vann i en murkonstruksjon har egenskapene til mørtelen en meget stor påvirkning. Dette betyr at selv om materialeegenskapene til mørtelen i denne analysen har liten direkte innvirkning, er det en viktig komponent for en modell av et murverk som ønsker å ta hensyn hele fuktingsprosessen.

Heftsonen

Metode 1 og *2* i simuleringen av heftsonen viste gode tilnærminger med tanke på w_{24} , men det ble ikke overensstemmelse med absorpsjonsraten som etter en viss helning ikke lot seg øke videre. Både pilarens w_{24} og absorpsjonsrate økte med økt tykkelse av heftsonematerialet i *metode 1*, men det var ikke mulig å få raten tilstrekkelig høy for å sammenfalle med resultatene fra forsøket. En økning av absorpsjonskoeffisienten til over $1,8 \text{ kg/m}\cdot\text{s}^{0.5}$ for *metode 1* hadde ingen innvirkning på absorpsjonsraten og det medførte kun en tidligere knekk på vanninnholdskurven. Siden absorpsjonsraten ikke økte med økt absorpsjonskoeffisient kan dette tyde på at det er et kapasitetsproblem begrenset av geometrien. Dette kunne også observeres i *metode 2* der inntrekning av fugen ikke påvirket absorpsjonsraten, noe som indikerer at absorpsjonsflaten til heftsonematerialet var for liten, i forhold til de andre materialene, til å kunne påvirke resultatene i tilstrekkelig grad.

Metode 3, vist i Figur 52, bekrefter tanken om at en større andel av heftsonemateriale ville gi muligheten til å få en bedre absorpsjonsrate. Dette var som forventet da det ble byttet ut et materiale med lavt sug og w_{24} (mørtel) med et materiale med høyt sug og større w_{24} (heftsonemateriale). Men det ble også i dette tilfellet ikke mulig å få til et hurtig nok vannopptak og siden kurven stabiliserte seg rundt fire timer uavhengig av justeringer ble det bare mulig å få endret absorpsjonsraten observerbart men ikke tilstrekkelig.

I realiteten har heftsonen i tillegg til en høy sugeevne også gode omfordelingsevner av fukten til nærmeste teglstein og mørtelfuge. Som vist i minuttugforsøket utført på teglsteinen hadde liggeflaten et raskere vannopptak enn det løpersiden hadde. Da det i simuleringene kun er mulig å ha samme absorpsjonshastighet på liggeflaten som på løpersiden er det åpenbart at absorpsjonen som skjedde i disse sjiktene, i virkeligheten ikke kunne tilnærmes med de undersøkte heftsonemodellene.

Metode 4 besto kun av ett homogent materiale noe som betydde at egenskapene til hele fasadeflaten kunne justeres og det ble mulig å få resultater som stemte meget godt med de virkelige målingene. Absorpsjonsraten fikk en tilstrekkelig helning uten at det ble nødvendig å øke w_{24} . Dette stemmer med observasjoner gjort av Brocken (91), der det konkluderes med at det fra et praktisk ståsted ikke gir mening å bestemme kontaktegenskaper til heftsonen på et *mikronivå* grunnet dens kompliserte natur. Han påstår at det vil være best å lage en simpel modell som inkorporer effektene av heftsonen og at dette vil kunne bli gjort med en tilfredsstillende nøyaktighet. Problemet med en slik modell, som *metode 4* kan sies å være, er at det ikke lenger blir mulig å bruke inndata fra de respektive tegl eller mørteltypene og at det da må gjøres målinger på ferdigmurte prøvestykker fra det aktuelle murverket for å skaffe materialdata.

5 Konklusjon

Det reelle vannopptaket i en murkonstruksjon kan ikke forklares med de isolerte materialeegenskapene til mur og mørtel alene. Kontaktflaten mellom teglsteinen og mørtel, referert til som heftsonen, vil i varierende grad sørge for økt hastighet på vannopptaket. Størrelsesordenen på heftsonens bidrag vil være avhengig av herdeforløpet til mørtelfugen som igjen er avhengig av både teglsteinens egenskaper og mørtelens egenskaper. Selv om mørtelfugens egenskaper isolert sett ikke har noen merkbar innvirkning på vannopptaket, så har materialeegenskapene og sammensetningen til mørtel stor innflytelse på heftetableringen med teglsteinen som er avgjørende for heftsonens ytelse.

Følgende punkter blir gitt som svar på problemstillingene:

- Flere studier viser god dokumentasjon av heftsonens forstyrrende innvirkning på fukttransporten i sammensatte materialer. I litteraturen er heftsonen i stor grad behandlet som en motstand i fukttransporten (permeabilitet) som opptrer i sjiktet mellom materialer. Denne motstanden er et resultat av følgende to fenomener:
 - ❖ Feiltilpasning mellom porestrukturen til de aktuelle materialene, kalt *naturlig kontakt*.
 - ❖ En luftlomme dannes mellom de aktuelle materialene.Selv om heftsonen blir mye omtalt i litteraturen som en sjiktpermeabilitet for omfordelingen av væske er det ikke funnet noen kilder som diskuterer heftsonens innvirkning på vannopptaket.
- I laboratorieforsøket som ble utført viste målingene på de murte pilarene at heftsonen bidrar til et raskere vannopptak enn det en teoretisk sammensetning av teglstein og mørtel ville tilsi. Dette ble uttrykt ved bestemmelsen av absorpsjonskoeffisienten som ble høyere for pilarene enn den ble for teglsteinen. Teglsteinen hadde en målt absorpsjonskoeffisient på $0,138 \text{ kg/m}\cdot\text{s}^{0.5}$ mens pilarene hadde en koeffisient som varierte fra $0,139$ til $0,157 \text{ kg/m}\cdot\text{s}^{0.5}$. Heftsonen ble også synliggjort av skjærkapasitetsforsøket der resultatene viste en klar sammenheng mellom heftetablering og skjærkapasitet for pilarene. Pilaren (murt med fuktet teglstein og mørtel av type M5) med best heftetablering viste en klart høyere skjærkapasitet enn de andre prøvene.
- Å lage en detaljert modell som tok hensyn til heftsonens økte væsketransport viste seg å være problematisk grunnet den kompliserte naturen til heftsonen. De tre metodene som modellerte heftsonen på et detaljert nivå ga tilnærminger med moderat nøyaktighet men forskjellen i resultatene mellom dem var neglisjerbar. Den numeriske modellen som ga best resultater var et homogent materiale med justerte væsketransportkoeffisienter som tok hensyn til heftsonens bidrag. Denne modellen krever målinger gjennomført på det oppmurte murverket det skal simulere. Det mest innflytelsesrike tiltaket for å bedre kunne simulere vannopptaket i murverket blir å skaffe nøyaktige verdier for væsketransporten, enten gjennom laboratoriemålinger eller gjennom verifiserte tilnærmingsmodeller.

Tilnærmingsfunksjonen benyttet i simuleringene for å bestemme væsketransportkoeffisienten avhengig av vanninnholdet viste seg ikke å være god nok for materialene som ble undersøkt. Numeriske simuleringer vil, så lenge det blir antatt perfekt kontakt mellom materialene,

estimere en lavere hastighet på vannopptaket til murkonstruksjoner noe som kan bidra til flere fuktrelaterede problemer. En mer nøyaktig væsketransportkoeffisient er derfor nødvendig.

5.1 Videre arbeid

Selv om den homogene modellen ga en meget god tilnærming til vannabsorpsjonen så er ikke denne modellen omfattende nok til å gi et fullstendig bilde av murverkets ytelse i en reel konstruksjon. Fuktforløpet i en murkonstruksjon vil bestemmes av både absorbert fuktmenge og tørkekapasiteten og dersom det skal være mulig å oppnå gode og realistiske simuleringer av denne prosessen er det nødvendig med en modell som håndterer heftoneeffekten ved både kapillær vannabsorpsjon og omfordeling. Det ble også klart at de tilnærmingene som ble benyttet, slik som væsketransportkoeffisienten og fuktlagringsfunksjonen, ikke ga en tilfredsstillende nøyaktighet og gode målinger fra laboratorieforsøk ble meget verdifulle.

Basert på funnene i litteratursøket og resultatene oppnådd i denne oppgaven anbefales følgende videre studier:

Sammen med de målingene som ble utført i denne oppgaven burde følgende materialeegenskaper bestemmes eksperimentelt:

- Fuktlagringsfunksjonen: Består av sorpsjonskurve og vannretensjonskurve som bestemmes i henhold til *EN ISO 1257* (58) og *ISO 11274* (84).
- Væskestrømkoeffisienten: Både for absorpsjon og omfordeling og burde bestemmes på en ikke-destruktiv måte ved hjelp av *NMR*-teknologi. Metoder for gjennomføringer er beskrevet i (20), (91) og (68).

Etter gode materialeegenskaper er bestemt eksperimentelt burde det undersøkes om det lar seg gjøre å utvikle en modell eller en metode, i de numeriske simuleringsverktøyene, som tar hensyn til både absorpsjon og omfordeling i heftsonen. Det burde også gjennomføres et dypere litteratursøk og analyse av metoder for estimering væsketransporten i komponentene til murverket, uten å gjøre krevende og kostbare laboratoriemålinger. Scheffler og Plagge (92) presenterer en lovende modell for bestemmelse av væsketransportkoeffisienten som har blitt testet med lovende resultater på mange porøse materialer (93)

Det ville også være av stor nytte og gjøre en omfattende analyse av nøyaktigheten på den norske klimatilnærmingen til de numeriske simulasjonsverktøyene, slik at evnen til å estimere fuktforholdene i murkonstruksjoner i Norge blir hevet.

6 Kilder

1. International Energy Agency. Policy Pathway: Modernising Building Energy Codes, OECD/IEA. New York: United Nations Development Programme (UNDP). 2013.
2. Boverket. Energi i bebyggelsen - tekniska egenskaper och beräkningar - resultat från projektet BETSI. Karlskrona: 2010.
3. Straube J, Ueno K, Schumacher C. Internal Insulation of Masonry Walls: Final Measure Guideline, Prepared for U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Somerville: Building Science Corporation, 2012.
4. Künzel HM. Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behaviour of exposed walls. *Materials and Structures*. 1998;31:99-103.
5. Johansson P, Geving S, Hagentoft C, Rognvik E, Kalagasidis A, Time B. Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations. Gothenburg: Department of Civil and Environmental Engineering - Chalmers University of Technology, Department of Civil and Transport Engineering - Norwegian University of Science and Technology (NTNU) & Department of Materials and Structures - SINTEF Building and Infrastructure, 2014.
6. Künzel H, Schmidt T, Kehrler M, Pavlow I, Eitner V. WUFI 2D. 3.3.2.87.DB.24.77 ed: IBP Holzkirchen; 2010.
7. Gjeving S, Thue JV. *Fukt i bygninger*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt; 2002. 465 p.
8. Byggforskserien 451.031. Klimadata for dimensjonering mot regnpåkjenning. Oslo: SINTEF Byggforsk; 2013.
9. Lisø K, Kvande T. *Klimatilpasning av bygninger*. Trondheim 2007.
10. Norges byggforskningsinstitutt. *Prøvetoder*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt, 1983.
11. Madsø FE. *Skallmurte Ytterveggers slagrenstetthet*. 1988.
12. Blocken B, Carmeliet J. Spatial and temporal distribution of driving rain on a low-rise building. *Wind Struct*. 2002;5:441-62.
13. Blocken B, Carmeliet J. On the validity of the cosine projection in wind-driven rain calculations on buildings. *Build Environ*. 2006;42:1182-9.
14. Janssen H, Blocken B, Roels S, Carmeliet J. Wind-driven rain as a boundary condition for HAM simulations: analysis of simplified modelling approaches. *Build Environ*. 2007;42:1555-67.
15. Finkenstein C, Häupl P. Atmospheric longwave radiation being a climatic boundary condition in hygrothermal building part simulation. *Symposium for Building Physics in Dresden*. 2007;12:617-24.

16. Byggforskserien 723.308. Eldre yttervegger av mur og betong. Metoder og materialer. Oslo: SINTEF Byggforsk; 2013.
17. Byggforskserien 723.309. Eldre vegger av stampet jord. Metoder og materialer. Oslo: SINTEF Byggforsk; 2011.
18. Byggforskserien 571.201. Murverk. Materialer, typer og egenskaper. Oslo: SINTEF Byggforsk; 2011.
19. Killip IR, Cheetham DW. The prevention of rain penetration thorough external walls and joints by means of pressure equalisation. 1984.
20. Brocken HJP. Moisture transort in brick masonry: the grey area between bricks [Dr. Thesis]: Eindhoven University of Technology; 1998.
21. Mur-Sentret. Mutmørtler. 1979.
22. NS-EN 998-2:2010. Krav til mørtel for murverk - Del 2: Murmørtel. Brüssel: European Commitee For Standarization (CEN); 2010.
23. Weber. Produktguide - For deg som skal støpe, mure, legge fliser eller avrette gulv. Oslo: Saint-Gobain Byggevarer AS; 2010.
24. 770.111 B. Mørtler for utbedring og reparasjon av eldre murbygninger Oslo: SINTEF Byggforsk; 2011.
25. Balke H. Rehabilitering med kalkmørtel. Mur-Sentret, 2003.
26. Byggforskserien 572.221. Mur- og pussmørtler - Typer, egenskaper, framstilling. Oslo: SINTEF Byggforsk; 1999.
27. Byggforskserien 770.111. Mørtler for utbedring og reparasjon av eldre murbygninger. Oslo: SINTEF Byggforsk, 2011.
28. Corinaldesi V, Moriconi G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. 2008.
29. Zhu M, Chung DDL. Improving Brick-to-Mortar Bond Strength by the Addition of Carbon Fibres to the Mortar. 1997.
30. NS 3420-N:2012. Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner - Del N: Mur- og flisarbeider. Oslo: Standard Norge; 2012.
31. Mur-Sentret. Skallmurvegger og diafragmavegger. Murkatalogen2006.
32. Wienerbergers AS. Teknisk brosjyre for teglmurverk. 2011.
33. Waldum AM. Murte teglvegger og rentetthet. Institutt for husbyggingsteknikk, NTH, 1985.
34. Maravelaki-Kalaitzaki P. Hydraulic lime mortars with siloxane for waterproofing historic masonry. Cement and Concrete Research. 2007;37(2):283-90.
35. Byggforskserien 542.801. Utvendig kledning. Overflater på teglmurer. Oslo: SINTEF Byggforsk; 1994.
36. Sandin K. Water repellent treatment. 1994.
37. Matziaris K, Stefanidou M, Karagiannis G. Impregnation and superhydrophobicity of coated porous low-fired clay building materials. Progress in Organic Coatings. 2011;72(1-2):181-92.

38. NanoPhos SA. SurfaPore® C - Nanotechnology for cement surfaces, mortar, grout, stucco and natural or artificial stones. Lavrio2013.
39. SurfaProducts Scandinavia AS. DSC_0014.jpeg 2014. Available from: <http://surfa.no/surfa/>.
40. Wojcik R. Anti damp preservation of internally insulated brick walls. CESBP 2013:179-83.
41. Sandin K. Some Facts about Hydrophobic Facade Impregnations. 1996.
42. Nesje A. Pussmørtler og overflatebehandlinger. Mur-Sentret/SINTEF, 1991.
43. Künzle H, Kiebel K. Drying of brick after impregnation. Fraunhofer-institute of Building Physics, 1996.
44. Nemeč T, Rant J, Apih V, Glumac B. Study of building materials impregnation processes by quasi-real-time neutron radiography. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1999;424(1):242-7.
45. Byggforskserien 542.811. Fasadepuss. Valg av pusstype. Oslo: SINTEF Byggforsk; 2005.
46. Marie-Victoire E, Bromblet P. A new generation of cement based renderings: an alternative to traditional lime-based mortars. 1999.
47. Kvande T, Time B, Waldum AM. Capacity of Rendering System to Resist Rain Penetration 2002.
48. Pavlík Z, Cerný R, Pavlíková M, Maděra J. New type of lime plaster with pozzolana admixture for renewal of historical buildings. 2011.
49. Baronio G, Binda L, Saisi A. Mechanical and physical behaviour of lime mortars reproduced after characterization of historic mortar. 1999.
50. Balksten K, Magnusson S. The pore structure in lime plaster as a key to understanding moisture transportation properties and frost damages. 2004.
51. Pazera M, Bomberg M. Applying Lessons from Clay-Brick Veneer to Design a Stucco Mix. 2009.
52. Vejmelková E, Keppert M, Keršner Z, Rovnaníková P, Cerný R. Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime–metakaolin plasters for renovation of historical buildings. 2011.
53. Vejmelková E, Konáková DC, M., Keppert M, Cerný R. Effect of hydrophobization on the properties of lime–metakaolin plasters. 2012.
54. Canada Mortgage and Housing Corporation. Assessing the Impact of Thickness on the Performance of Stucco Cladding. 2004.
55. Rouchier S, Woloszyn M, Foray G, Roux J. Characterization of damage-induced evolution of building materials hygric properties. 9th Nordic Symposium on Building Physics. 2011.
56. O'Rourke. The Influence of Content on the Thermal Conductivity. 1995.

57. NS-EN ISO 15148:2002. Byggematerialers og -produkters hygrotermiske egenskaper - Bestemmelse av vannabsorpsjonskoeffisient ved delvis nedsenking. Brussel: European Committee for Standardization (CEN); 2002.
58. ISO 12572:2001. Hygrothermal performance of building materials and products -- Determination of water vapour transmission properties. Geneva: International Organization for Standardization (ISO); 2001.
59. Møller-Nielsen J. Tegl, kalk & Kalkmørtler 1994.
60. Mur-Sentret. Tegl og teglmurverk. Murkatalogen2001.
61. Palmer LA, Parsons DA. A study of the properties of mortars and brick and their relation to bond. 1939.
62. Madsø FE. Selvbærende, murte brystningsbjelker (overdekninger) i teglfasader. 1994.
63. Derluyn H, Janssen H, Moonen P, Carmeliet J. Moisture transfer across the interface between brick and mortar joint. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. 2008.
64. Guizzardi M, Carmeliet J, Derome D, Vonbank R. Prevention strategies for risk of moisture related damages to renovation of historical buildings. 2013.
65. Gummerson RJ, Hall C, Hoff WD. Water Movement in Porous Building Materials - II: Hydraulic Suction and Sorptivity of Brick and Other Masonry Materials. 1980.
66. Pel L. Moisture transport in porous building materials [Ph.D thesis]: Eindhoven University og Technology; 1995.
67. De Freitas VP, Abrantes V, Crausse P. Moisture Migration in Building Walls - Analysis of the Interface Phenomena. 1996.
68. Depraetere W, Carmeliet J, Hens H. Moisture transfer at interfaces of porous materials: Measurements and simulations. PRO 12: Proceedings of the International RILEM Workshop on "Historic Mortars: Characteristics and Tests". 2000:249-59.
69. Pederen C. Combined moisture and heat transfer in building constructions [Ph.D. Thesis]: Technical University of Denmark; 1990.
70. Galbraith G. Heat and mass transfer within porous building materials [Ph.D. Thesis]. Glasgow: University of Strathclyde; 1992.
71. Künzle H. Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten [Ph.D. Thesis]: University of Stuttgart; 1994.
72. Grunewald J. Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen [Ph.D. Thesis]: Dresden Univeristy of Technology,; 1997.

73. Häupl P, Grunewald J, Fechner H, Stopp H. Coupled heat air and moisture transfer in building structures. *Int J Heat Mass Transfer*. 1997;40 1633-42.
74. Künzel H, Kiessl K. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *Int J Heat Mass Transfer*. 1997;40:159-67.
75. Janssen H. The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground [Ph.D. Thesis]: Catholic University of Leuven; 2002.
76. Janssen H, Blocken B, Carmeliet J. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *Int J Heat Mass Transfer*. 2007;50 1128-40.
77. Nicolai A. Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials [Ph.D. Thesis]: Syracuse University, New York; 2007.
78. Krus M. Simple methods to approximate the liquid transport coefficients describing the absorption and drying process. . *Building physics in the Nordic Countries*. 1999;5th:241-8.
79. Künzel H. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB Verlag; 1995.
80. Binder A, Künzel HZ, D. A new approach to measure liquid transport in capillary active interior insulation. *Central European Symposium on Building Physics, Vienna, Austria*. 2013;2nd:393-400.
81. Peuhkuri R. *Moisture Dynamics in Building Envelopes* [Ph.D. Thesis]. Lyngby: Technical University of Denmark; 2003.
82. Johansson P. *Water absorption in two-layer masonry systems - Properties, profiles and predictions* [Dr. Thesis]: Lund Institute of Technology Lund University; 2005.
83. Scheffler GP, R. *Methods for moisture storage and transport property determination of autoclaved aerated concrete*. 2011.
84. ISO 11274:1998. *Soil quality -- Determination of the water-retention characteristic - Laboratory methods*. Geneva: International Organization for Standardization (ISO); 1998.
85. NS 3000. *Teglstein*: Norges Byggstandardiseringsråd; 1967.
86. NS-EN 772-21:2011. *Prøvmeteroder for murprodukter - Del 21: Bestemmelse av vannabsorpsjonen til murprodukter av tegl og kalsiumsilikat ved kaldtvannsabsorpsjon*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2011.
87. NS-EN 1015-18:2002 *Methods of test for mortar for masonry Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2002

88. NS 3105. Skjærfasthet for murverk: Norges Byggstandardiseringsråd; 1988.
89. NS-EN 1052-3:2002+A1:2007. Prøvingsmetoder for murverk - Del 3: Bestemmelse av initialskjærfasthet. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2007.
90. NS 3120. Murmørtler - Egenskaper og klassifisering: Norges Byggstandardiseringsråd; 1988.
91. Brocken HJP, Speikman ME, Pel L, Kopinga K, Larbi JA. Water extraction out of mortar during brick laying: a NMR study. *Materials and Structures*. 1998;Vol. 31:49-57.
92. Scheffler GA, Plagge R. A whole range hygric material model: Modelling liquid and vapour transport properties in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53(1-3):286-96.
93. Scheffler G. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage [Ph.D. Thesis]. Dresden: Dresden University of Technology; 2008.

7 Vedlegg

Vedlegg A - Minuttsug

Vedlegg B – Densitet og vannabsorpsjon

Vedlegg C – Kapillær vannabsorpsjon

Vedlegg D – Skjærfasthet

Vedlegg A - Minuttsug

Tabell 27 – Minuttsug for liggeflaten og løpersiden til telgsteinsprøvene

Stein nr.	Areal Liggeflate [mm ²]	Areal Sideflate [mm ²]	Vekt tørr [g]	Liggeflate [g/min]	Fasadeflate [g/min]	Minuttsug [kg/m ² •min] Liggeflate	Minuttsug [kg/m ² •min] Løpersiden
0	24486	14322	1830	1936	1883	4,3	3,7
1	24255	14091	1828	1929	1884	4,2	4,0
2	24717	14322	1837	1938	1889	4,1	3,6
3	24150	14030	1811	1900	1864	3,7	3,8
4	24717	14322	1839	1954	1891	4,7	3,6
5	24592	14384	1851	1963	1907	4,6	3,9
6	24717	14553	1836	1941	1889	4,2	3,6
7	24486	14322	1844	1943	1903	4,0	4,1
8	24824	14384	1846	1952	1902	4,3	3,9
9	24360	14152	1832	1932	1886	4,1	3,8
10	24380	14030	1848	1945	1896	4,0	3,4
Gjennomsnitt:						4,2	3,8
Std. avvik						0,3	0,2

Vedlegg B – Densitet og vannabsorpsjon

Tabell 28 - Nettodensitet teglsteinsprøver

Stein nr.	Tørr Pt [g]	1 døgn i vann Pl [g]	Neddykket Pv [g]	Nettodensitet ρ [kg/m ³]
0	1830	2147	1069	1697,6
1	1828	2122	1062	1724,5
2	1837	2156	1070	1691,5
3	1811	2104	1046	1711,7
4	1839	2164	1075	1688,7
5	1851	2177	1083	1692,0
6	1836	2164	1075	1686,0
7	1844	2165	1075	1691,7
8	1846	2167	1081	1699,8
9	1832	2140	1072	1715,4
10	1848	2143	1073	1727,1
Gjennomsnitt:				1702,4
Std. avvik:				14,1

Tabell 29 - Bruttodensitet teglsteinsprøver

Stein nr.	Bruttovolum stein [mm ³]	Tørr Pt [g]	Bruttodensitet ρ [kg/m ³]
0	1518132	1830	1205,4
1	1479555	1828	1235,5
2	1532454	1837	1198,7
3	1473150	1811	1229,3
4	1532454	1839	1200,0
5	1524704	1851	1214,0
6	1557171	1836	1179,1
7	1518132	1844	1214,7
8	1539088	1846	1199,4
9	1485960	1832	1232,9
10	1487180	1848	1242,6
Gjennomsnitt:			1213,8
Std. avvik:			19,5

Tabell 30 – Vannabsorpsjon teglsteinsprøver

Stein nr.	Nettovolum stein [mm ³]	Vannabsorpsjon [Volum- %]	Vannabsorpsjon [Masse- %]
0	1078000	29,4	17,3
1	1060000	27,7	16,1
2	1086000	29,4	17,4
3	1058000	27,7	16,2
4	1089000	29,8	17,7
5	1094000	29,8	17,6
6	1089000	30,1	17,9
7	1090000	29,4	17,4
8	1086000	29,6	17,4
9	1068000	28,8	16,8
10	1070000	27,6	16,0
Gjennomsnitt		29,0	17,1
Std. avvik		0,9	0,7

Vedlegg C – Kapillær vannabsorpsjon

Tabell 31 – Beskrivelse av pilarene

Serie nr.	Mørtel type	Fugetype	Tilstand på stein	Antall prøvestykker
1A	Weber base KC 50/50	Avtrukket	Tørr	3
1B	Weber base KC 50/50	Komprimert	Tørr	5
2A	Weber base KC 35/65	Komprimert	Tørr	5
3A	Weber Murmørtel M5	Komprimert	Tørr	3
3B	Weber Murmørtel M5	Komprimert	Våt	5
4A	Weber mix M5 SS	Komprimert	Tørr	5

Tabell 32 - Kapillært vannopptak: Middelmålinger fra teglsteinsprøvene[kg/m²]

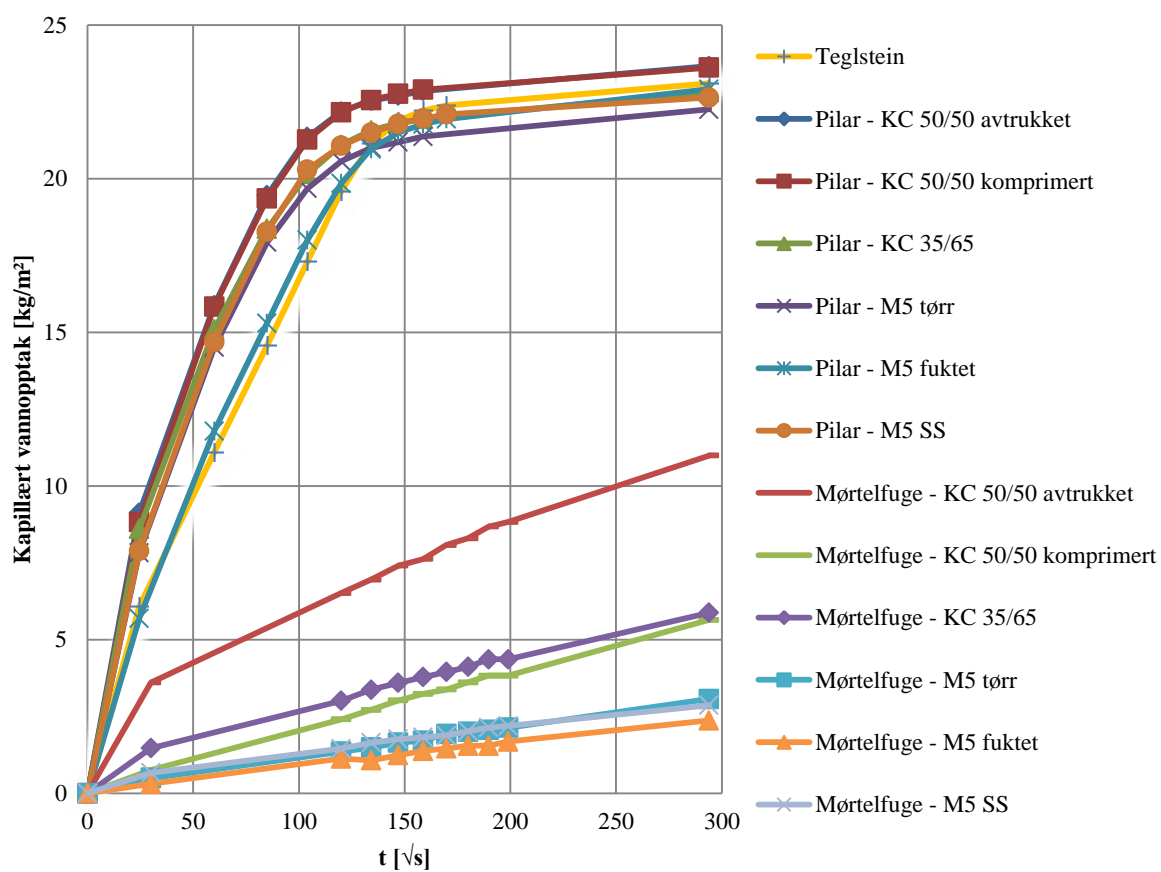
Prøveserie	Tid [\sqrt{s}]	0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	293,9
	Teglstein		0,0	6,1	11,1	14,6	17,3	19,6	21,1	21,9	22,2	22,4

Tabell 33 - Kapillært vannopptak: Middelmålinger fra pilarprøvene[kg/m²]

Prøveserie	Tid [\sqrt{s}]	0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	293,9
	Pilar - KC 50/50 avtrukket		0,0	9,1	15,9	19,5	21,4	22,2	22,5	22,7	22,9	-
Pilar - KC 50/50 komprimert		0,0	8,8	15,8	19,4	21,3	22,2	22,6	22,8	22,9	-	23,6
Pilar - KC 35/65		0,0	8,6	15,1	18,4	20,1	21,1	21,6	21,8	21,9	-	22,8
Pilar - M5 tørr		0,0	7,8	14,5	17,9	19,7	20,6	21,0	21,2	21,4	-	22,3
Pilar - M5 fuktet		0,0	5,7	11,8	15,3	18,0	19,8	21,0	21,5	21,8	21,9	22,9
Pilar - M5 SS		0,0	7,9	14,7	18,3	20,3	21,1	21,5	21,8	22,0	22,1	22,6

Tabell 34 - Kapillært vannopptak: Middelmålinger fra mørtelprøvene[kg/m²]

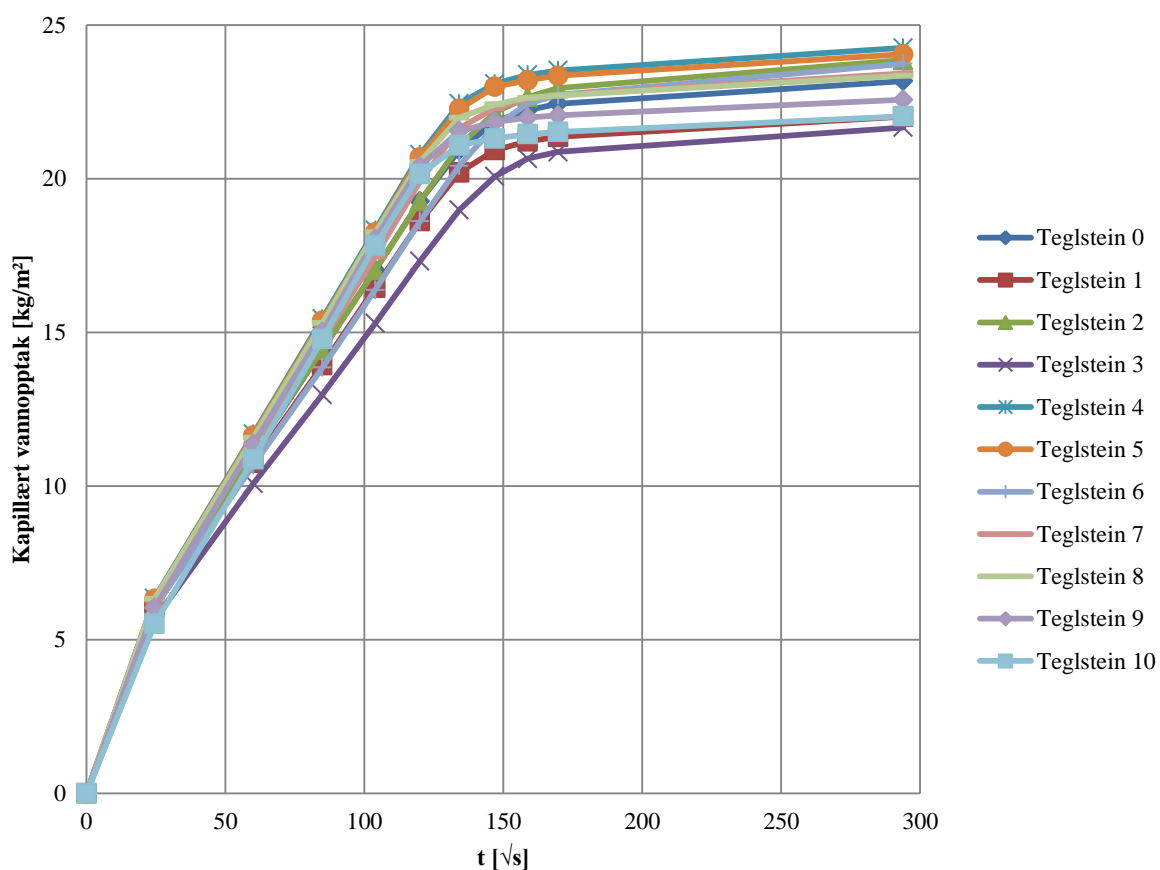
Prøveserie \ Tid [\sqrt{s}]	0,0	30,0	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	180,0	189,7	199,0	293,9
Mørtelfuge - KC 50/50 avtrukket	0,0	3,6	6,5	7,0	7,4	7,6	8,1	8,3	8,7	8,8	11,0
Mørtelfuge - KC 50/50 komprimert	0,0	0,8	2,4	2,7	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	3,8	5,6
Mørtelfuge - KC 35/65	0,0	1,5	3,0	3,4	3,6	3,8	3,9	4,1	4,4	4,4	5,9
Mørtelfuge - M5 tørr	0,0	0,5	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,1	3,1
Mørtelfuge - M5 fuktet	0,0	0,3	1,1	1,1	1,2	1,4	1,5	1,5	1,5	1,7	2,4
Mørtelfuge - M5 SS	0,0	0,7	1,4	1,6	1,8	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,9



Figur 54 - Kapillært vannopptak: Middelmålinger for alle prøvene

Tabell 35 - Kapillært vannopptak for teglsteinsprøvene [kg/m²]

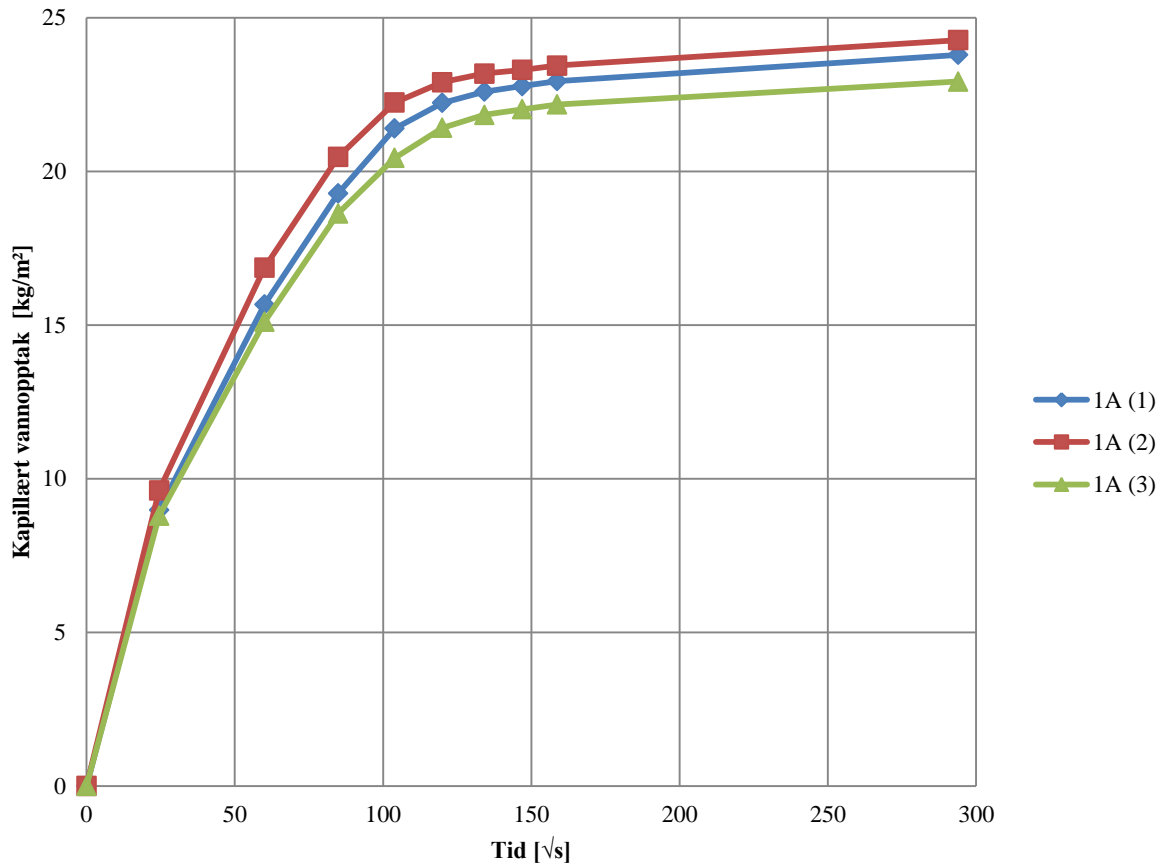
Areal [m ²]	Tid [√s] Prøve nr.	0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	293,9
		0,0139	0	0,0	6,1	11,0	14,4	17,0	19,3	20,9	21,9	22,2
0,0139	1	0,0	6,1	10,8	13,9	16,5	18,6	20,2	20,9	21,2	21,4	22,0
0,0139	2	0,0	6,1	11,1	14,4	17,0	19,3	21,1	22,2	22,7	22,9	23,9
0,0138	3	0,0	5,7	10,1	13,0	15,3	17,3	19,0	20,1	20,7	20,9	21,7
0,0139	4	0,0	6,3	11,7	15,4	18,3	20,8	22,4	23,1	23,4	23,5	24,3
0,0139	5	0,0	6,3	11,6	15,4	18,2	20,7	22,3	23,0	23,2	23,3	24,0
0,0139	6	0,0	6,1	10,7	13,9	16,4	18,6	20,4	21,7	22,4	22,7	23,7
0,0139	7	0,0	6,3	11,3	14,7	17,5	19,9	21,6	22,3	22,6	22,7	23,4
0,0139	8	0,0	6,3	11,6	15,3	18,2	20,5	22,0	22,4	22,6	22,7	23,3
0,0139	9	0,0	6,0	11,4	15,0	18,0	20,4	21,6	21,8	22,0	22,1	22,6
0,0138	10	0,0	5,5	10,9	14,8	17,8	20,1	21,1	21,3	21,4	21,5	22,0



Figur 55 - Kapillært vannopptak for teglsteinsprøvene

Tabell 36 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 1A [kg/m²]

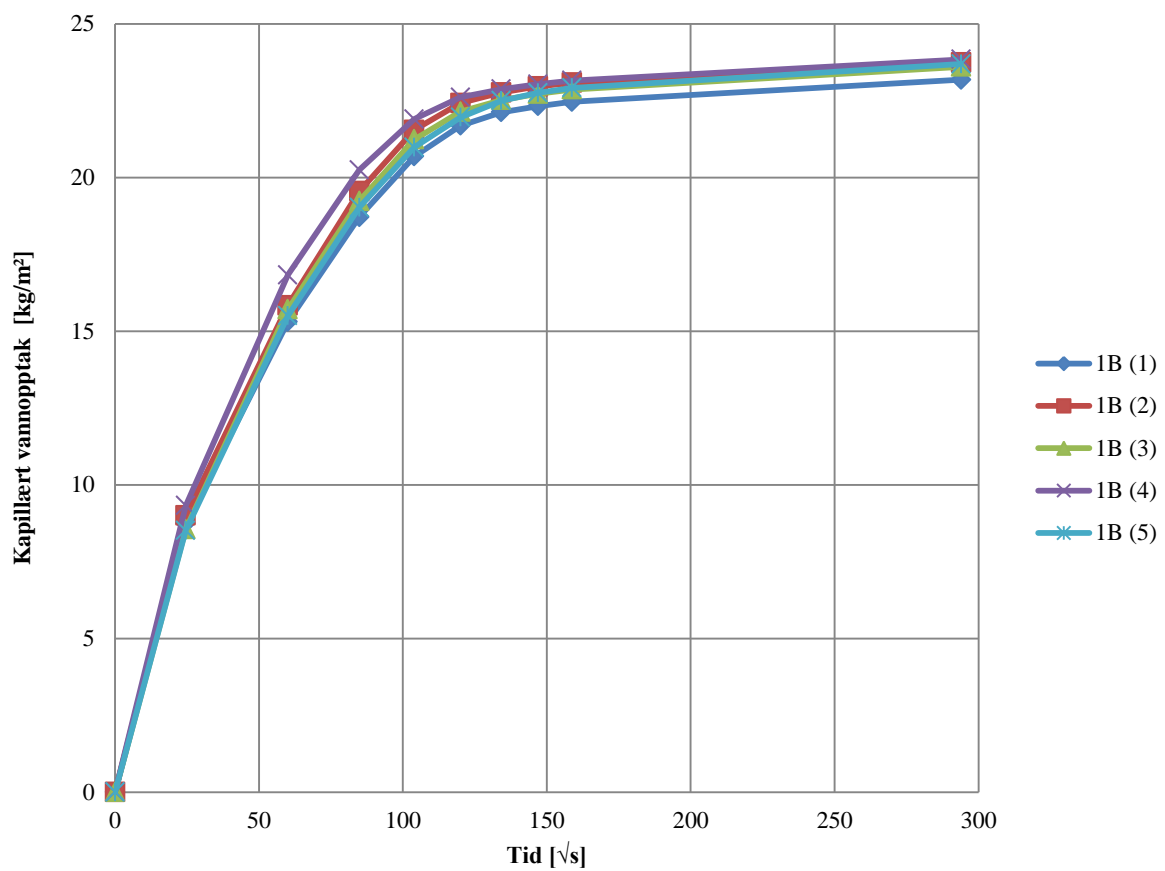
Areal [m ²]	Tid [\sqrt{s}]		Prøve nr.									
	0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	293,9		
0,0492	1	0,0	9,0	15,7	19,3	21,4	22,2	22,6	22,8	22,9	23,8	
0,0497	2	0,0	9,6	16,9	20,5	22,2	22,9	23,2	23,3	23,4	24,3	
0,0499	3	0,0	8,8	15,1	18,6	20,4	21,4	21,8	22,0	22,2	22,9	



Figur 56 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 1A

Tabell 3 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 1B [kg/m²]

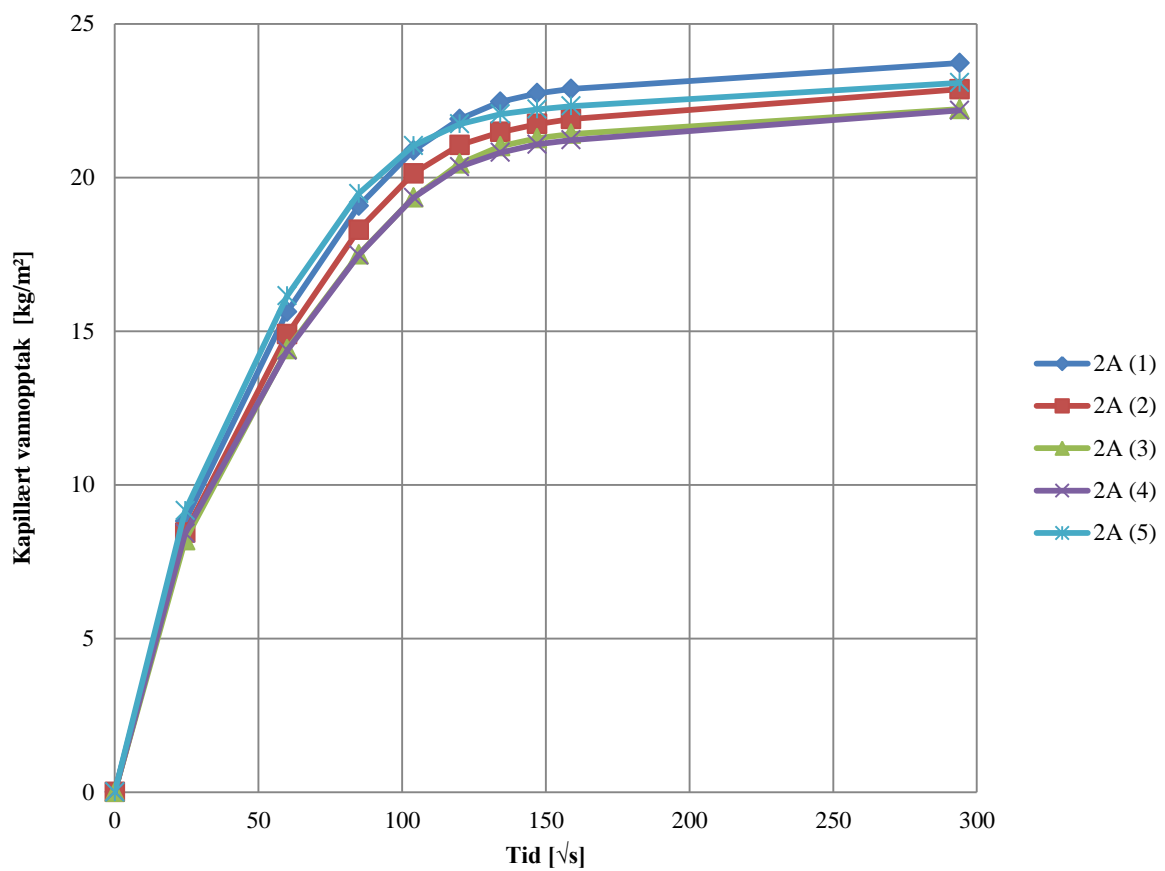
Areal [m ²]	Prøve nr.	Tid [\sqrt{s}]									
		0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	293,9
0,0501	1	0,0	8,7	15,3	18,7	20,7	21,7	22,1	22,3	22,5	23,2
0,0501	2	0,0	9,0	15,8	19,6	21,5	22,4	22,8	23,0	23,1	23,7
0,0499	3	0,0	8,6	15,7	19,2	21,2	22,1	22,5	22,7	22,9	23,6
0,0495	4	0,0	9,3	16,8	20,2	21,9	22,6	22,9	23,0	23,2	23,8
0,0501	5	0,0	8,5	15,5	19,0	21,0	22,0	22,5	22,8	22,9	23,7



Figur 57 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 1B

Tabell 37 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 2A [kg/m²]

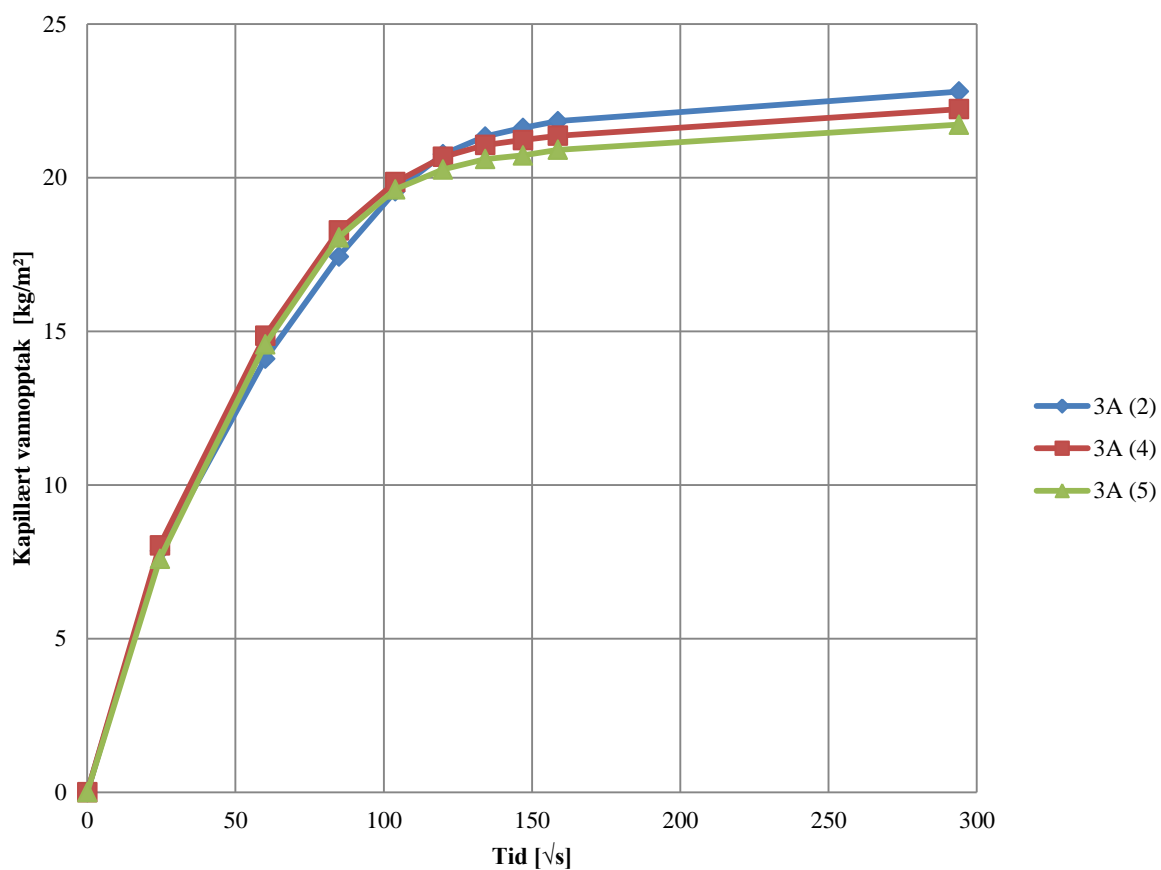
Areal [m ²]	Tid [\sqrt{s}]		Prøve nr.									
	0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	293,9		
0,0499	1	0,0	8,8	15,6	19,1	20,9	21,9	22,5	22,7	22,9	23,7	
0,0497	2	0,0	8,4	14,9	18,3	20,1	21,1	21,5	21,7	21,9	22,9	
0,0497	3	0,0	8,2	14,4	17,5	19,3	20,5	21,0	21,3	21,4	22,2	
0,0497	4	0,0	8,4	14,4	17,5	19,3	20,4	20,8	21,1	21,2	22,2	
0,0499	5	0,0	9,2	16,1	19,5	21,0	21,7	22,1	22,2	22,3	23,1	



Figur 58 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 2A

Tabell 38 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 3A [kg/m²]

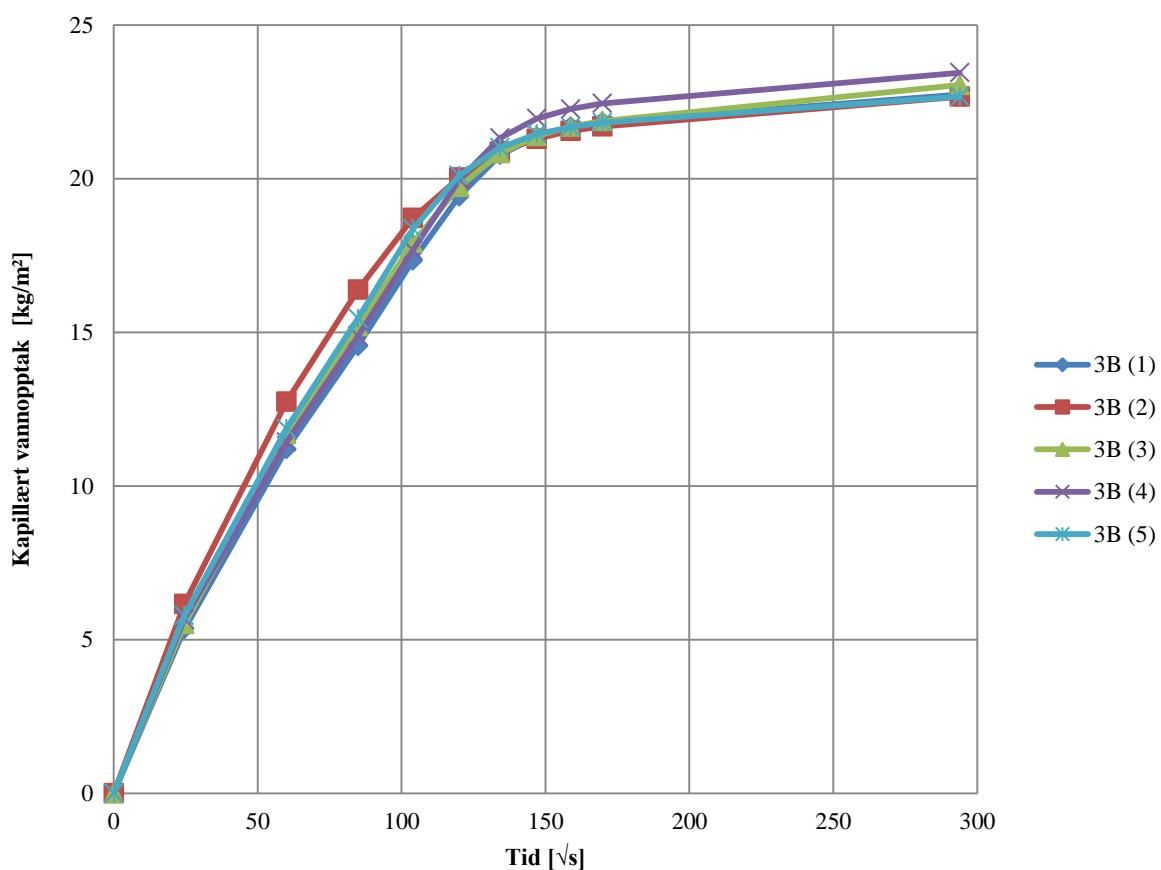
Areal [m ²]	Prøve nr.	Tid [\sqrt{s}]									
		0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	293,9
0,0499	2	0,0	7,9	14,1	17,4	19,6	20,8	21,3	21,6	21,8	22,8
0,0497	4	0,0	8,0	14,9	18,3	19,9	20,7	21,1	21,2	21,4	22,2
0,0499	5	0,0	7,6	14,6	18,1	19,6	20,3	20,6	20,7	20,9	21,7



Figur 59 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 3A

Tabell 39 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 3B [kg/m²]

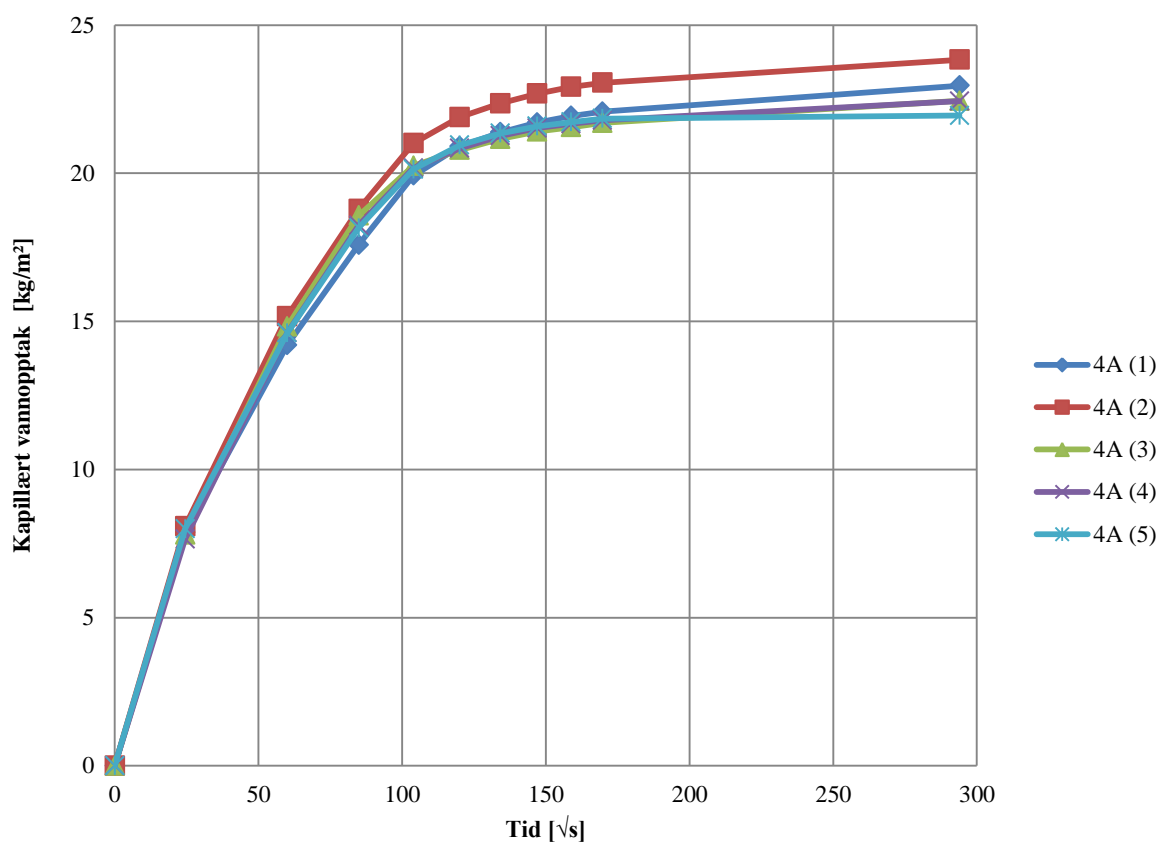
Areal [m ²]	Tid [\sqrt{s}]		Prøve nr.										
	0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	167,7	293,9		
0,0504	1	0,0	5,3	11,2	14,6	17,3	19,4	20,8	21,4	21,7	21,8	22,7	
0,0497	2	0,0	6,2	12,7	16,4	18,7	20,0	20,9	21,3	21,6	21,7	22,7	
0,0495	3	0,0	5,5	11,7	15,2	17,9	19,7	20,8	21,4	21,7	21,9	23,0	
0,0490	4	0,0	5,7	11,4	14,9	17,7	20,0	21,3	22,0	22,3	22,4	23,4	
0,0495	5	0,0	5,8	11,9	15,4	18,4	20,1	21,0	21,5	21,7	21,8	22,7	



Figur 60 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 3B

Tabell 40 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 4A [kg/m²]

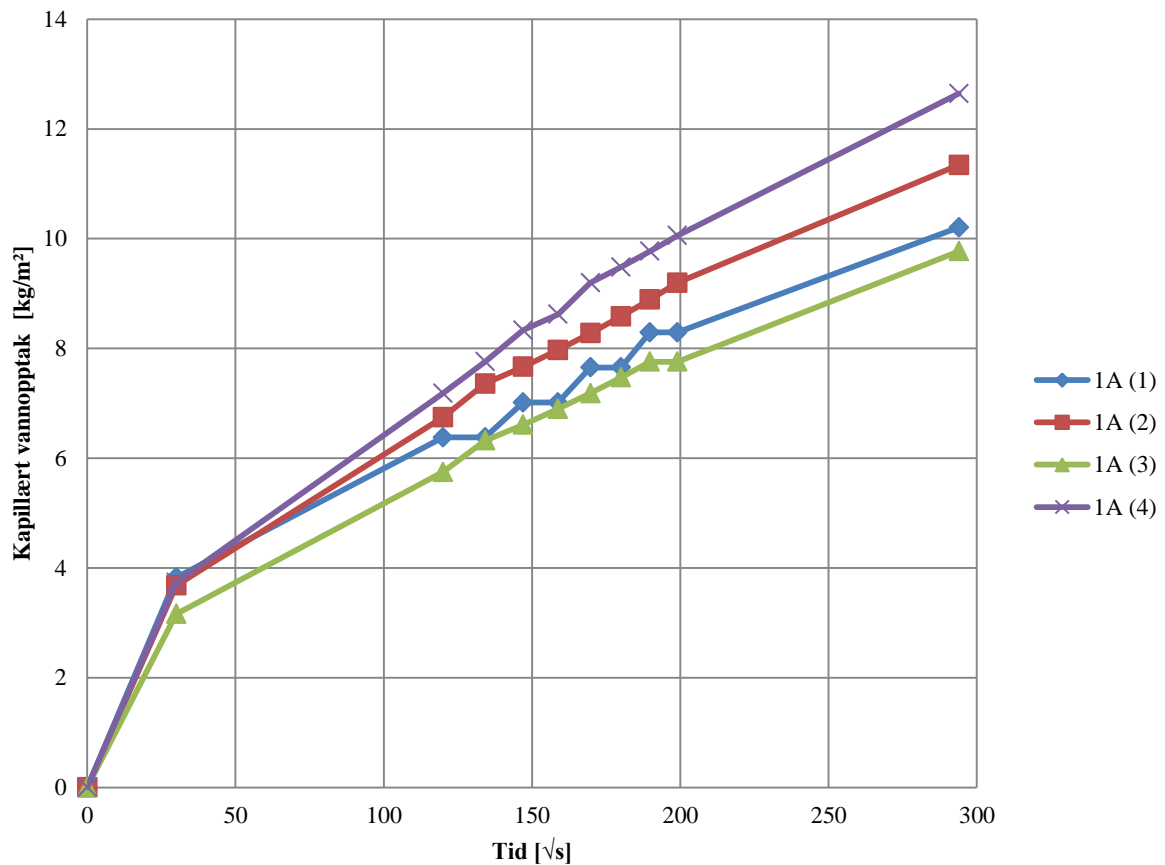
Areal [m ²]	Tid [\sqrt{s}]		Prøve nr.										
	0,0	24,5	60,0	84,9	103,9	120,0	134,2	147,0	158,7	167,7	293,9		
0,0487	1	0,0	7,9	14,2	17,6	19,9	20,9	21,4	21,7	21,9	22,1	23,0	
0,0490	2	0,0	8,1	15,2	18,8	21,0	21,9	22,4	22,7	22,9	23,1	23,8	
0,0483	3	0,0	7,8	14,8	18,6	20,2	20,8	21,2	21,4	21,6	21,7	22,4	
0,0497	4	0,0	7,7	14,6	18,2	20,2	20,8	21,3	21,5	21,7	21,8	22,4	
0,0501	5	0,0	8,0	14,6	18,2	20,1	20,9	21,3	21,6	21,7	21,8	22,7	



Figur 61 - Kapillært vannopptak for pilarprøvene fra prøveserie 4A

Tabell 41 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3A [kg/m²]

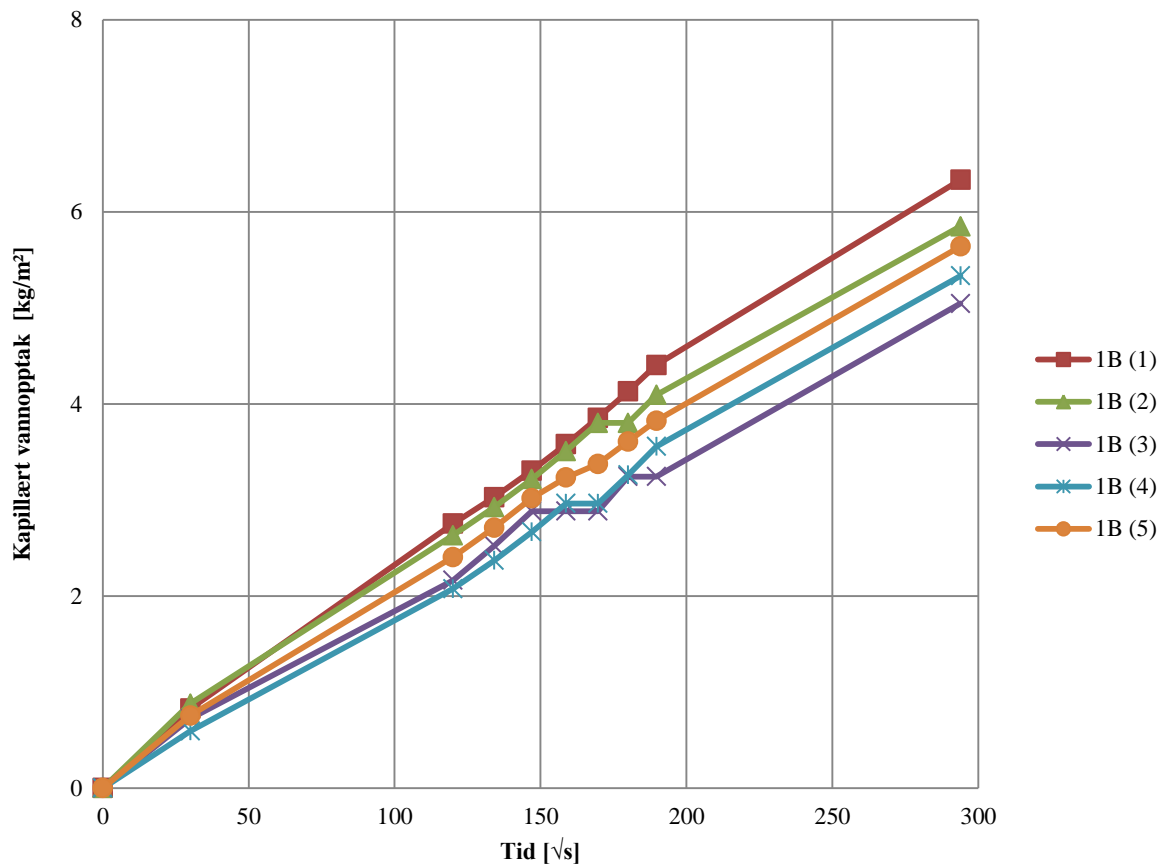
Areal [m ²]	Tid [\sqrt{s}]											
	Prøve nr.	0,0	30,0	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	180,0	189,7	199,0	293,9
0,0016	1	0,0	3,8	6,4	6,4	7,0	7,0	7,7	7,7	8,3	8,3	10,2
0,0033	2	0,0	3,7	6,7	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	11,3
0,0035	3	0,0	3,2	5,7	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	7,8	9,8
0,0035	4	0,0	3,7	7,2	7,8	8,3	8,6	9,2	9,5	9,8	10,1	12,6



Figur 62 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 1A

Tabell 42 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 1B [kg/m²]

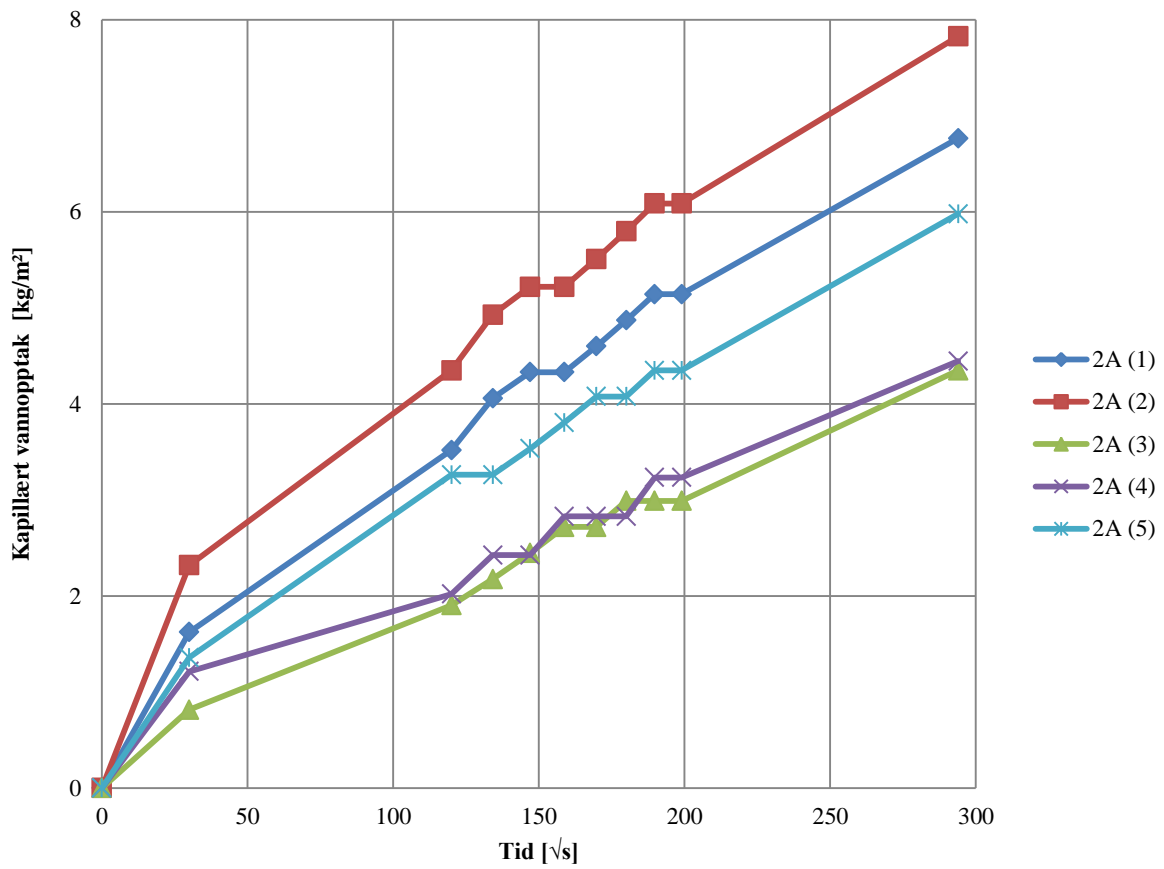
Areal [m ²]	Tid [\sqrt{s}]											
	Prøve nr.	0,0	30,0	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	180,0	189,7	199,0	293,9
0,0035	1	0,0	1,2	3,8	4,1	4,3	4,6	4,9	5,5	5,8	5,8	8,1
0,0036	2	0,0	0,8	2,8	3,0	3,3	3,6	3,9	4,1	4,4	4,4	6,3
0,0034	3	0,0	0,9	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	3,8	4,1	4,1	5,8
0,0028	4	0,0	0,7	2,2	2,5	2,9	2,9	2,9	3,2	3,2	3,2	5,0
0,0034	5	0,0	0,6	2,1	2,4	2,7	3,0	3,0	3,3	3,6	3,6	5,3



Figur 63 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 1B

Tabell 43 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 2A [kg/m²]

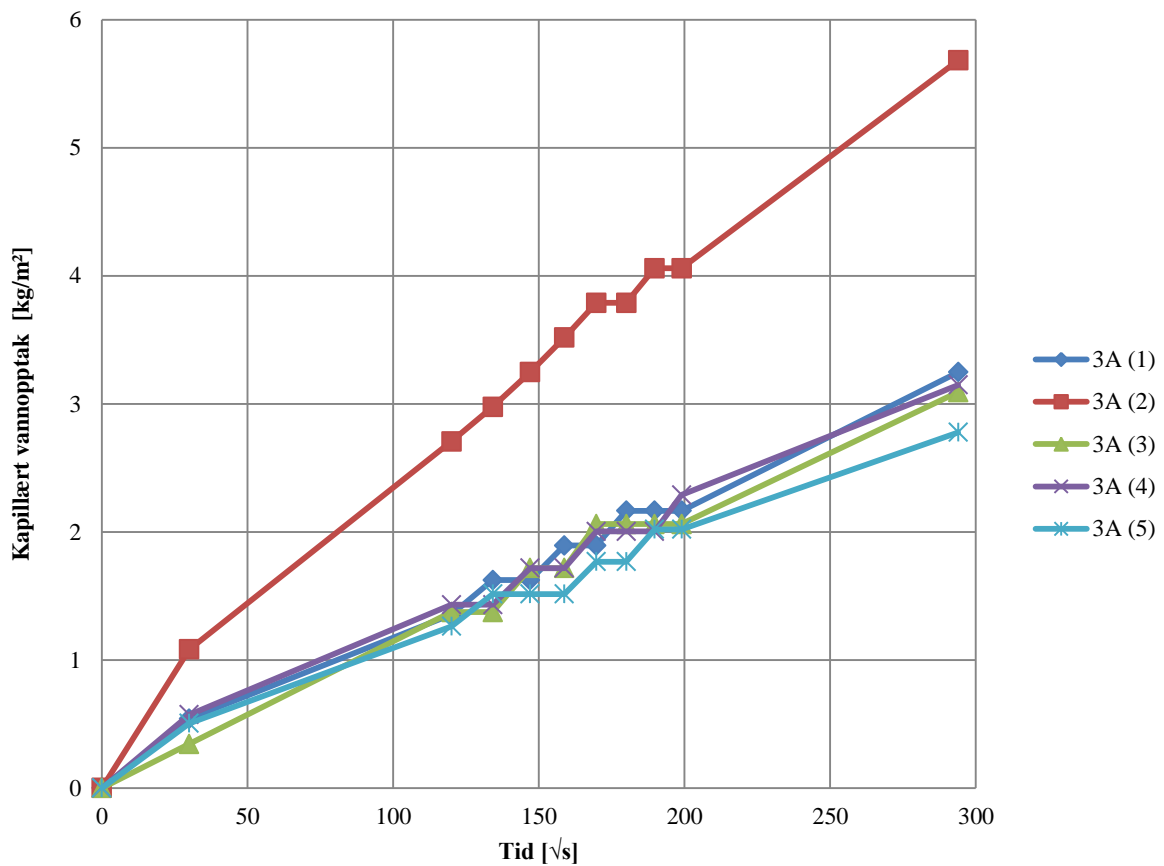
Areal [m ²]	Tid [\sqrt{s}]												
	Prøve nr.	0,0	30,0	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	180,0	189,7	199,0	293,9	
0,0037	1	0,0	1,6	3,5	4,1	4,3	4,3	4,6	4,9	5,1	5,1	6,8	
0,0035	2	0,0	2,3	4,3	4,9	5,2	5,2	5,5	5,8	6,1	6,1	7,8	
0,0037	3	0,0	0,8	1,9	2,2	2,4	2,7	2,7	3,0	3,0	3,0	4,3	
0,0025	4	0,0	1,2	2,0	2,4	2,4	2,8	2,8	2,8	3,2	3,2	4,4	
0,0037	5	0,0	1,4	3,3	3,3	3,5	3,8	4,1	4,1	4,3	4,3	6,0	



Figur 64 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 2A

Tabell 44 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3A [kg/m²]

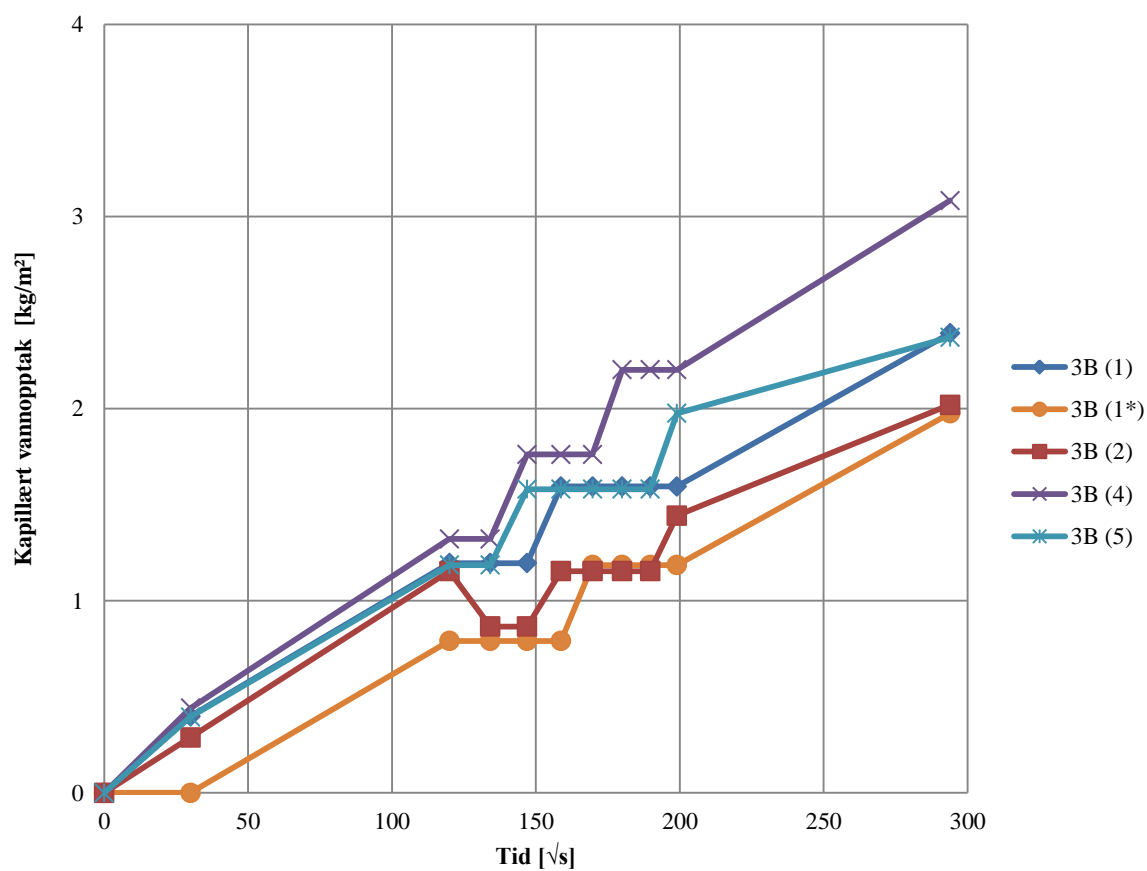
Areal [m ²]	Tid [√s] Prøve nr.	0,0	30,0	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	180,0	189,7	199,0	293,9
		0,00370	1	0,0	0,5	1,4	1,6	1,6	1,9	1,9	2,2	2,2
0,00370	2	0,0	1,1	2,7	3,0	3,2	3,5	3,8	3,8	4,1	4,1	5,7
0,00291	3	0,0	0,3	1,4	1,4	1,7	1,7	2,1	2,1	2,1	2,1	3,1
0,00350	4	0,0	0,6	1,4	1,4	1,7	1,7	2,0	2,0	2,0	2,3	3,1
0,00396	5	0,0	0,5	1,3	1,5	1,5	1,5	1,8	1,8	2,0	2,0	2,8



Figur 65 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3A

Tabell 45 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3B [kg/m²]. 1* er den andre fugen fra prøvestykke 3B (1) [kg/m²]

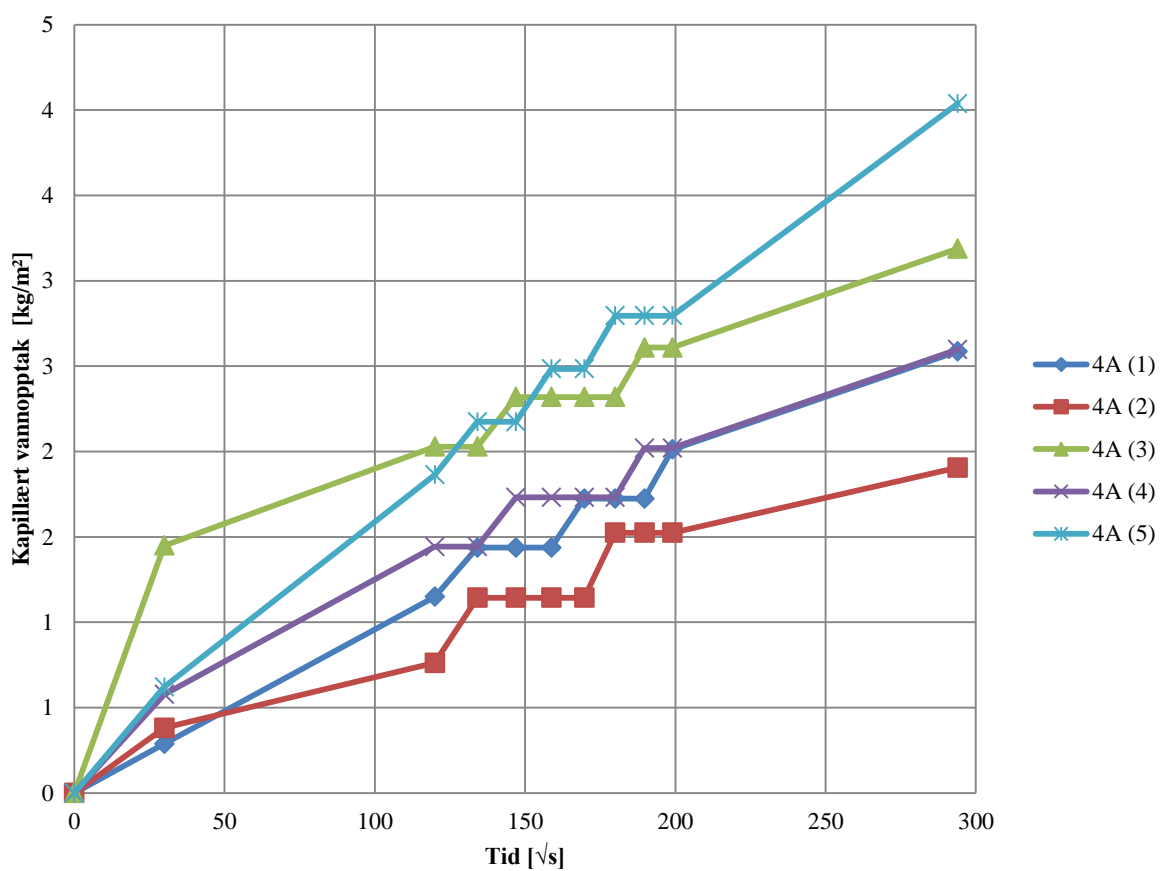
Areal [m ²]	Tid [√s] Prøve nr.	0,0	30,0	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	180,0	189,7	199,0	293,9
		0,00251	1	0,0	0,4	1,2	1,2	1,2	1,6	1,6	1,6	1,6
0,00253	1*	0,0	0,0	0,8	0,8	0,8	0,8	1,2	1,2	1,2	1,2	2,0
0,00347	2	0,0	0,3	1,2	0,9	0,9	1,2	1,2	1,2	1,2	1,4	2,0
0,00227	4	0,0	0,4	1,3	1,3	1,8	1,8	1,8	2,2	2,2	2,2	3,1
0,00253	5	0,0	0,4	1,2	1,2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0	2,4



Figur 66 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 3B

Tabell 46 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 4A [kg/m²]

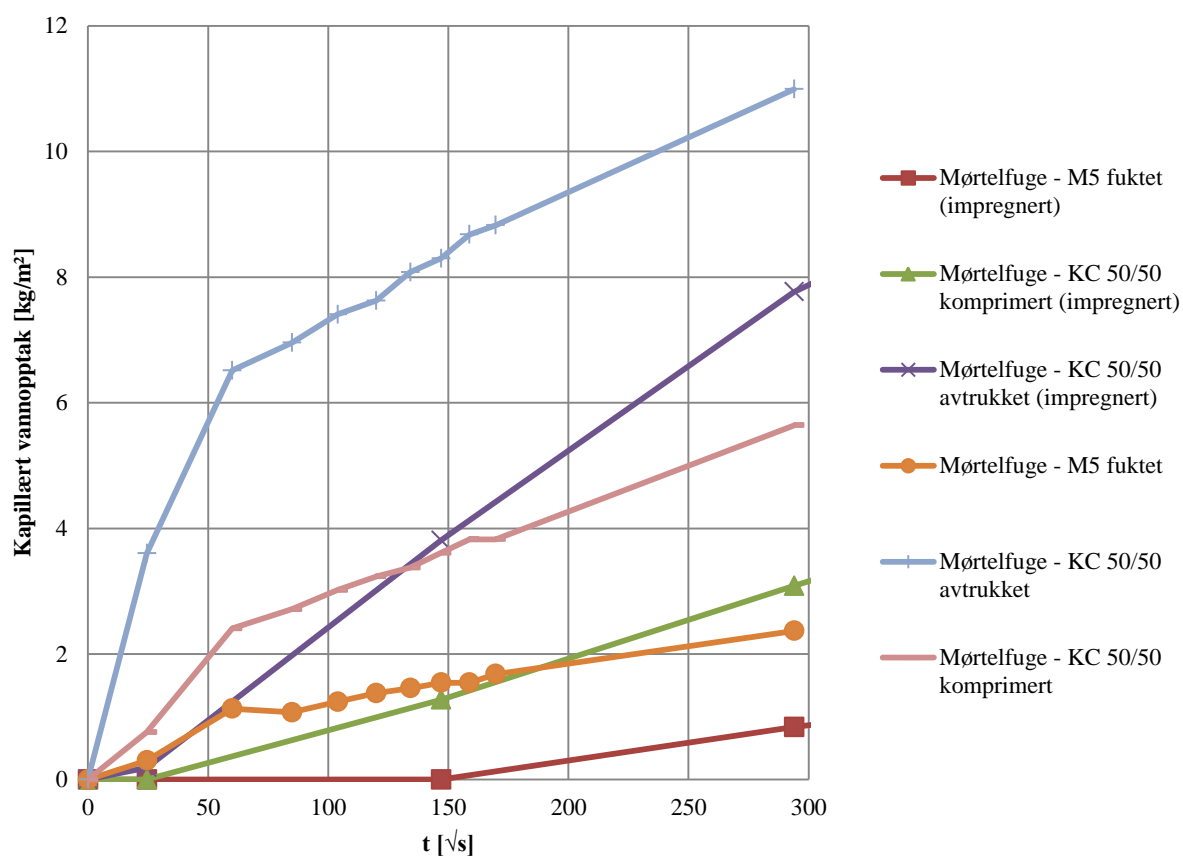
Areal [m ²]	Tid [√s] Prøve nr.	Tid [√s]										
		0,0	30,0	120,0	134,2	147,0	158,7	169,7	180,0	189,7	199,0	293,9
0,00348	1	0,0	0,3	1,1	1,4	1,4	1,4	1,7	1,7	1,7	2,0	2,6
0,00262	2	0,0	0,4	0,8	1,1	1,1	1,1	1,1	1,5	1,5	1,5	1,9
0,00345	3	0,0	1,4	2,0	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,6	2,6	3,2
0,00347	4	0,0	0,6	1,4	1,4	1,7	1,7	1,7	1,7	2,0	2,0	2,6
0,00322	5	0,0	0,6	1,9	2,2	2,2	2,5	2,5	2,8	2,8	2,8	4,0



Figur 67 - Kapillært vannopptak for mørtelprøvene fra prøveserie 4A

Tabell 47 - Kapillært vannopptak fra impregnerte prøver [kg/m²]

Prøveserie	Tid [\sqrt{s}]	0,0	24,5	147,0	293,9	523,1
	Teglstein		0,0	1,0	10,8	19,9
Mørtelfuge - M5 fuktet		0,0	0,0	0,0	0,8	1,9
Mørtelfuge - KC 50/50 komprimert		0,0	0,0	1,3	3,1	5,8
Mørtelfuge - KC 50/50 avtrukket		0,0	0,2	3,8	7,8	11,9



Figur 68 - Kapillært vannopptak fra impregnerte prøver

Tabell 48 - Resultater fra kapillærvannabsorpsjon av teglstein

Materiale	t_f [h]	$A_{w,ff}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	$A_{w,24}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	t_{knekk} [h]	Δm_{24} [kg/m ²]
Teglstein	5	0,138	-	5,4	23,2

Tabell 49 - Resultater fra kapillærvannabsorpsjon av pilarer

Materiale	t_f [h]	$A_{w,ff}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	$A_{w,24}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	t_{knekk} [h]	Δm_{24} [kg/m ²]
KC 50/50 avtrukket	3	0,155	-	3,5	23,7
KC 50/50 komprimert	3	0,157	-	3,5	23,6
KC 35/65	3	0,145	-	3,5	22,8
M5 tørr	3	0,149	-	3,5	22,3
M5 fuktet	5	0,139	-	5,3	22,9
M5 SS	3	0,156	-	3,5	22,6

Tabell 50 - Resultater fra kapillærvannabsorpsjon av mørtelfuger

Materiale	t_f [h]	$A_{w,ff}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	$A_{w,24}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	t_{knekk} [h]	Δm_{24} [kg/m ²]
KC 50/50 avtrukket	-	-	0,0314	-	11
KC 50/50 komprimert	-	-	0,0206	-	5,6
KC 35/65	-	-	0,0187	-	5,9
M5 tørr	-	-	0,0109	-	3,1
M5 fuktet	-	-	0,0086	-	2,4
M5 SS	-	-	0,0092	-	2,9

Tabell 51 - Resultater fra kapillærvannabsorpsjon av impregnerte prøver

Materiale	$A_{w,24, \text{impregnering}}$ [kg/m ² ·s ^{0,5}]	Δm_{24} [kg/m ²]	$\frac{A_w \text{ impregnering}}{A_w}$	$\frac{\Delta m_{24} \text{ impregnering}}{\Delta m_{24}}$
Teglstein	0,0702	19,9	0,51	0,86
Mørtelfuge - M5 fuktet	0,0031	0,8	0,36	0,35
Mørtelfuge - KC 50/50 komprimert	0,0114	3,1	0,56	0,55
Mørtelfuge - KC 50/50 avtrukket	0,0281	7,8	0,90	0,71

Vedlegg D - Skjærfasthet

Tabell 52 – Resultater fra skjærprøvingene

Materiale	Areal [mm ²]	F _i max [N]	Skjærfasthet [N/mm ²]	Bruddtid [tt:mm:ss]	Bruddtype
1A1	24150	3717	0,0770	00:01:05	B
1A2	24045	3356	0,0698	00:01:11	B
1A3	24150	3538	0,0733	00:00:57	B
Gjennomsnitt			0,0733		B
1B1	24255	2370	0,0489	00:00:38	B
1B2	24255	2414	0,0498	00:00:43	B
1B3	24150	3112	0,0644	00:00:55	B
1B4	24150	2481	0,0514	00:00:46	B
1B5	24150	3334	0,0690	00:00:55	B
Gjennomsnitt			0,0567		B
2A1	24150	3005	0,0622	00:01:10	B
2A2	24150	3792	0,0785	00:01:17	B
2A3	24150	5090	0,1054	00:01:43	B
2A4	24150	3685	0,0763	00:01:15	B
2A5	24150	2778	0,0575	00:00:57	B
Gjennomsnitt			0,0760		B
3A2	24150	4223	0,0874	00:01:20	B
3A4	24255	2454	0,0506	00:00:40	B
3A5	24255	4457	0,0919	00:01:20	B
Gjennomsnitt			0,0766		B
3B1	24255	4923	0,1015	00:01:39	A
3B2	24150	3047	0,0631	00:00:59	B
3B3	24045	5945	0,1236	00:02:02	B
3B4	24045	7595	0,1579	00:02:25	A
3B5	24150	3574	0,0740	00:01:07	A
Gjennomsnitt			0,1040		A
4A1	24255	3917	0,0807	00:01:17	A
4A2	24255	3654	0,0753	00:01:07	A
4A3	24150	3017	0,0625	00:00:53	B
4A4	24255	4356	0,0898	00:01:22	A
4A5	24255	4124	0,0850	00:01:16	B
Gjennomsnitt			0,0787		A