

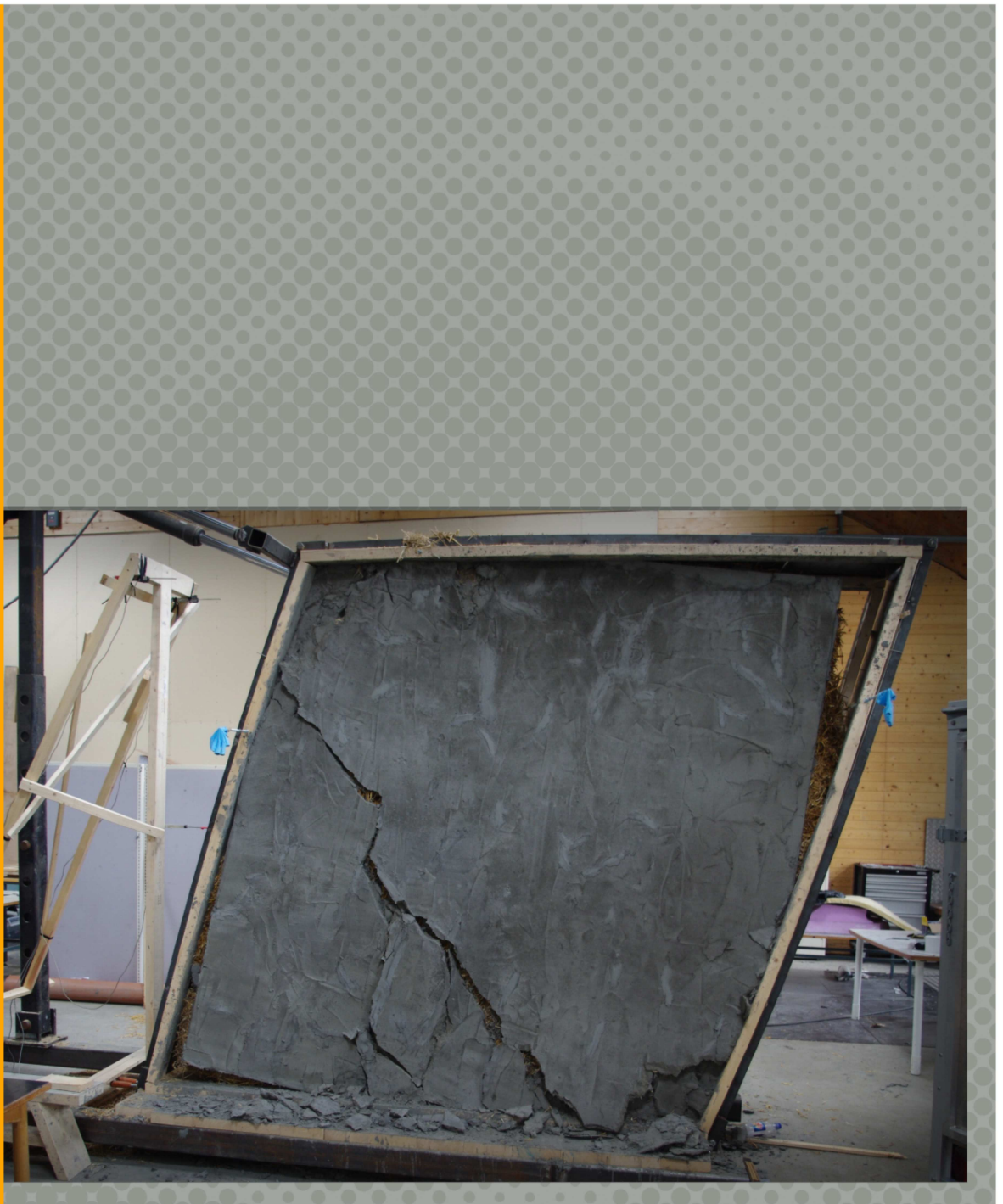
LEIRPUSS SOM VEGGSKIVE I KONSTRUKSJONER AV HALM,
LEIRE OG TØMMER.

- FORSØKSBASERT MÅLING AV LEIRPUSSENS KAPASITET

CLAY PLASTER AS A SHEAR WALL IN CONSTRUCTIONS OF STRAW-BALES, CLAY
AND TIMBER.

- MEASUREMENTS OF THE CAPACITY OF CLAY PLASTERS THROUGH
EXPERIMENTS

VIDAR VIK



UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP

INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2012



Forord

Denne mastergradsoppgaven er den endelige fullførende del av studieprogrammet Byggeteknikk og Arkitektur ved Institutt for Matematiske realfag og Teknologi (IMT), Universitetet for Miljø og Biovitenskap, Ås.

Hovedveileder har vært Nils-Ivar Bovim, amanuensis ved IMT. Videre veiledning og støtte har blitt gitt av medlemmer av Norsk Jord- og Halmbyggerforening Piet Jensen, Finn Østmo, Sascha Böhme og Paal Nordhuus. Verkstedsansvarlige Bjørn Brenna og Bjørn Slette, henholdsvis ved IMT og INA har bidratt med uvurderlige innspill rundt konstruksjonen av forsøksapparater og Tom Ringstad med likedan rundt det måletekniske utstyret. Olav Høibø ved INA har ytt god hjelp med de statistiske vurderinger.

Det rettes herved en stor takk til alle som har bidratt!

Takk også til Kittel Austvoll, Ole Harbitz og mor for gjennomlesning og korrektur.

-Hvorfor halm og leire? Dette temaet fanger både forkjempere og motstandere; skeptikere og idealister. Debatten rundt halm som konstruksjonselement er allerede bredt dekket i andre titler og følges stadig opp med forskning og erfaringsrapporter av ulike former. Det vil derfor ikke berøres i særlig grad her. I denne oppgaven betraktes kun det rent konstruksjonstekniske i forhold til hus med halm og leire. For ordens skyld kan det nevnes noen momenter i oppgaveforfatterens tiltrekning mot halmbygg:

- Materialer som krever liten grad av foredling, er lokalt tilgjengelige og innebærer liten produksjon av CO₂.
- Halmhusenes oppføringshistorie viser at det er mulig å bygge gode halmhus med høy bostandard og lang levetid (Norsk jord og halmbyggerforening, 2012; Minke, 1995 og Jacobsen, 1999).
- En byggemetode som i sin enkleste form er lett å lære, krever lite avansert verktøy og er folkelig tilgjengelig samtidig som den viser seg velegnet også til bruk i teknisk avanserte byggverk med høye spesifikasjonskrav.

Med ønske om god lesning,

Vidar Vik
Universitetet for Miljø og Biovitenskap
Ås 2012

Sammendrag

Denne oppgaven undersøker leirpussens avstivende evne gjennom skivevirkning i huskonstruksjoner av halm, tre og leire. Problemstilling er hvorvidt man kan utelate skråstrevere i en bærende treramme og la kreftene overføres fra vind til grunn gjennom et 4 cm tykt lag av leirpuss. Denne problemstillingen er formulert i samråd med Norsk Jord- og Halmbyggerforening. Oppgaven tar utgangspunkt i gjeldende forskrifters krav til vindavstivning.

For å undersøke dette er det gjennomført tre ulike typer forsøk for å beskrive leirens oppførsel:

1. Kvalitative analyser av pussprøver basert på ulike leirmørtler i kapitlene 0, 4.1, 5.1 og 6.1.
2. Trykkforsøk på små kuber fra 17 forskjellige tørkede mørtelblandinger i kapitlene 3.3.2, 4.2, 5.2 og 6.2.
3. Fullskala skiveforsøk på en vegg på 2,4 x 2,4 m i kapitlene 3.4.2, 4.3, 5.3 og 6.3.

Det er viet en spesiell plass til teori rundt skiver og leire. Enkelte tema rundt halmbyggeteknikk er skildret.

Trykkforsøkene ga en forventet trykkfasthet på en hardstampet og lite fuktig mørtelblanding på rundt $2,5 \text{ N/mm}^2$ med valgte materialer. Tilsats av små mengder forskjellige sorts fiber viste en tendens til å redusere trykkfastheten. Tilsats av store mengder viste en tendens til å øke trykkfastheten sammenlignet med den ikke-fiberarmerte prøven. Tendensen var entydig, men prøvemengden for liten til å konkludere på statistisk grunnlag.

Fullskala skiveforsøk viste at veggen tålte en skiveskjærbelastning på 2,8 N/mm. Det tilsvarer en horisontal forskyvningskraft langs veggens øvre randsone på 7000 N. Denne målingen ble gjort med en trykksensor som ikke var kalibrert i forhold til testjiggen den ble anvendt på. Hvor mye målte fasthet avviker fra korrekt måledata er ikke undersøkt. Det antas imidlertid at måledata befinner seg forholdsvis nærme realistiske fasthetsverdier og kan gi en generell pekepinn på veggens kapasitet. Denne usikkerheten, sammen med andre faktorer, gjør at forsøket først og fremst bør betraktes som preliminært for videre forsøk av samme sort.

Abstract

This Master thesis examines the supporting properties of clay-plasters in constructions using straw-bale, clay and wood under diaphragm-load. The approach has been whether wooden diagonal stays in the timber-frame is necessary or if a 4 cm deep clay-plaster will work as a diaphragm wall to stiffen the construction against wind-loads. This question has been formulated with the inspiration from the Norwegian earth- and strawbuilding community (Norsk Jord- og Halmbyggerforening). The calculations of wind-loads are pursuant to NS-EN 1991-1-4 + NA.

Three different experiments were carried out in the attempt of describing the structural behaviour of clay.

1. Qualitative analysis of clay-plasters with different additives in chapters 0, 4.1, 5.1 and 6.1.
2. Tests of capacity of pressure on 17 different varieties of dry clay mortars in chapters 3.3.2, 4.2, 5.2 og 6.2.
3. Full scale diaphragm wall test. Wall size: 2,4 x 2,4 m in chapters 3.4.2, 4.3, 5.3 og 6.3.

A substantial part of theory treating clay properties is included, as well as diaphragm walls and straw-bale construction.

The tests of capacity on dry, well-rammed clay mortars yielded a strengthwise average of 2,5 N/mm². Small amounts of fibre added to the mortar reduced this strength. Greater amounts of fibre resulted in a increased strength compared to the fibreless samples. The trend was clear, but the tests were conducted on too few samples to conclude on a statistical basis.

The full scale diaphragm wall tests gave the wall a shear capacity of 2,8 N/mm. That equals to a 7000 N horizontal pressure along the top of the wall. This reading was conducted on a pressure sensor not perfectly calibrated to the jig used for the experiment. The reading error is to some extent unknown. It is however assumed that the measured value of 2,8 N/mm lays close to realistic values and yields a general pointer of capacity. The uncertainty of the measured value, together with other factors, makes this experiment primarily preliminary for similar experiments.

Innhold

Forord.....	i
Sammendrag.....	ii
Abstract	iii
1 Innledning	4
1.1 Bakgrunn	4
1.2 Tidligere forsøk	4
1.3 Problemstilling	4
1.4 Referansegruppe – bidrag fra kompetansepersoner i det norske halmbyggermiljøet.....	5
1.5 Avgrensninger	5
1.6 Språkbruk	6
2 Teori	6
2.1 Halmhus.....	7
2.1.1 Halmhusets plass i husbyggingens historie	7
2.1.2 Halmhus – litt om utførelse	8
2.1.3 Egnede halmballer for halmhus	10
2.1.4 Leirpuss for halmhus	11
2.2 Leir og leire – en introduksjon	14
2.2.1 Leire – en jordart.....	14
2.2.2 Leir – leire i sin reneste form	14
2.2.3 Uttørring av leir – fra flytende til fast form.	16
2.2.4 Forventninger til leirens trykkfasthet	18
2.3 Skiver – et avstivende konstruksjonselement.....	19
2.3.1 Skiver generelt	19
2.3.2 Beregningsmetoder.....	20
2.3.3 Skiver av leirpuss.....	24
2.3.4 Skjørstrøm som oppstår i en skive	25
2.3.5 Krav til vindavstivning av småhus.....	27
2.3.6 Klimaregnskap.....	27
2.3.7 Forventninger til skivens kapasitet basert på fagverksberegninger.....	28

3	Metode	30
3.1	Materialer og materialvalg spesielt	30
3.1.1	<i>Tilmåling</i>	30
3.1.2	<i>Halmballer - egenproduksjon</i>	30
3.1.3	<i>Leire – fra Weber Leca</i>	32
3.1.4	<i>Tilslagsmaterialer</i>	33
3.1.5	<i>Sand</i>	33
3.1.6	<i>Subus</i>	33
3.1.7	<i>Lecakuler</i>	34
3.1.8	<i>Fiber innhentet til forsøkene</i>	34
3.2	Pussprøveforsøk	36
3.2.1	<i>Framgangsmåte</i>	36
3.2.2	<i>De ulike prøvene som ble vurdert:</i>	37
3.3	Fasthetsforsøk.....	39
3.3.1	<i>Støvelprøver</i>	39
3.3.2	<i>Kubeprøver</i>	41
3.4	Skiveforsøk.....	52
3.4.1	<i>Småskalaforsøk</i>	52
3.4.2	<i>Fullskalaforsøk</i>	53
4	Resultater	69
4.1	Pussprøver – kvalitative egenskaper til ulike mørtelblandinger.....	69
4.2	Små trykkprøver – tallfesting av ulike mørtelblandingers trykkfasthet	71
4.2.1	<i>Bruddform</i>	73
4.2.2	<i>Resultater av statistisk analyse av tallmaterialet</i>	74
4.3	Skiveforsøk.....	77
4.3.1	<i>Leirpussens trykkstyrke</i>	77
4.3.2	<i>Pusstykkelse</i>	77
4.3.3	<i>Data fra skivetest</i>	78
4.3.4	<i>Bruddform etter skivetest</i>	83
4.3.5	<i>Teoretisk skivekapasitet beregnet med gjeldende forutsetninger</i>	84
5	Diskusjon	85
5.1	Pussprøver	85
5.1.1	<i>Diskusjon rundt metoden</i>	85

5.1.2	<i>Diskusjon rundt resultater</i>	85
5.2	Små trykkprøver	86
5.2.1	<i>Statistiske betraktninger</i>	86
5.2.2	<i>Vurdering av kvaliteten på forsøket</i>	87
5.2.3	<i>Betraktninger rundt tilsetning av fiber</i>	87
5.3	Skiveforsøk	89
5.3.1	<i>Diskusjon rundt leirpussens trykkstyrke</i>	89
5.3.2	<i>Bruddform</i>	89
5.3.3	<i>Statisk vs dynamisk trykkmåling</i>	89
5.3.4	<i>Diskusjon – dersom dynamiske måledata anvendes</i>	91
5.3.5	<i>Tilfredsstillir leirskiven forskriftenes krav til avstivning?</i>	92
5.3.6	<i>Diskusjon rundt utførelse og metode</i>	92
6	Konklusjon	94
6.1	Pussprøver	94
6.2	Små trykkprøver	94
6.3	Skiveforsøk	95
7	Videre arbeid	96
8	Litteratur og referanser	97
8.1	Referanser	97
8.2	Litteratur	97
9	Vedlegg	100
9.1	Vedlegg A	100
9.1.1	<i>Jensens metode</i>	100
9.1.2	<i>Støvelprøver – labrapporter</i>	101
9.1.3	<i>Prøveveggenes tykkelse, målinger</i>	107
9.2	Vedlegg B	110
9.2.1	<i>Logg fra pussprøveforsøk</i>	110
9.2.2	<i>Logg fra forsøk med kubepøver av leirmørtel</i>	112
9.2.3	<i>Vindlastberegninger for et lite villahus på Nesodden</i>	114
9.2.2	<i>Datasett for fullskalaforsøket</i>	116

1 Innledning

I de senere år har det hvert år blitt reist flere halmhus her til lands. Disse utgjør er en svært smal og forholdsvis nyankommen nisje av den totale husbyggingen i Norge. Men stadig flere halmhus kommer til¹. Byggeteknikken videreutvikles gradvis og erfaringsgrunnlaget vokser. I takt med dette formuleres nye spørsmål knyttet til utførelsen av en rekke bygningsdetaljer.

Denne oppgaven har til formål å besvare en slik problemstilling inspirert av interesseforeningen for halmbygg i Norge; Norsk Jord og Halmbyggerforening.

1.1 Bakgrunn

Veggene i et halmhus er typisk bygget opp av halmballer som kles inn i leirpuss. Denne konstruksjonen støttes opp av en bærende tømmeramme. Opprinnelig har leirens formål vært å minske klimapåkjenningene på veggens kjerne; halmen. Råteutvikling finner med stor sannsynlighet sted dersom vann får trenge inn i en hardpresset halmball¹. Erfaring viser at leiren fullbyrder sin misjon som klimaskall. Tørre halmballer ikledd leirpuss forblir tørre.

Halmbyggermiljøet har lenge lurt på om leirpussen kan tildeles flere funksjoner i byggverket utover det å beskytte. Leirpussen er forholdsvis tykk (3-10 cm) og fester godt til halmen. Den har i seg selv en betydelig fasthet og i kombinasjon med heft til halmen vil fastheten potensielt øke.

1.2 Tidligere forsøk

Tidligere har man gjort trykkforsøk på ferdig pussede halmvegger. Det har da blitt undersøkt veggens samlede bæreevne og muligheten for å benytte selve veggen som bærende element i konstruksjonen. Resultatet av slike undersøkelser er at det i Danmark og sydover langs EU er mulig å konstruere halmhus hvor veggen alene, med kombinasjonen av leirpuss og halm, er bærende uten tømmeramme¹. Dette møter forskriftenes krav til bærekapasitet. I Norge må man, på grunn av et forholdsvis stort lastbidrag fra sne, angitt i egne nasjonale tillegg til gjeldende forskrifter, benytte treramme for å oppnå krav til bæreevne.

Forfatteren av denne oppgaven kjenner ikke til tidligere forsøk som behandler skivevirkning i leire.

1.3 Problemstilling

I denne oppgaven undersøkes leirpussens evne til å motstå horisontale krefter som vil opptre i et bygg. Dette gjøres gjennom forsøk. Spørsmålet er om man kan utelukke bruken av skråbånd i rammeverket og utelukkende basere seg på leirens fasthet til avstivning av konstruksjonen gjennom såkalt skivevirkning.

Undersøkelsene tar altså utgangspunkt i at leirpussen vil fungere som en avstivende skive for den bærende trerammen. Formålet har vært å kvantifisere avstivningseffekten for å undersøke hvorvidt leirpussen vil kunne møte forskriftenes krav til avstivning av bolighus.

For å undersøke leirpussens avstivningsevne ble det gjort forsøk på leirpussen. I samråd med håndverkere i faget, akademikere og med inspirasjon fra testprosedyrer for lignende materialer og situasjoner ble det besluttet å gjennomføre tre typer forsøk:

1. Pussprøver: Forsøk som studerer hvordan ulike mørtelblandinger egner seg som leirpuss. Disse undersøkelsene ble vurdert skjønnsmessig utifra hvilke egenskaper som er ønskelige for en leirpuss.
2. Trykkforsøk: Trykkforsøk på små kuber av ulike mørtelblandinger i tørket tilstand for å finne hvilken resept (jfr. kap. 1.6 Språkbruk) som kunne framvise størst trykkfasthet. Dette var kvantitative forsøk som ble gjennomført med en påfølgende statistisk analyse.
3. Skiveforsøk: Hele forsøksserien kulminerte i en fullskala skivetest av halmvegg på 2,5 x 2,5 meter. Mørtelen som ble benyttet baserte seg på resultatene fra de to forestående forsøk.

Disse tre forsøkene følger oppgaven som hvert sitt tema, og de behandles uavhengig av hverandre under kapitlene *Metode*, *Resultater*, *Diskusjon* og *Konklusjon*. De samme materialene er benyttet for alle forsøkene og behandles derfor generelt.

1.4 Referansegruppe – bidrag fra kompetansepersoner i det norske halmbyggermiljøet

Halmbyggerkunsten er en byggeteknikk i støpeskjeen. Veldokumenterte løsninger og byggemetode kan være vanskelig å finne fram til. Den empiri man etterlyser for å løse en konkret problemstilling finnes ofte ikke. Derfor ville det være svært nyttig å knytte kontakter med mennesker som har praktisk erfaring fra halmbygging.

I Norge finnes et lite, men aktivt, nettverk som fremmer bygging med halmhus; Norsk Jord og Halmbyggerforening (NJH). Denne foreningen består for en stor del av beboere av halmhus samt håndverkere og arkitekter som har med halm og leirhus å gjøre. I forbindelse med denne oppgaven ble foreningen tidlig kontaktet og invitert til å komme med innspill. En referansegruppe bestående av enkelte medlemmer fra foreningen ble formet. I samråd med personer fra denne gruppen ble problemstillinger og faglige spørsmål drøftet og belyst gjennom møter, felles leirebearbeiding, korrespondanse på mail og en framdriftsdokumenterende blogg på nett. Denne kontinuerlige kontakten og diskusjonen var med på å forme de metoder som presenteres i denne oppgaven. Det har vært av stor betydning for oppgaven å ha denne type faglig støtte innen et fagområde som ennå er under utvikling.

Referansegruppen bestod av Sascha Böhme, Pål Nordhuus, Piet Jensen og Finn Østmo.

1.5 Avgrensninger

De byggtekniske løsninger kan variere en del fra halmhus til halmhus. Det er derfor tatt utgangspunkt i en konkret halmkonstruksjon når det gjelder å modellere en reell veggkonstruksjon. Denne konstruksjonsmetoden er presentert i kapittel 2.1.2.

1.6 Språkbruk

Leir og leire: Både tysk og engelsk har gode ord for å skille mellom leire som jordart – hvor leire er en bestanddel i likhet med silt, organisk materiale og andre tilslag – og leir i ren form. Det eneste språklige skillet som har blitt funnet i norsk litteratur stammer fra Riksantikvarens prosjektrapport; *Prøving av leire*. I denne rapporten skjernes det mellom leir og leire. I oppgaven forøvrig vil Riksantikvarens språkbruk bli benyttet. Siden *leir* ikke er et bokmålsord (Leir, s.a.) er det blitt valgt å beholde det nynorske bøyingsparadigmet for dette ordet med den hensikt å tydeliggjøre det semantiske skillet.

	Riksantikvaren	Tysk	Engelsk
Jordart	<i>Leire</i>	<i>Lehm</i>	<i>Clay</i>
Navn på mineralisk partikkel	<i>Leir</i>	<i>Ton</i>	<i>Loam</i>

Resept: Resept brukes om det bestemte blandingsforholdet for leirmørtelen.

Mørtel: Her brukes mørtel om en pussblanding bestående av leir samt andre tilslag nevnt under avsnittet om materialer.

Omfar: Opprinnelig et lafteuttrykk som beskriver ett lag av tømmerstokker i lafteveggen (Gunnarsjaa, 1999). Her brukt om ett horisontalt lag av halmballer i en halmveggskonstruksjon.

Dymling: Lafteuttrykk om vertikale forbindere mellom laftestokkene. Her brukt om vertikale forbindere mellom halmballer, etter kutyme i bransjen.

2 Teori

Under teorikapittelet belyses ulike tema som knyttes opp mot forsøkene som beskrives i kapittel 3.

Det er beskrevet litt om halmhus generelt. Ulike veggkonstruksjoner er presentert.

Teori rundt leir og dens egenskaper har stått sentralt rundt utformingen av forsøksmetodene og utførelsen av dem. Spesielt er det i metodekapittelet flere referanser til leiras oppførsel under uttørkning.

Det er valgt å gå inn på emnet om skiver og skivevirkning. Det blir også gitt et kort overblikk av enkelte prinsipper i beregningen av skivekapasitet for kledningsplater i trekonstruksjoner. Dette tjener sammenligningen mellom leirskivens stivhet og andre skivers avstivende egenskaper.

Figurer og bilder er forfatterens egne, om ikke annet er oppgitt.

2.1 Halmhus

2.1.1 Halmhusets plass i husbyggingens historie



Figur 2.1: Originalen. Halmhus fra Nebraska, 1925 (*Halmhus i Nebraska-stil, Nebraska*)

Det finnes idag i underkant av 80 halmhus i Norge (Norsk jord og halmbyggerforening, 2012). Alle disse er bygget etter 1950 og representerer slik en relativ ny byggeteknikk. Teknikken stammer opprinnelig fra den amerikanske midtvesten i slutten av det 19. århundre. Dette skjedde på en tid hvor det var stor utbygging av nye områder og halmballpressen var blitt et naturlig redskap i landbruket. Byggeteknikken ble kalt "the Nebraska style house" (Jacobsen, 1999). Her var selve halmen det lastbærende element ikledd et klimaskall av leire. Taket var en relativt lett valmtakskonstruksjon av tre.

Jordhus med leir som bindemateriale strekker seg tilbake i tid omtrent like langt som sivilisasjonen selv. Det finnes et utall av ulike byggemetoder av leire fordelt på alle jordens beboelige kontinenter. Rundt 30 % av verdens befolkning antas idag å bo i hus hvor leir er en konstruktiv bestanddel (Keefe, 2005). Erfaringsgrunnlaget burde dermed være stort, men forholdsvis lite kunnskap er nedskrevet og leire passer ikke alltid like godt inn i moderne forskrifters krav (Jensen¹).

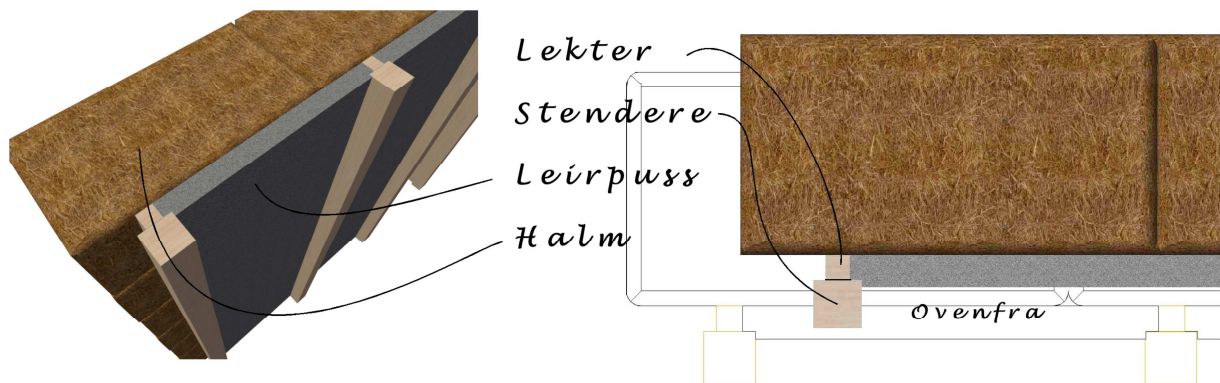
2.1.2 Halmhus – litt om utførelse

Moderne halmhus i Norge bygges i all hovedsak med en bærende ramme av tre. Dette skiller dem noe fra den originale "Nebraska style house", hvor halmen var lastbærende. Byggeforskrifter, med sitt hensyn til snølast, gjør at en bærende ramme er et formelt krav. Små firkantete halmballer stables opp i tilknytning til trerammen og forbindes vertikalt til hverandre med dymlinger av tre og stålstreng. Halmballene pusses deretter med leire. Man får altså en konstruksjon bestående av leire, halm og tre hvor trekonstruksjonen bærer, halmen isolerer og leiren beskytter.

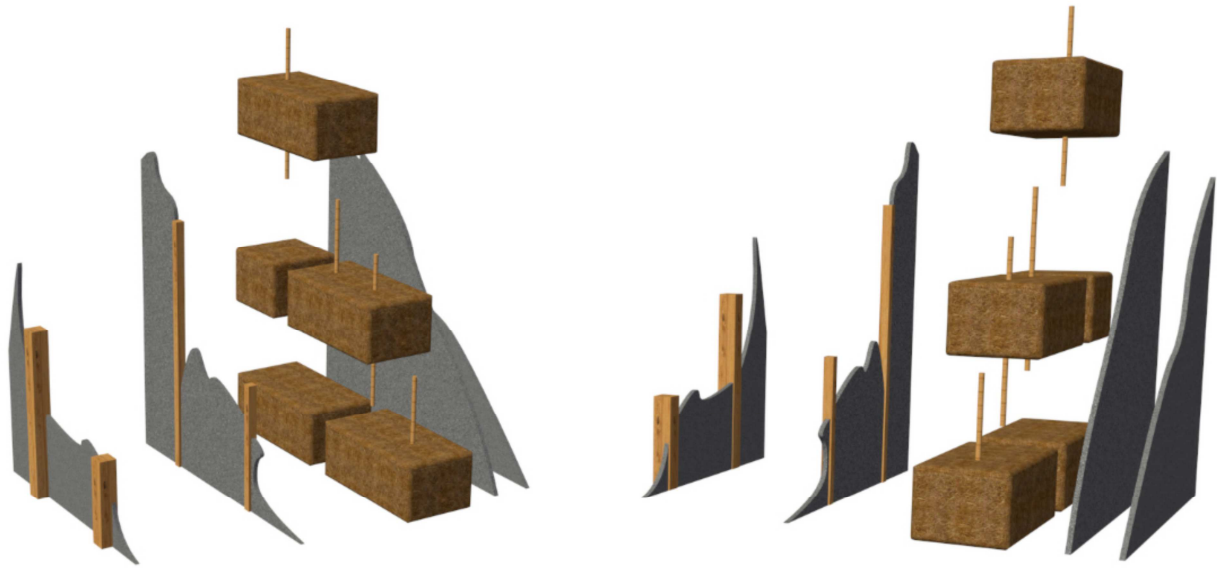
Pussing av halmen med leirpuss foregår hovedsakelig på to ulike sett: Enten maskinelt med pussprøyte eller for hånd med dertil egnede mureredskaper. Pussen legges i to til tre lag. Ingen kjemisk forbindelse finner sted mellom puss og halm; den er utelukkende mekanisk (Jacobsen, 1999). Tilslaget og pussblandingen varierer mellom de ulike sjiktene for å oppnå en heldig fukttransport i veggen. Man forsøker å få en fuktstrøm som beveger seg innenfra og ut. Dette oppnås ved å tilsette tilslag av større kornstørrelse på utendørs puss enn på innvendig puss. (Jacobsen, 1999)

For denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i en bestemt veggkonstruksjon. Det foreligger et visst erfaringsgrunnlag med akkurat denne utførelsesmetoden i Norge. Senest med et hus oppført i Kirkeåsveien på Nesodden i 2010 (Norsk Jord og halmbyggerforening, 2012). Veggen ble der utført slik:

- Bærekonstruksjon av tre, plassert på veggens innside.
- Stendere på 98 x 98 mm ble lektet ut fra halmveggen med 48 x 48 mm lekter.
- Leirepussen ble påført mot halmveggen mellom lektene.

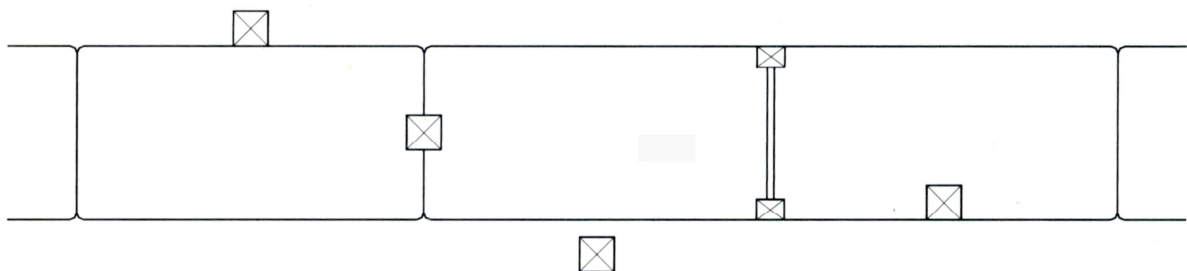


Figur 2.2: Her vises utførelsen av en bestemt halmvegg med 98 x 98 mm stendere på halmveggen innside. Lekter på 48 x 48 mm skiller halmveggen og stenderne ad.



Figur 2.3: Oppbygning av halmveggen. To til tre lag leire kler halmballene inn. Dymlinger av tre forbinder halmballene vertikalt og stabiliserer halmveggen. Disse drives ned ovenifra.

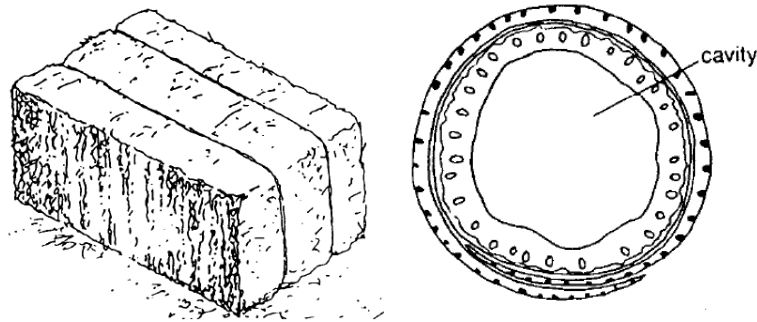
Fordelen med å trekke stenderne så langt inn i rommet er at eventuelle svinnsprekker mellom lekter og leirpussen vil ligge bakom stenderen. Dette er med på å hindre kaldras der halmveggen ellers ville vært eksponert mot rommet. Stenderne kunne ellers også vært plassert i veggen med en heldekkende leirpuss, men dette ville hatt kuldebrovirkninger som følge. Minke & Mahlke (2001) foreslår ulike alternative løsninger i nedenstående figur. Flere av disse har vært utprøvd i Norge (Jacobsen, 1999).



Figur 2.4: Fem eksempler på stenderplassering er illustrert.

2.1.3 Egnede halmballer for halmhus

Den store overgangen fra å produsere små firkantede halmballer til å produsere store rundballer, med eller uten plastinnpakning, har for lengst funnet sted i vårt lands landbruk. Dette påvirker tilgjengeligheten til gode byggehalmballer. Tradisjonelt har imidlertid de, etter dagens målestokk; små, firkantede halmballene spilt en viktig rolle for landbruket. Fortsatt idag finnes det en viss produksjon av disse. I Norden har i hovedsak firkanthalmballen hatt følgende størrelse; 45 x 35 x 85-100 cm. De er bundet sammen av to strenger og veier cirka 15 kg. (Jacobsen, 1999)



Figur 2.5: Til venstre: To-strengs klassisk nordisk halmball. (Jacobsen, 1999)
Til høyre: Tverrsnitt av halmstrå.

Rolf Jacobsen (1999) lister opp følgende krav til den «ideelle byggehalmball»:

- Tørr (10-16 % fuktighet, ei over 18 %)
- Ikke utsatt for råte, mugg og lignende.
- Hardt presset og presis i formen.
- Uten frø. Frø tiltrekker skadedyr.
- Murstein-proporsjoner: Omtrent dobbelt så lange som brede.
- Sprøytefri.

Jacobsen (1999) tilføyer at det er viktigere at halmballen er hardt presset enn hvilket kornslag som benyttes. Han erfarer at sprøytefri halm har større motstandskraft mot soppangrep og er bedre for innemiljøet.

For å oppnå dette er det viktig å kjenne egenskapene til den halmen som benyttes til halmballproduksjon. Veggkonstruksjoner med halmkjerne er spesielt sensitive for fukt i byggefasen. En halmball regnes som fuktig dersom den overskrider 18 % fuktighetsinnhold, og dersom denne blir pusset inn av leire vil den stå i fare for å tillate muggdannelse.

Det er viktig å bevare halmens hulromstruktur, ettersom dette har mye å si for isoleringsevnen (fig. 2.5). Med de halmballpresser som benyttes vil det imidlertid sjelden være et problem at halmen presses så hardt at den blir knust og hulrommene forsvinner (Jacobsen, 1999).

Jacobsen påpeker at det ikke finnes noen god metode for å bestemme hvorvidt halmballen er komprimert tilstrekkelig. I praksis vil dette være kvalitative undersøkelser som baserer seg på skjønn og erfaring: «Vurdering av fasthet, hardhet og form og at halmballene skal kunne løftes i en streng uten at halmballen tenderer til å bøye seg.» (Jacobsen, 1999)

2.1.4 Leirpuss for halmhus

Man kan snakke om en idealpuss for halmhus. Som regel vil dette handle om å balansere egenskapene til pussens ulike tilslagsstoffer. En god leirmørtel til pussing av halmhus bør inneha følgende karaktertrekk:

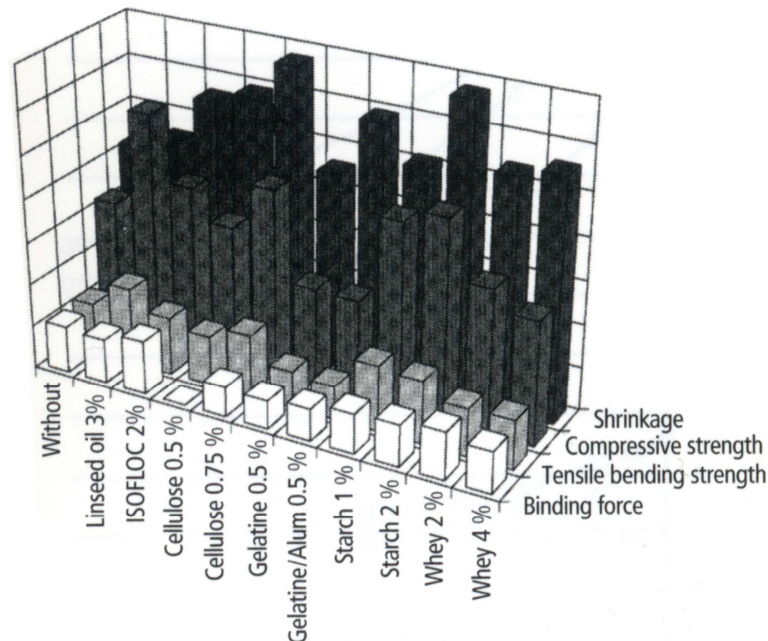
- Være formbar
- Være sterk
- Gi lite svinn / krymping
- Gi lite oppsprekning
- Hefte godt til underlaget
- Være vannbestandig

Generelt betraktes tilslag som alt det som ikke er leir i leirmørtelen. Normalt skiller man mellom fibertilsetninger, mineralske tilsetninger og kjemiske tilsetninger (Minke, 1995).

Leir i seg selv vil som regel krympe så mye at oppsprekning vil bli et problem i mørtel bestående av kun leire. Det kunne imidlertid ha vært ønskelig å bare benytte leire i mørtelen utifra et perspektiv om størst mulig styrke. Men pussens funksjon er først og fremst å holde regnskyll og fuktighet ifra å trenge inn i halmen. Med mye oppsprekning og store sprekker vil faren for vanninntrengning til halmvegg og konstruksjon bli stor.

En naturlig forekomst av leire vil normalt inneholde store deler silt. Ulike tilslag utover dette vil som regel være ønskelig. Det er imidlertid ofte slik at man forbedrer en egenskap på bekostning av en annen idet man modifierer leirpussen. Man blir nødt til å spørre seg hva pussens skal brukes til, eksempelvis i hvilket sjikt den ligger i veggen. Dette er en vurderingssak.

I figuren under er det vist resultater oppnådd i et forsøk ved universitet i Kassel, Tyskland, hvor ulike tilslagsstoffer er tilsatt. Figuren viser ulike tilslagsstoffers effekt på en tørket leirmørtel med hensyn på bindekraft, krymping og kapasitet for trykk og strekk. Den viser store forskjeller og eksemplifiserer at det på forhånd er nødvendig å kjenne til leirpussens bruksområde.



Figur 2.6: Testresultater fra forsøk på ulike tilsetningsstoffer i en leirmørtel. (Illustrasjon hentet fra Minke, 1995)

2.1.4.1 Generelt om tilslagsstoffer i leirpussen

Tilslag beskriver alt det som ikke er leir i leirmørtelen. Normalt skiller man mellom fibertilsetninger, mineralske tilsetninger og kjemiske tilsetninger (Minke, 1995). Bruken av tilslag varierer mye mellom ulike mørtelmakere og variasjonen kan være stor. Til denne oppgaven valgte man materialer i samråd med referansegruppen fra NJH (jfr. kap 1.4). Kriteriene for tilslagene var at de skulle være relativt lett tilgjengelige, tidligere anvendt eller ønskelig å anvende og passe inn i halmhusets ønskede miljøprofil. Man kom fram til at de nedenstående tilslag var hensiktsmessig å utføre forsøk med.

2.1.4.1.1 Sand

Sand er et stabilt materiale som leiren hefter godt til. Sand iblandet i mørtelen vil bidra til å redusere krymping. Samtidig vil økning av andelen sand vil redusere heften til fuktig puss og redusere trykkstyrken til tørr puss. Her vil man bli nødt til å skjønnsmessig vurdere et optimalt blandingsforhold for gitt leirtype.

2.1.4.1.2 Subus, ekspandert perlitt, lecakuler og annen stein.

Den tetteste sammenpakning av en masse oppnås ved å minimere porevolumet i massen. Med riktig blandingsforhold mellom store og små korn vil tomrommene mellom store korn fylles opp av mindre partikler.

Boemans (referert i Minke, 1995:79) angir en formel for ideell kornstørrelsesfordeling i leirpussen. Denne minner om den for betong og gjør det interessant å se på tilslag av større dimensjoner i leireblandingen.

$$a = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Betong

$$a_{10} = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} + 10$$

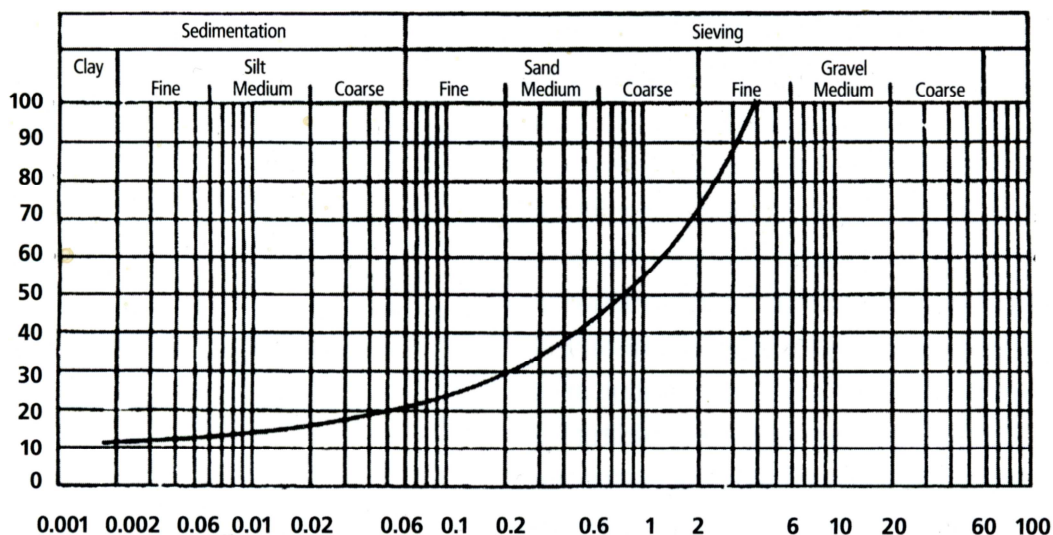
Leire

”Fuller-parabelen” (Minke, 2009) er en idéell siktkurve for betong og er beskrevet med formelen til venstre ovenfor. Minke (2009:43) forklarer den slik:

”a” er vekten av alle korn med diameter mindre enn ”d” uttrykt i forhold til massen med størst diameter ”D”

Boemans (referert i Minke, 2009:43) argumenterer for at denne idéelle siktkurven for betong kun egner seg for blandinger hvor partiklene er større enn 0,002 millimeter.

Minke foreslår at for leirblandinger bør leirinnholdet være angitt og på minimum 10 prosent. Dette fordi leir har en partikkelstørrelse på mindre enn 0,002 mm, og det kreves forholdsvis mye av den, sammenlignet med betong, for å oppnå høye fasthetsverdier. Minke har modifisert ”Fuller-parabelen” deretter. Den er vist i formel til høyre ovenfor. Slik har han kommet fram til en egen siktkurve for leire. Den er tegnet ut i nedenstående figur.



Figur 2.7: "Fuller-parabelen" modifisert til å inkludere et 10 % leirinnhold. (2009).

2.1.4.1.2.1 Subus

Subus er pukk av fin eller middels grov kornfraksjon. Den knuste strukturen gir grunnlag for god heft til leira.

2.1.4.1.2.2 Perlitt

Perlitt er en vannholdig bergart som ved hurtig oppvarming danner en porøs struktur i kraft av at vannet ekspanderer og fordampes. Lecakuler dannes på samme vis, men med utgangspunkt i leirmateriale. Ved brå oppvarming av leira fordampes og ekspanderer det krystallinsk bundne vannet og man får et keramisk porøst materiale (perlitt (s.a.); Minke, 1995).

2.1.4.1.3 Fiber

Tradisjonelt har det nærmest alltid vært tilsatt fiber i leirpussⁱⁱⁱ. Man vet imidlertid ikke alltid hva bakgrunnen er og hva man har søkt å oppnå med dette. Tilsetninger av ulike fiber fungerer godt som fyllmasse og gjør at leirpussen rekker til større overflater. Det kan også hende at fiberen ble tiltenkt å ha en armerende effekt på leiren. Minkes (1995) undersøkelser ved Universitetet i Kassel viser at fiberarmering resulterer i redusert krymping og oppsprekning. I tillegg til å armere kan noe av dette kan ha sammenheng med fiberets evne til å oppta vann. Fuktabsorberende fiber gjør at man får en jevnere uttørkning av leiren. Jevn tørking gjennom hele leiremassen vil føre til en reduksjon av interne spenninger ettersom hele massen krymper i jevnere tempo. Aktuelle fibertilsetninger har tradisjonelt vært dyrehår, kumøkk, halm, trefiber, hampetau med merⁱⁱⁱ.

2.1.4.1.4 Vanninnhold

Vanninnholdet bør være lavt, men uten at det går nevneverdig på bekostning av mørtelens plastisitet samt evne til å feste til underlaget. Dess mindre vanninnhold i mørtelen, dess mindre reduksjon av volumet vil man få i den tørkede leirpussen. Dette er gunstig i forhold til tørkesprekker og svinn (Minke, 1995).

2.1.4.1.5 Kjemiske tilsetninger, kalk og betong

Relativt små tilsetninger av kalk og betong har stor innvirkning på leirens oppførsel og egenskaper som puss. Dette gjelder også for flere andre kjemiske tilsetninger som bitumen, kalsium og urea. Mye av dette er tilsetninger som har en solid tradisjonell forankring med røtter tilbake til babylonernes tid (Minke, 1995). Det kan være interessant i mange tilfeller å betrakte slike tilsetninger, men det blir ikke undersøkt i dette arbeidet.

2.2 Leir og leire – en introduksjon

2.2.1 Leire – en jordart

Leire, som jordart, er et av naturens mest utbredte sediment (Spjeldnæs, s.a.) og man finner den overalt - være seg på landjorden eller havsbunnen.

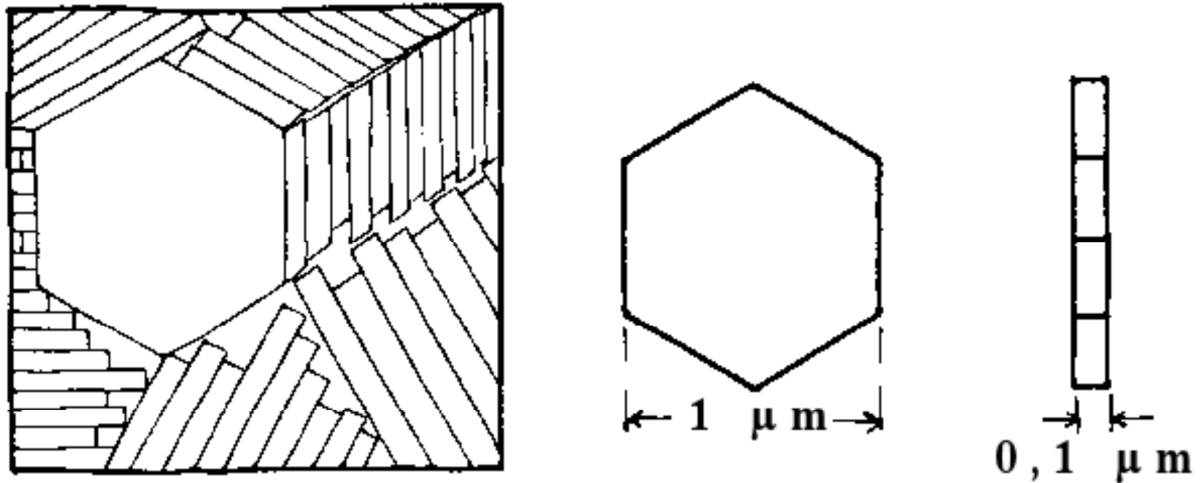
I Norge ligger leiren i hovedsak der isen har fått virke gjennom bergslitasje og erosjon under siste istid (Byggforsk detaljblad 770.115, 2003). Leirens tilblivelse har funnet sted ved lang tids mekanisk (Spjeldnæs, s.a.) og kjemisk (clay, s.a) forvitring av mineraler i berggrunnen. Hvilke mineraler som har inngått i denne prosessen, og blandingsforholdet mellom dem, er med på å bestemme egenskapene til leira.

De mineraler – leirmineraler – som utgjør de viktigste bestanddelene i leirer stammer i hovedsak fra forvitring av feltspat og glimmere (Raade, s.a). Avsetninger i stille vann og påfølgende landheving har gjort at man idag finner leire over store landområder.

Innenfor geologien og jordvitenskapen definerer ISO 14688-1:2002 leir som bestående av partikler i størrelsesorden 2 μm og mindre. Dette fungerer som et hensiktsmessig skille mellom leirpartikler og større partikler som ikke innehar leiras karakteristiske egenskaper (clay, s.a). Partikler mellom 2 μm og 63 μm defineres som silt (silt, sa). Silt dannes på samme måte som leir og er derfor en naturlig bestanddel i leire. Geoteknikere skiller imidlertid silt fra leir etter plastisitetsegenskaper (clay, s.a).

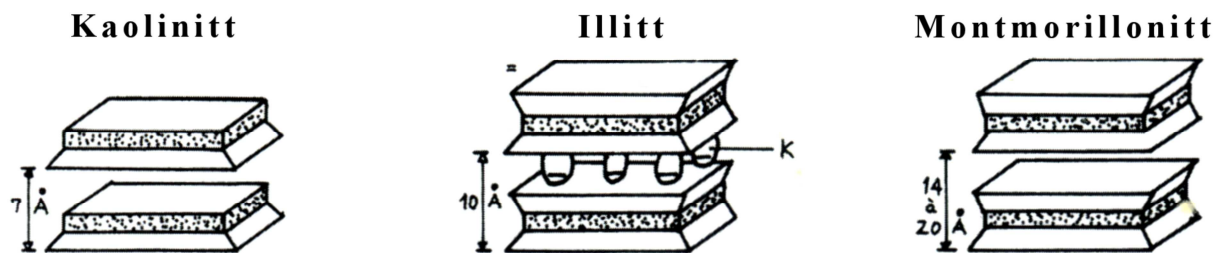
2.2.2 Leir – leire i sin reneste form

Feltspater er i de fleste tilfeller en kjemisk forbindelse mellom silisium og aluminium (aluminiumsilikat) med enten kalium, natrium, kalsium eller magnesium (Raade, s.a, Keefe, 2005:45). Lettløselige forbindelser som kaliumforbindelsene i slike feltspater løses opp gjennom forvitring i vann og feltspatmineralene hydreres. Vannet blir kjemisk bundet til leirmineralene og leira oppstår (Minke 1995:28). Ulike leirtyper dannes etter hvilke mineraler som inngår i feltspaten. I denne oppgavens forsøk ble leira illitt anvendt, men leirtypen kaolinit og montmorillonitt vil for sammenligningens skyld også bli nevnt i dette avsnittet.



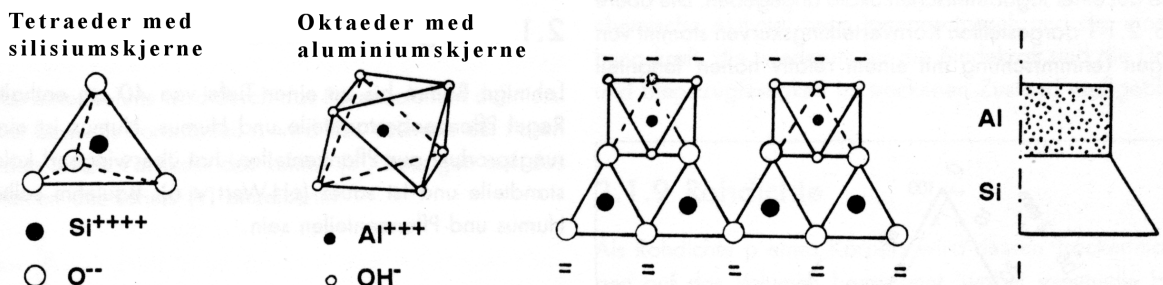
Figur 2.8: Figuren illustrerer hvordan leirpartiklene innordner seg i stabler. (Ill. fra Norton, 1975)

Leirpartiklene forbinder seg til hverandre i en lagvis lamellestruktur hvor hver av partiklene har en heksagonal form (fig. 2.8) med en tykkelse tilsvarende en tiendedel av diameteren. Hver partikkel utgjøres av en slik lamelle. Lamellene består på sin side av interne sjikt. Dette er sjikt som er bygget opp med molykylære kjerner henholdsvis av silisium eller aluminium. Aluminiumskjernen kan for illitt være erstattet med en annen metallforbindelse som magnesium eller jern (Minke 1995:29).



Figur 2.9: Leirpartiklene stable i en lamellestruktur hvor hver lamelle består av to-tre ulike interne sjikt (Minke, 1995) Silisiumssjikt har her fått en hvit farge, mens sjiktene av aluminium er mørke. (Illustrasjon hentet fra Minke, 1995)

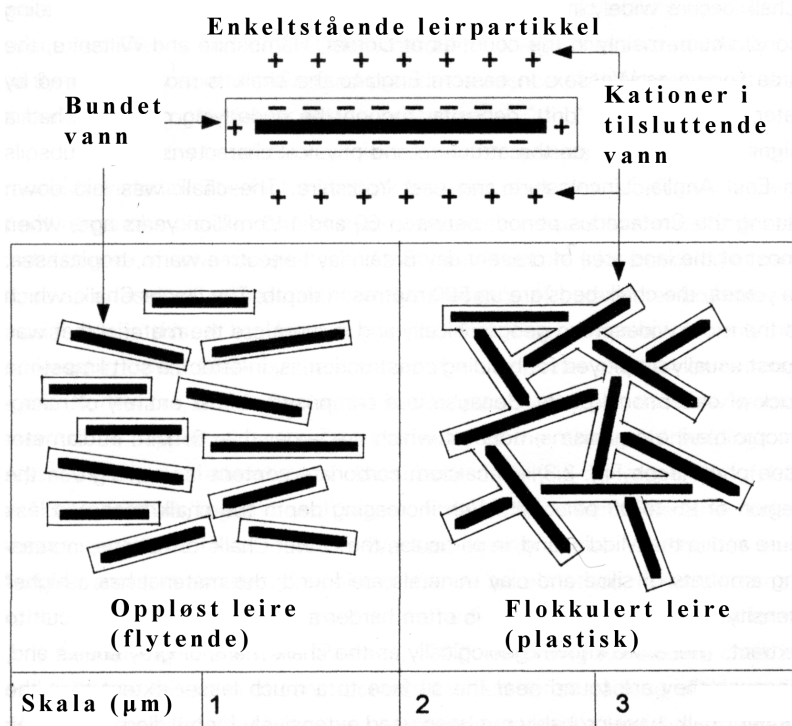
Lamellene forbindes seg imellom med hydrogen- og ioneforbindelser (Keefe, 2005:45). Hver av leirpartiklene vil ha en overflate med netto negativ ladning og endekanter med positiv ladning.



Figur 2.10: Sjektene struktur. Sjektene bestående av silisiumskjernen har en netto større negativ ladning enn sjiktene med en aluminiumskjerne. (Illustrasjon hentet fra Minke, 1995)

Lamellesjiktene med silisiumkjerner har den sterkeste negative ladning. Ioneforbindelsen mellom lamellene er derfor sterkest i leirtypene illitt og montmorillonitt ettersom dette er tresjikt lameller med sjikt av silisium liggende ytterst (både øverst og nederst på figuren) (Minke, 1995:29). I kontakt med vann vil leiras negative overflateladning danne grunnlag for en ny kjemisk forbindelse. Hver

leirpartikkel vil dekkes av en film av «viskøst vann»(Keefe, 2005:45). Denne vannfilmen er elektrokjemisk bundet til leirpartikkelen og har i sum en positiv ladning.

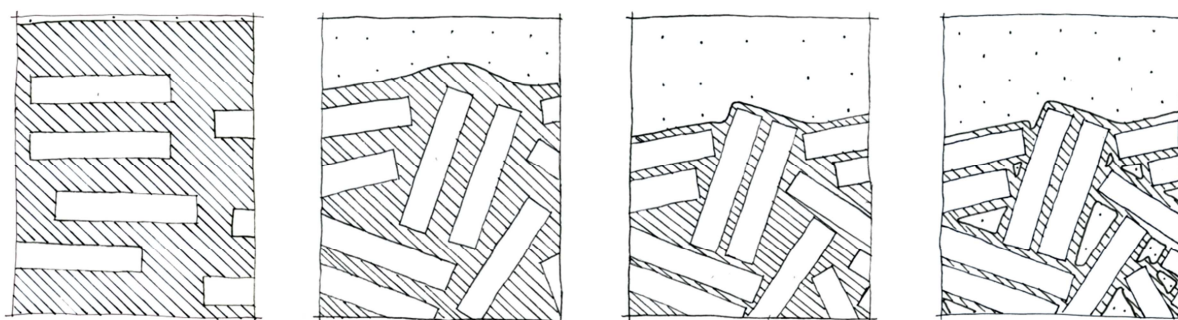


Figur 2.11: Her illustreres hvordan leirpartikkelen iker seg en vannfilm som i sum er negativt ladet. Med denne vannfilmen dannes grunnlaget for flokkulasjon av leira ved ioneforbindelser mellom vannfilm, tilsluttende vann og leir. (Ill. hentet fra Keefe, 2005)

2.2.3 Uttørking av leir – fra flytende til fast form.

Dersom man kjenner til leiras elektrokjemiske oppførsel i vann, forstår man bedre hvorfor leira oppfører seg slik den gjør. Variasjoner i plastisitet og krympeegenskaper under tørking er egenskaper som kan tilskrives leiras interaksjon med vannmolekyler.

For å forklare hvordan dette foregår, kan man skildre en leir-vannløsning ved fire ulike tilfeller. Eller dersom dette finner sted gjennom en tørkeprosess; fire ulike faser: Oppløst i vann, flokkulasjon, krymping og fordampning av porevann.



Figur 2.12: 4 faser i leiras tørkeprosess. Fra venstre: Oppløst i vann, flokkulasjon, krymping og fordampning av porevann. De hvite firkantene illustrerer leirpartikler, det skraverte feltet vann og de prikkete feltet luft. Illustrasjonen er skapt basert på figurer i Keefe, 2005 og Norton, 1976

2.2.3.1 Tørkeprosessen av leir fra flytende form – steg for steg:

2.2.3.1.1 Oppløst i vann:

Leira er flytende. Om leira blir rørt ut i tilstrekkelig store mengder vann vil den oppføre seg flytende. Det vil mellom leirpartiklene virke en netto frastøtende kraft (Keefe, 2005:46) som gjør at leira flyter fritt partikkelvis. Hydrogenforbindelsen mellom leirpartiklene er brutt ned (Keefe, 2005).

2.2.3.1.2 Flokkulasjon:

Ved tilstrekkelig fjerning av relativt vanninnhold i leir-vannløsningen vil hydrogenforbindelsene mellom leirpartiklene etableres på nytt. Leirpartikkel trekkes mot leirpartikkel og de binder seg til hverandre. Leira er nå plastisk og en karakteristisk partikkelstruktur vil ta form: Den negativt ladede partikkeloverflaten vil tiltrekke seg den positivt ladede partikkelenden og man vil få en korthusstruktur. Partikkeloverflater vil også knytte seg til hverandre gjennom den kjemisk bundne vannfilmen som er positivt ladet. Dersom vannet har en høy pH-verdi, vil man øke prosentandelen av leirpartikler som knytter seg med flatsidene til hverandre. Denne alkaliske vannblandingen vil gi mindre krymping og større styrke. (Leake, s.a)

2.2.3.1.3 Krymping:

Reduserer man vanninnholdet ytterligere uten at leira blir hard vil man få en mindre plastisk leir. Det er mindre vann til å skille leirpartiklene ad og «friksjonen» mellom leirpartiklene er blitt større. Denne prosessen foregår naturlig når leira eksponeres for luft med RF under 100% og får tørke. Man vil erfare at leirblandingens volum vil krympe. Ved et visst tidspunkt av denne tørkeprosessen vil partiklene ligge an mot hverandre og krympingen stopper opp, ettersom ytterligere tettpakking av partiklene ikke lenger er mulig. Tørkingen vil foregå ujevnt i en slik leirprøve, ettersom vann bare fordampes langs yttersidene. Sprekker vil kunne forekomme om uttørkingen langs sidene skjer i ubalanse med tørkingen av prøvens kjerne. (Keefe, 2005; arbeidstilsynet, s.a)

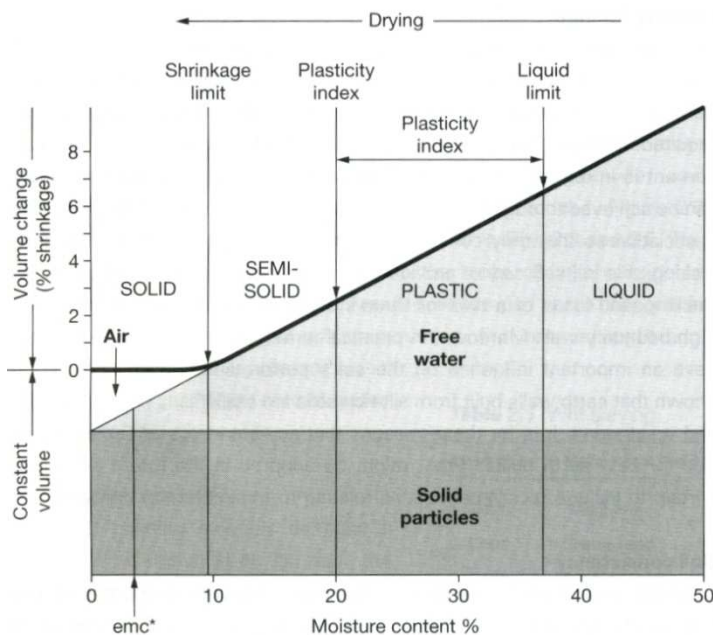
2.2.3.1.4 Porevannet forsvinner:

Idet krympingen av leirprøven stopper opp, har leirpartiklene strukturert seg slik at det enkelte steder har dannet seg hulrom imellom dem. Vann som befinner seg her vil nå tørke ut. Denne uttørkingen av porevannet vil ikke føre til videre krymping av leirprøven (Norton, 1976).

2.2.3.1.5 Videre uttørkning:

Videre uttørkning kan finne sted. Ved temperaturer over 300°C vil vannfilmen rundt leirpartiklene tørke ut. Ved enda høyere temperaturer (over 800°C) fordampes også det krystallinsk bundne vannet i den kjemiske forbindelsen som utgjør et leirpartikkel og man får brent leire; eller keramikk. (Keefe, 2005)

2.2.3.2 Volumendring som funksjon av uttørkning

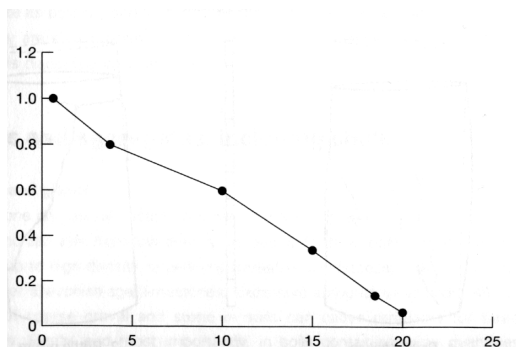


Keefe (2005) forklarer sammenhengen mellom fuktinnhold i leira og leiras volum som lineær. I figuren til venstre markerer "emc*" punktet hvor leiras fuktinnhold er i balanse med uteluftens fuktinnhold. Dette skildrer grafisk det som er beskrevet i kapitlet om leiras tørkeprosess.

Figur 2.13, til venstre: Leiras volumendring som funksjon av uttørkning.

2.2.4 Forventninger til leirens trykkfasthet

Keefe (2005) opererer med mange tall for trykkfasthet. Han har gjort målinger på hus med såkalte "rammed earth walls", hvor veggene utelukkende består av en mørtel som er stampet grundig i et rammeverk før tørkning; altså ingen halmkjerne. Her anslår han en trykkfasthet på mellom 0,8 – 2 N/mm². Han påpeker videre at det vil være store variasjoner avhengig av flere faktorer. Noen av disse er nevnt i dette kapittel og kapittel 3 på side 30.



Figur 2.14: Sammenheng mellom fuktinnhold og trykkfasthet i en fiberforsterket leire med høyt leirinnhold. Y-akse: Trykkfasthet i N/mm² og x-akse indikerer fuktinnhold i prosent. (Figur 2.14 er hentet fra Keefe, 2005).

Generelt er det forventet at tilsetning av fiber vil armere leirpussen og gi den høyere fasthet. Til sammenligning har andre materialer følgende dimensjonerende trykkfasthet:

Tabell 2.1, Trykkfasthet for ulike materialer

Materiale	Fasthetsklasse	Trykkfasthet (N/mm ²)
Betong, etter NS 3473, f_{ck}	B25	3000
	B30	3700
	B35	4500
Gran / furu, etter NS 3470, i fiberretn, F_{c0k}	C18	18
	C24	21
	C30	23
Leirvegger (Keefe, 2005)	"Rammed earth walls"	0,8 - 2

2.3 Skiver – et avstivende konstruksjonselement

2.3.1 Skiver generelt

"skive: Betegnelse på plan konstruksjon, vesentlig beregnet på å kunne oppta toaksiale krefter i sitt eget plan. Forekommer som vegg og tak, samt som steg i I- og H-bjelker" (Gunnarsjaa, 1999)

En skive er å betrakte som et todimensjonalt bygningsselement hvor det foregår en kraftoverføring i planets retning. Det kan være snakk om enkeltelementer eller sammensatte elementer som fungerer i system for å overføre krefter mellom ulike bygningsdeler. Hovedformålet er å inneha en avstivende effekt enten alene eller i tillegg til å være bærende. Statisk sett er skiven å anse som en høy bjelke hvor toppsvill og bunnsvill tjener som trykkflens og strekkflens. Takskiver og veggskiver er eksempler på avstivende bygningsselementer. Definisjonen og teorien rundt skiver tillater ingen krefter mot skivens plan. Således vil man ikke kunne tillate at skiven, under påkjenning i planet, overfører krefter ut av planet ved utknekning eller lignende. Det antas dermed innledningsvis at utknekning ikke kan finne sted.

Horisontale krefter oppstår i et bygg på mange måter. Den dimensjonerende faktoren vil imidlertid i Norge, for vegger over grunn, være den vindpåkjenning som lokale værforhold gir. Under bakkenivå kan det være snakk om å benytte skiver til avstivning mot jordtrykk. I et halmhus hvor leirpussen får være avstivende skive vil stenderverket ta opp vertikalkrefter og leirpussen overføre horisontalkrefter fra vind ned til grunnen.

Det vil alltid være snakk om en form for forankring av skiven. Dette skjer enten i kraft av veggens egen tyngde eller mekanisk innfestning gjennom bunnsvillen. Dersom skiven ikke er tilstrekkelig fastholdt til underlaget og den utsettes for en horisontalkraft, vil man få et oppløft av skivens ene hjørne. Resultatet av dette er en skive som roterer.

2.3.2 Beregningsmetoder

2.3.2.1 Dimensjonering av skiver i trekonstruksjoner i henhold til Euronorm 5

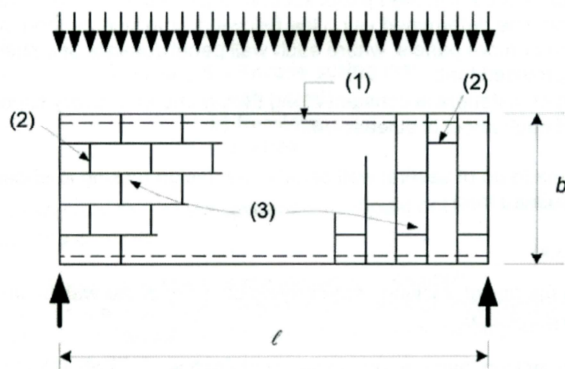
Et halmhus vil ha det likhetstrekk med tradisjonelle lettbindingsverkshus at det har en bærende ramme av tre. Utførelsen av selve bindingsverket vil variere mellom ulike byggetyper, men prinsippet er det samme. Lettbindingsverk er en svært utbredt metode hvor det finnes mye dokumentasjon rundt gode løsninger for avstivning. For halmhus er imidlertid situasjonen en annen og dokumentasjonsmangfoldet mindre. Det kan derfor være interessant å se på noen prinsipper for hvordan avstivning foregår i et lettbindingsverkshus via platekledning.

Skivene er festet til rammeverket ved hjelp av spiker, skruer eller eventuelt lim.

EN 1995-1-1:2004 setter følgende innledende krav for veggskiver:

- 1: Wall diaphragms shall be designed to resist both horizontal and vertical actions imposed on them.
- 2: The wall shall be adequately restrained to avoid overturning and sliding.
- 3: Wall diaphragms deemed to provide resistance to racking shall be stiffened in-plane by board materials, diagonal bracing or moment connections.
- 4: The racking resistance of a wall shall be determined either by test according to EN 594 or by calculations, employing appropriate analytical methods or design models.
- 5: The design of wall diaphragms shall take account of both the material construction and geometric make-up of the wall under consideration.
- 6: The response of wall diaphragms to actions shall be assessed to ensure the construction remains within appropriate serviceability limits.
- 7: For wall diaphragms two alternative simplified methods of calculation are given (...).

Euronormen angir altså to forenklete metoder for utregning av skivestivhet $F_{v,Rd}$. Det forutsettes at platenes forbindelsesmidler fordeles utover skivene etter bestemte mønstre.



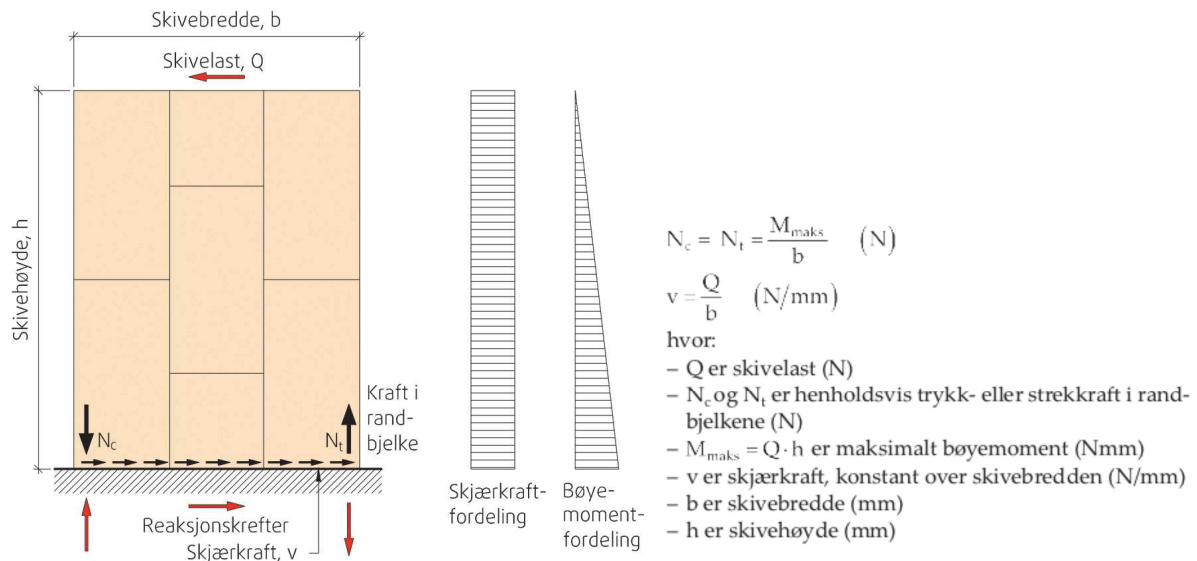
Figur 2.1: Geometrisk krav til skive: $2b < l < 6b$ (EN 1995-1-1:2004)

Skiven trenger også å oppfylle visse geometriske krav for at man skal kunne benytte disse forenklete metodene. Gitt fig. 2.1, skal l befine seg størrelsesmessig mellom $2b$ og $6b$.

Videre skal kantbjelker dimensjoneres for maksimalt opptredende bøyemoment.

En skive anses beregningsmessig som en høy bjelke hvor skiven utgjør steget og topp- og bunnsvill utgjør flensene. Deformasjonen av skiven kan sies å bli påvirket av fire forhold (Bovim, 2010):

- Trykk og strekkflens' bøyedeformasjon.
- Skivens interne skjærdeformasjon
- Deformasjon i sammenføyningene mellom flensene (lasker og lignende).
- Glidning mellom platene som utgjør skiven.



Figur 2.2: Byggforsk detaljblad 520.238 (2011) beskriver hvordan krefter beregnes i en innspent skive.

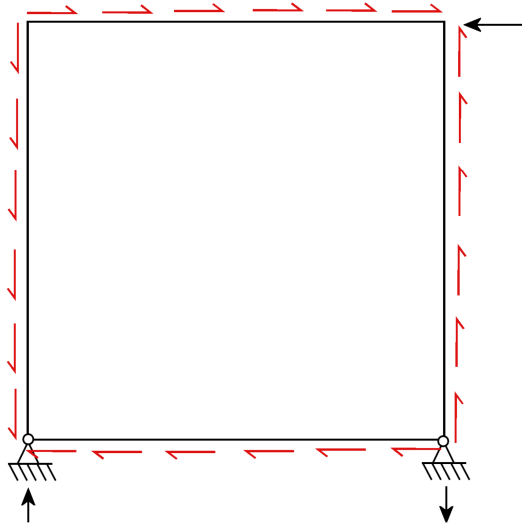
2.3.2.2 Litt om klassiske beregningsmetoder for skiver

For å finne kapasiteten til skiver i et lettbindingsverkshus benyttes forøvrig ellers ofte én av tre av de såkalte klassiske beregningsmetodene: Lineær elastisk metode, plastisk «nedre verdi» metode eller plastisk «øvre verdi». For en detaljert redegjørelse av disse anbefales Carling et. al (1992). I denne teksten vil kun utvalgte prinsipper belyses.

Generelt for de klassiske beregningsmetodene er at man gjør noen forenklinger og forutsetter visse forhold. Dette varierer etter metode, men generelt kan det forutsettes følgende (Carling et. al (1992), Källsner (1984)):

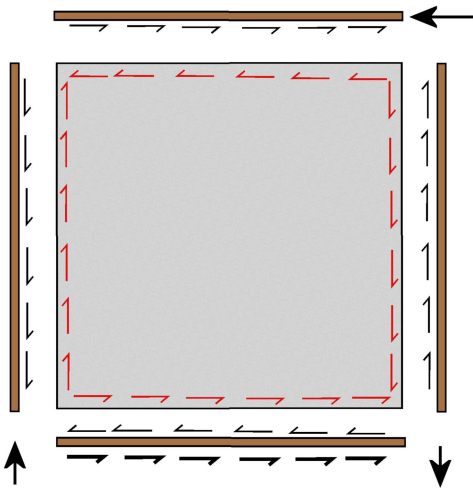
- Små forskyvninger i forhold til veggens bredde og høyde.
- Stenderne er leddet innfestet
- Rammen er bøy- og tøyingsstiv
- Skivene er stive, forhindret fra bukling og støter ikke imot hverandre eller andre konstruksjonselementer
- Lineært plastiske egenskaper for forbinderne.

Ved aktivisering av skiven som avstivende element får man rundt skiven en skjærstrøm. I følgende figurer er den markert med rødt.



I fig. 2.3 vises hvordan en belastende horisontalkraft, innført øverst i høyre hjørne, gjør at skivens fasthet realiserer reaksjonskrefter. Dette arter seg som en skjærstrøm i selve skiven.

Figur 2.3: Krefter som virker på skiven og dens ramme.



Ser man på kreftene i hvert element for seg (fig. 2.4) synliggjøres skivens rolle i veggsystemet. Skiven vil trykkes sammen diagonalt som et resultat av skjærspenninger i skiven. Man får altså trykkspenninger diagonalt ovenifra høyre ned mot venstre hjørne. I motsatt diagonalretning får man strekkspenninger.

Figur 2.4: Krefter fordelt på hvert element. Skiven stiver av konstruksjonen.

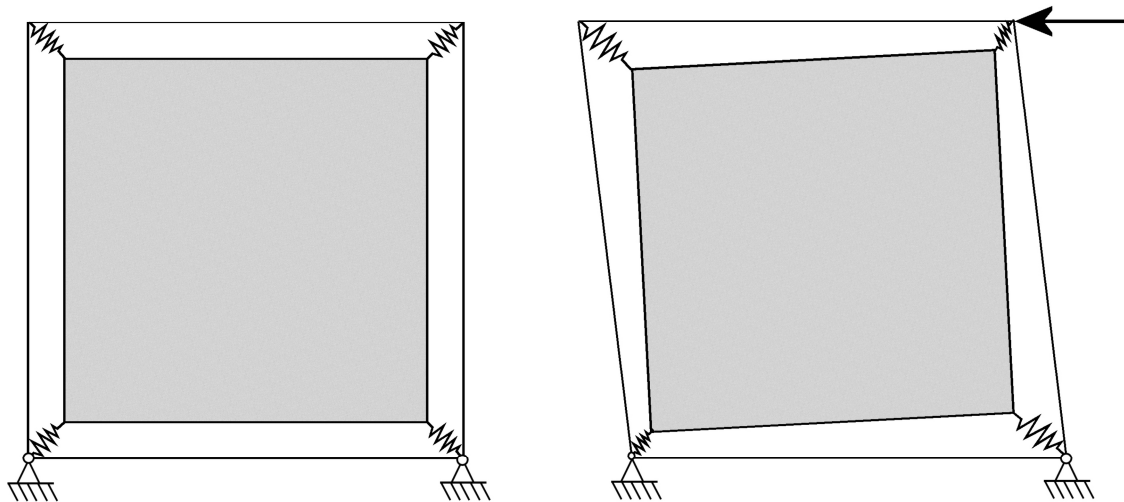
Parametere tilknyttet innfestningen av skiven vil normalt ha mye å si for hvor stor avstivning man vil oppnå. Parametere kan dreie seg om forbindeavstand, -type og -mengde. Skjærfastheten til skiven vil altså ha betydning – sammen med forbindekapasiteten – for skivens kapasitet.

2.3.2.2.1 Lineær elastisk metode

Prinsippet for denne beregningsmetoden er at forbindele antas å være lineært elastiske helt til brudd oppstår. Dette gjør at skivekonstruksjonen vil få en elastisk oppførsel idet den utsettes for en skivebelastning. Man kan se for seg forbindeleinnfestningen som elastiske fjærer som retter opp veggssystemet etter at belastningen har avtatt.

Metoden baseres på følgende antakelser:

- Stenderne i bindingsverket antas å være stive element som har leddet forbindelse med topp- og bunnsvill.
- Skivene er helt stive og forhindre fra bukling. De ligger heller ikke an mot hverandre eller andre bygningsselementer.
- Deformasjonene er relativt små i forhold til skivens størrelse.
- Forbindelele antas å være helt elastiske til brudd, uavhengig av forskyvningens retning.
(Carling et al, 1992)



Figur 2.5: Lineær elastisk metode.

For en treskive festet til en ramme (som vist i figur 2.5) beregner man forbindelele som lineært elastiske helt til brudd. Dette betyr at bruddfastheten til forbindelele bestemmer veggens kapasitet. Den største kraften vil optas i forbindelele lengst unna forbindelele tyngdepunkt. Idet den første forbindelele oppnår bruddlast har vegg sin maksimale kapasitet.

2.3.3 Skiver av leirpuss

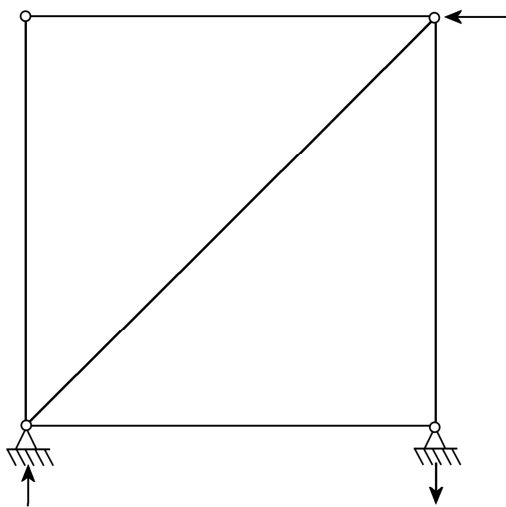
For en skive bestående av leirpuss vil man imidlertid ikke benytte noen form for mekanisk forbinder mellom pussene og rammeverket. De klassiske beregningsmetodene er derfor ikke umiddelbart overførbare.

Riktignok vil det være en heft og en interaksjon mellom halm og leirpuss som kan minne om en kontinuerlig innfestning av leirskiven i hele dens plan. Dette gjør at man i prinsippet kan tenke seg at leireskiven har en skjærfasthet som er utnyttbar og beregnbar gjennom den halm-leire-heft som oppstår. En god beregningsmodell som egner seg til dette, hvor den tar hensyn til en liknende situasjon med heft mellom materialer som leire og halm, har ikke vært å oppdrive.

Man kan eventuelt se for seg leireskiven som et skråstag i et fagverk tar opp trykk. I en slik situasjon overføres trykkrefter fra bindingsverket i hjørnet mellom svill og stender inn i leirpussen. Kraftene vil tas opp i bindingsverket i diagonalt motstående hjørne. Kraftene antas å gå gjennom leirpussen alene eller gjennom veggsystemet som helhet. Hvordan kraftinnføringen vil foregå kan også være av betydning.

Gitt en konstruksjon, slik den er skildret i kapittel 2.1.2, kan det være naturlig å tenke at horisontalkrefter overføres direkte inn i leirpussen fra trestenderne. Dette fordi det ikke foregår noen direkte kontakt mellom stendere og halmen i vegg. Bindingsverket omkranser leirpussen som en omsluttende ramme. Følger man en slik antakelse vil det også være nærliggende å slutte at eventuelle krympesprekker mellom treramme og leirpuss vil være ufordelaktig, ettersom dette åpner for at bindingsverket kan få bevegelse før pussene treer inn som avstiver.

På den annen side kan veggens avstivning være et komplekst samspill mellom flere faktorer. Dette kan være forhold som friksjon mellom halm og leire eller det kan være andre forhold man ikke har fullstendig oversikt over. Kanskje finnes det argumenter som gjør at man bør se for seg at kraftinnføring til skiven skjer i et veggssystem bestående av halm og leire, framfor kun kraftinnføring i leirpussen.



Figur 2.6: Leirskiven er her illustrert som et fagverk med et skråstag.

2.3.4 Skjærstrøm som oppstår i en skive

Ser man på den skivelast som veggskiven utsettes for kan man relativt enkelt beregne den skjærstrøm som forplanter seg i skiven. Innfører man en skivelast «Q» vil denne fordele seg jevnt langs etter den horisontale innspenningssonen med bredde «b» (jvnfør fig. 2.2) som en skjærkraft. Fordeler man «Q/b» får man skjærstrømmen:

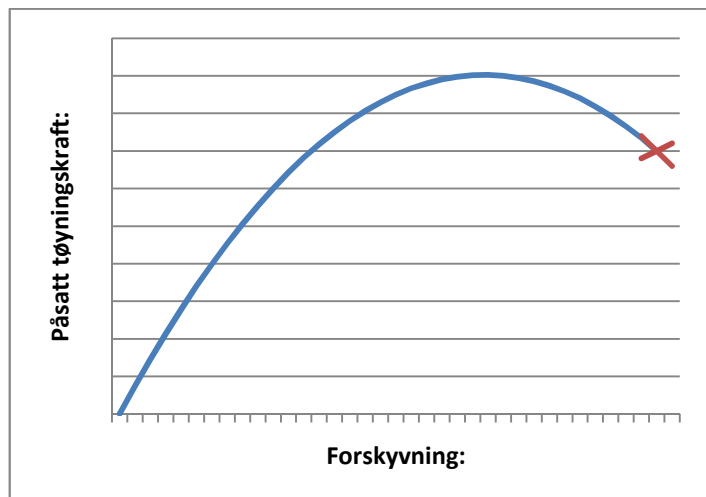
$$V = \frac{Q}{b}$$

Denne vil, såfremt skiven er kontinuerlig opplagret, være konstant over hele skivens opplagg og måles i Newton/løpemeter opplagg.

Under bygging av et moderne lettbindingsverkshus vil man kunne ta høyde for tabell 2.1 sine avstivningsbidrag fra forskjellige skiver. Denne er vist på neste side. Tabellens skiver har oppgitt dimensjonerende skjærkapasitet, gjengitt etter Byggforsks detaljblad 520.238 (2011) (7 første oppføringer) og Nartey (2005):

En arbeidslinje hvor skivens horisontale forskyvning settes opp mot skjærstrøm forventes å ha en normalt utseende arbeidslinje som i figuren til høyre.

Figur 2.7: Forskyvning av skiven i overkant målt opp mot den kraft som må legges på for å oppnå tilsvarende forskyvning.



Tabell 2.1, dimensjonerende skjærkapasitet i utvalgte plater

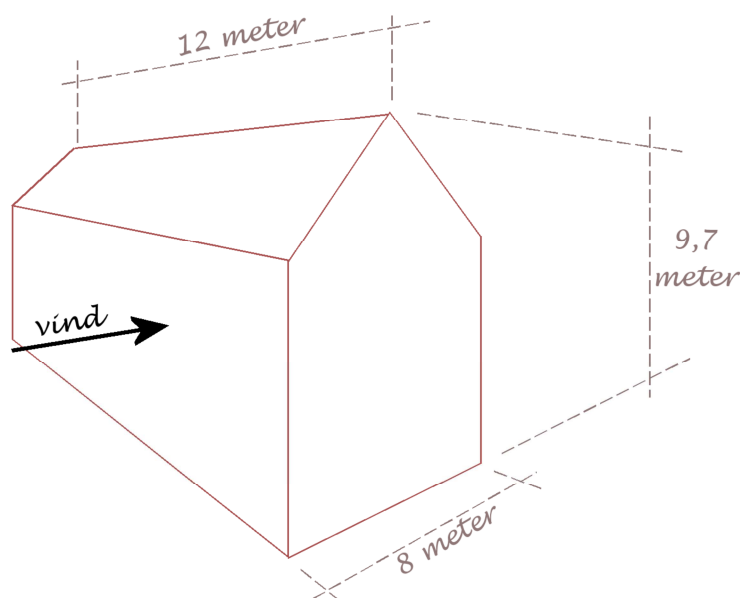
<i>Platetype, Skru-/spikertype Skru-/spikeravstand kant/midt</i>	<i>Tykkelse:</i>	<i>Dimensjonerende skjærkapasitet F_{vd} N/mm</i>
<i>Gipsplater, utvendig skiferstift 2,5-35 100/250 mm</i>	<i>9 mm</i>	<i>3,0</i>
<i>Gipsplater, innvendig gipsplatestift 2,3-35 100/200 mm</i>	<i>13 mm</i>	<i>5,0</i>
<i>Gipsplater, innvendig, gipsplatestift 3,0-38 200/300</i>	<i>13 mm</i>	<i>3,5</i>
<i>Asfaltimpregnerte porøse trefiberplater skiferstift 2,8-45 100/300 mm</i>	<i>12 mm</i>	<i>5,0</i>
<i>Asfaltimpregnerte porøse trefiberplater skiferstift 2,8- 45 150/200mm</i>	<i>12 mm</i>	<i>3,3</i>
<i>Sponplater innvendig platestift 2,3-40 100/200 mm</i>	<i>12 mm</i>	<i>7,0</i>
<i>Panelplater av trefiber platestift 2,3-40 100/200 mm</i>	<i>11 mm</i>	<i>7,0</i>
<i>Finsk kombi-plywood</i>		<i>7,5</i>
<i>Masonite K40 trefiberplater</i>		<i>14,0</i>

2.3.5 Krav til vindavstivning av småhus

I følge Byggforsks detaljblad om «skiver av tre», utføres normalt ikke beregninger på lave bolighus' stabilitet ved horisontal vindbelastning. Dette baserer seg på erfaringsgrunnlag som tilsier at et lag platekledning langs husets yttervegger vil være tilstrekkelig avstivning.

Normalt vil laster kontrolleres for vindlast i kombinasjon med egenlast og snølast.

Vindlastberegninger alene ble gjort på et fiktivt hus på Nesodden, plassert nærme strandlinjen og



målsatt som i venstrestående figur. Beregningsgrunnlaget er i sin helhet vedlagt i vedlegg 9.2.3. Det ga en dimensjonerende vindlast på 42 kN på over hele husets referanseareal, A_{ref} (Byggforsk detaljblad 471.043, 2003); som er husets høyde og bredde projisert langs en plan flate. Per mønevegg kreves det en avstivning tilsvarende 21 kN eller med en skjærstrømskapasitet tilsvarende 2,63 N/mm. Beregninger ligger under vedlegg 9.2.3.

Figur 2.8, til venstre: Fiktivt hus på Nesodden som det gjøres vindlastberegninger på.

2.3.6 Klimaregnskap

Et av halmen og leiras komparative fortrinn som bygningsmaterialer er deres lave CO₂-utslipp forbundet med produksjon (Jacobsen, 1999). Dersom miljøhensyn er begrunnelsen for valg av leire, kan det være interessant å se på produksjon av klimagasser knyttet til andre platematerialer. Følgende er et utdrag fra Selvig (2012) som er utregnet på grunnlag av Statsbyggs klimagasskalkulator:

Tabell 2.2, CO₂-produksjon forbundet med produksjon av ulike plater

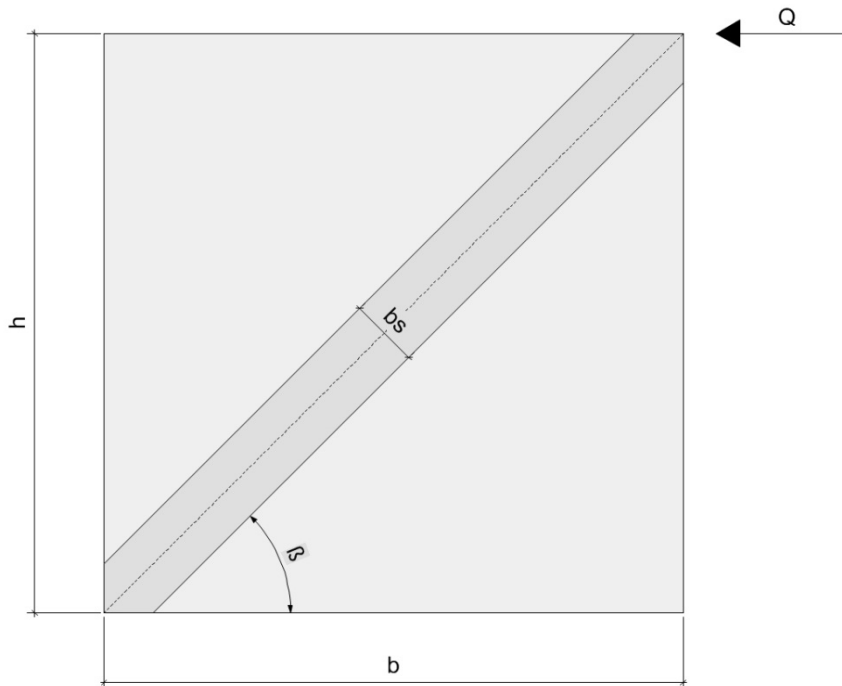
Gipsplater	0,20 kg CO ₂ -ekv. / kg materiale
Kryssfinér	0,40 kg CO ₂ -ekv. / kg materiale
Sponplater	0,87 kg CO ₂ -ekv. / kg materiale
Asfaltplater, porøse trefiberplater	2,00 kg CO ₂ -ekv. / kg materiale
Presset trefiberplate	0,57 kg CO ₂ -ekv. / kg materiale
Leire *	0,05 kg CO ₂ -ekv. / kg materiale

* Basert på følgende:

- 10 liters bensinforbruk, transport Rælingen-Ås.
- 2,3 kg CO₂ / liter bensin (Timeforchange, s.a.)
- Et kvarters graving med gravemaskin med forbruk 30 liter / timen (What is the hourly fuel consumption of a 330 cat excavator, s.a.)
- 10 g CO₂ / kWh (European Environment Agency, 2011)
- Halvanenn times elting i 3 kW maskin
- 600 kg leire per lass

2.3.7 Forventninger til skivens kapasitet basert på fagverksberegninger

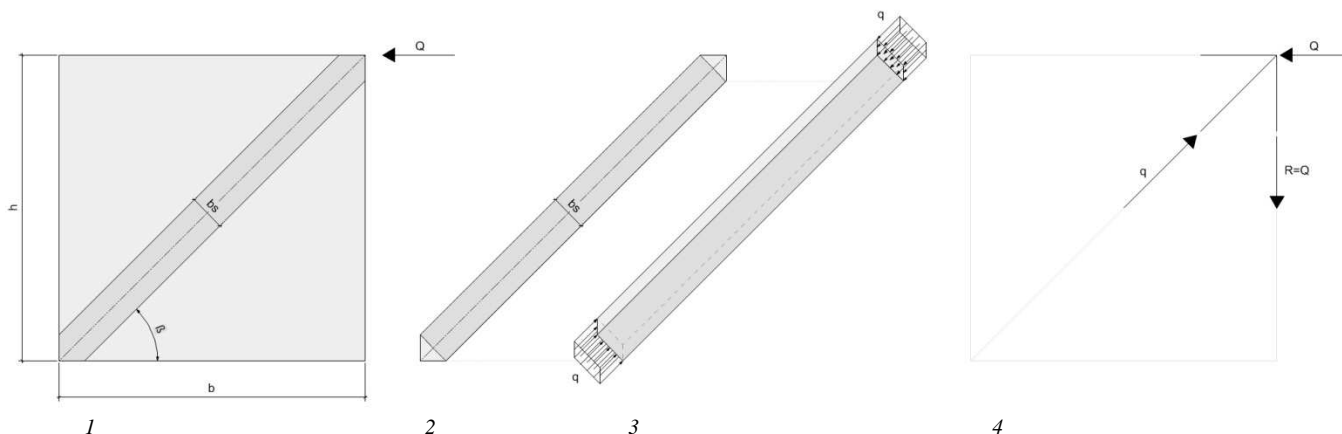
For å oppnå et forhold til styrkekapasiteten av den type veggskive som skulle testes, ble det gjort noen beregninger. Veggskiven ble beregnet som en fagverkskonstruksjon, slik det er beskrevet over, med et 30 cm tykt trykkstag bestående av leirpuss. Bredden på denne sonen av leirpussen som aktiveres som trykkstag ble bestemt på antakelser. De ulike målene som er nødvendig for en slik beregning er illustrert i følgende figurer:



Figur 2.9: Skiven betraktet som en fagverkskonstruksjon.

bs : bredden på den aktive trykksone
 h : skivehøyde
 b : skivebredde
 Q : skivelast
 β : stagets vinkel

Kapasiteten for skivelast (Q_r) beregnes etter gjeldende metoder for å finne krefter i et fagverk. Dette er forsøkt vist i følgende figur. Trykksonen er tegnet isolert fra resten av konstruksjonen i fig. 2.10; 2. I fig. 2.10; 3 vises denne trykksonen i tre dimensjoner og illustrerer at leirpussens tykkelse vil ha betydning. På den vertikale stenderen under påføringspunktet til skivelasten (Q) vil det virke en strekkraft (R) (Figur 2.10; 4).



Figur 2.10: Fra venstre mot høyre:

1; skiven som vist i fig. 2.9. 2; trykksonen. 3; trykksonen i 3D. 4; krefter i fagverkets øvre høyre hjørne.

Beregningen blir som følger og danner grunnlaget for forventet skivekapasitet:

Beregning av teoretisk skivekapasitet for en leirpuss		
Veggskivens skivehøyde (h)	2500	mm
Veggskivens skivebredde (b)	2500	mm
Trykkstagets vinkel (β)	45	°
Trykkstagets bredde (bs)	300	mm
Leirpussens trykkfasthet	2,7	N/mm ²
Leirpussens gjennomsnittlige tykkelse	65	mm
Trykkstagets tverrsnittsareal	19500	mm ²
Trykkstagets kapasitet (Rs)	52,65	kN
Cosinus til β	0,707	
Skivens kapasitanse skivelast (Q_r)	37,2	kN
Skjærkapasitet F_v	14,89	N/mm

Forventet skivekapasitet per leirskive er altså i størrelsesorden mellom 30 – 40 kN.

$Q_r = 37,2$ kN gir en forventet skjærstrøm lik: $\frac{37200}{2500} = 14,88$ N/mm

3 Metode

3.1 Materialer og materialvalg spesielt

3.1.1 Tilmåling

All tilmåling av materialer til mørtelblandinger er basert på volum. Et alternativ ville vært å utføre målingene basert på vekt med kontinuerlig overvåking av fuktighetsinnhold. Begge deler ble vurdert. Volumbasert tilmåling ble valgt fordi dette i hovedsak er praksis på byggeplass. Videre ville en vektbasert tilmåling vært svært tidkrevende for konstruksjonen av en hel vegg med de fasiliteter som var tilgjengelige.

3.1.2 Halmballer - egenproduksjon

Halmballer til fullskalaforsøket ble laget på Jord gård hos bonde Ole Oddvar Grasdalen. Halmballene ble laget spesielt til forsøket. Det ble vurdert å kjøpe halmballer fra gård, men kravet til halmballepressens operative trykk samt øvrige krav til halmen gjorde at dette ikke ble fulgt opp. Halmen skal være hardt presset. (Jensen¹) Man ville ved kjøp risikere å få halm uten å vite hvor hardt den var presset, eller hvordan den var tørket. Høsten 2011 var dessuten svært dårlig med hensyn på korn- og halmproduksjon og gjorde det mye vanskeligere enn normalt å få tak i gode byggehalmballer. Fuktskadede og dårlig pressede halmballer ville vært uønsket i et halmhusbygg. Valget falt derfor på å produsere dem selv.

Halmballene ble presset så hardt som bonden ved Jord Gård, mente utstyret tålte. Referansegruppen (jfr. kap 1.4) anså halmballene som svært egnet. Hardheten på ballene har forøvrig ellers ikke blitt tallfestet. Prosessen med tillaging er beskrevet i nedenstående bildetekster.



Bilde 3.1: For å lage halmballer ble det benyttet traktor med halmballpresse.

Bilde 3.2: Halmballpressen er av merket John Deere, modell 459. Halmen fores inn i mateskruen på bildet. For denne anledningen ble halmen kjørt inn med høygaffel, men en mer normal situasjon vil være at halmpressen selv plukker halmen opp fra jordet etter en skurtresker. Fra mateskruen fanges halmen opp av en klo som mater den inn en trykksjakt hvor halmen stampes og knytes til baller.



Bilde 3.3: Halmen som ble benyttet. Dette var hvete som hadde fått ligge vinteren over til tørk under en bro langs E6. Mus hadde gnagd over strengene som bandt dem sammen. De var derfor ikke brukbare som byggemateriale i den stand de befant seg og skulle uansett presses på nytt.

Bilde 3.4: Her mates halmen ut av trykksjakt. Knyttingen av halmballstrengene går automatisk.



Bilde 3.5: Nypressede halmballer stablet tørt for vær og utsatt for tørkende vind der de venter på å få delta i et fullskalaforsøk. Tørken var god og de ankom UMB i fin forfatning.

3.1.3 Leire – fra Weber Leca

Leiren som er blitt brukt under hele arbeidet ble hentet hos Weber Lecas fabrikk på Rælingen, Akershus. Leiren var lokal. Basert på Weber Lecas undersøkelserⁱⁱ er denne leiren typisk bestående av 45-50% illitt, 18-20% kvarts og 30-35% fuktighetsinnhold.



*Figur 3.1, til venstre: Leiren dampet av jordvarme i det snøklede vinterlandskapet på Rælingen.
Figur 3.2, til høyre: Eltemaskinen på betonglabben hvor eltingen foregikk. All leir ble eltet i halvannen time for å besørge at leira var mest mulig homogen.*

På forhånd før iblanding av tilslag er leira eltet i tvangsblender i halvannen time. Det er vanlig prosedyre på byggeplass å la den eltes i en time innen anvendelseⁱ og man sørger med dette for at leira er mest mulig kvalitetsmessig ensartet. Vann tilsettes under blanding for å gi den ønsket konsistens. Ved å tilføre vann på denne måten unngår man å gjøre det på et senere tidspunkt. Tvangsblenderen som ble benyttet i dette arbeidet eltet ikke fullgodt og det ble derfor valgt å elte leira en halvtime lengre. Etter elting ble leira lagret i vannbad for å hindre uttørking før anvendelse i leirpussblandingen. Rent praktisk ble vannbadet tilgjort ved at leira ble overført i bøtter. Vann ble helt over slik at leira ble dekket. Noe etterpåfylling var nødvendig for å bote på fordampning til inneluft.



Fuktighetsmålinger ble gjort på leira i henhold til tørkeveie-metoden. Prinsippet baserer seg på å måle prøven før og etter tørking. Dette skjedde etter etter at leira allerede var oppbevart 1 måned i vannbad. Vanninnhold, som prosent av fuktig prøve, ble da målt til 31,2%. Leiren ble oppbevart mellom én og tre uker i vannbad før den ble benyttet til kubeforsøkene og pussprøveforsøkene. For fullskalaforsøkene varierte denne tiden fra én til fem uker. Etter samtaler med Jensen ble det ansett som rimelig å anta at leiren ikke hadde endret plastisitet eller fuktighetsinnhold under oppbevaringstiden i vannbad.

Minke (1995) har i sine forsøk påvist en sammenheng mellom intern heft og eltetid. Han finner en idealeltingstid på mellom 10 og 20 minutter med elting i laboratorieblender. For dette prosjektet ble Jensens metode – med timeslang innelting av vann og lagring i vannbad – benyttet, ettersom dette ligger nærest slik det gjøres i praksis.

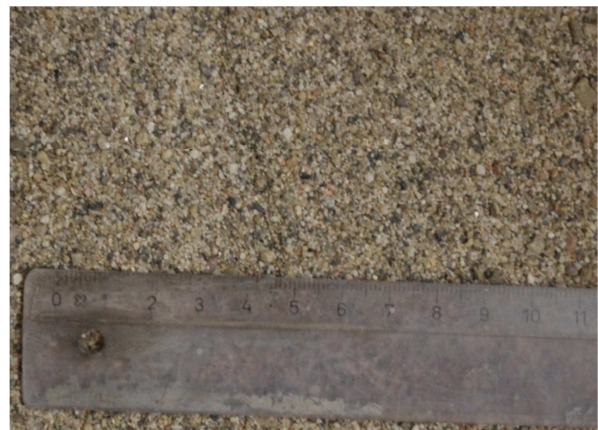
Figur 3.3: Leir i vannbad

3.1.4 Tilslagsmaterialer

Bruken av tilslag varierer mye mellom ulike mørtelmakere og variasjonen kan være stor. Til denne oppgaven valgte man materialer i samråd med referansegruppen fra NJH (jfr. kap. 1.4). Kriteriene for tilslagene var at de skulle være relativt lett tilgjengelige, tidligere anvendt eller ønskelig å anvende og passe inn i halmhusets ønskede miljøprofil. Man kom fram til at de nedenstående tilslag var hensiktsmessig å utføre forsøk med. Måleskalaen på bildene viser cm.

3.1.5 Sand

Det ble benyttet vanlig pussesand. I mangel på utstyr har kornfraksjonen på sanden ikke vært undersøkt. Sanden ble veid før og etter oppvarming i panne. Fuktighetsinnhold som prosent av fuktig prøve ble målt til: 0,34 %.



Figur 3.4: Pussesanden som ble benyttet til forsøkene

3.1.6 Subus

Til forsøkene ble det benyttet to typer subus. Dette var subus med største kornstørrelse på henholdsvis 4 og 8 mm. Blandingen med de største kornene hadde en større spredning av ulike kornstørrelser med en stor andel iblandet sand. Blandingen med 4 mm subus var i større grad en miks av likeartede korn. Fordelingen av kornstørrelser har ikke vært undersøkt.



Figur 3.5: Til venstre ses subusblanding med kornstørrelse 4 mm som største korn. Til høyre ses subusblanding med 8 mm som største kornstørrelse.

3.1.7 Lecakuler

To typer Lecakuler ble benyttet. De største var på rundt 4 mm og de minste på rundt 2 mm.



Figur 3.6: Til venstre ses små lecakuler og til høyre ses store lecakuler. Størrelsene var henholdsvis ca 2 og 4 millimeter.

3.1.8 Fiber innhentet til forsøkene

Ulike fiber ble benyttet. For kubeprovne ble det gjort to forsøk for hver fibertype; hvor den siste omgangen fikk dobbelt så mye fiber iblandet som i den første.

3.1.8.1.1 Halm

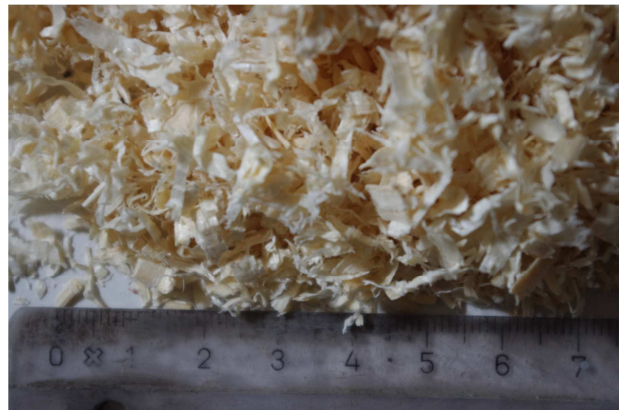
Det ble benyttet knust halm. Dette er halm som er mekanisk banket gjennom en sikt for å dele stråene og kutte dem i biter av en bestemt størrelse. Kornsort er ukjent.



Figur 3.7: Knust halm.

3.1.8.1.2 Kutterspon

Kutterspon av merket "fiberfunny's" fra Felleskjøpet ble brukt. Produsert i Nederland og antas å være bartre.



Figur 3.8: Kutterspon fra Holland.

3.1.8.1.3 Hestehalehår

Hår fra hestehaler kuttet opp for hånd i varierende lengder på 0,5-3 cm for tilsetning i leiren. I samtaler med NJH framgikk det at det var stor nysgjerrighet rundt – og høye forventninger til – hestehårets virkning som armerende fiber i pussen.



Figur 3.9: Hestehalehåret ble kuttet opp før anvendelse

3.1.8.1.4 Cellulose

Her ble det benyttet cellulosefiber fra leverandøren Isofiber. Den består av 90% cellulose og 10% vektmessig blanding av borsyre og boraks (Isofiber isolasjon, 2012). Det ble antatt at cellulosefiber skulle armere bedre og ha en større positiv betydning for leirens styrke enn kutterspon. Dette bunnet i at cellulosefiberet består av mindre adskilte og oppløselige fibre som lettere ville blande seg ut og fordele seg jevnere enn, til sammenligning; relativt store kuttersponfiber.



Figur 3.10: Cellulosefiber av merket "Isofiber".

3.2 Pussprøveforsøk

Etter samtaler med Jensen¹ ble det valgt å gjøre kvalitative forsøk av ulike pussblandinger før trykktesting fant sted. Dette er vanlig å gjøre idet et halmhusprosjekt igangsettes for å finne fram til den mørtel som egner seg best til puss. Ved at flere ulike mørtelblandinger tørkes i en bestemt form får man hurtig og enkelt et overblikk over de ulike tilslagene innvirkning på leira. Dette var ønskelig ettersom det ikke fantes noe erfaringsgrunnlag fra den leir som ble hentet inn til forsøkene.

Jensen har utviklet en egen prosedyre for kvalitetskontroll av leirpussens egenskaper med hensyn på: Svinn/krymp, oppsprekning, bruddstyrke, slitasjestyrke og erosjon. Denne ligger under vedlegg 9.1.1. Mørtelblandingens nomenklatur er her benyttet på formen: "1:2:3, leire:sand:fiber". Tallene indikerer volummessig (jfr kap. 3.1.1) andel som finnes i blandingen og leir skal alltid stå først med andel tilsvarende 1.

Pussprøvene ble gjort kontinuerlig og testet etter 3-5 tørkedager. Prøvene lot til å tørke relativt hurtig under konstant romtemperatur på 20°C og samtlige prøver framsto som tørket under testing. Fuktighetskontroller ble ikke utført, ettersom det var liten grunn til å anta at prøvene hadde høyere fuktighetsinnhold enn i en normal brukssituasjon.

Det ble ikke foretatt noen gjentak. Hver pussprøve fantes kun i ett eksemplar.

3.2.1 Framgangsmåte

Et prøvebrett består av fem ruter på 126 x 126 x 5 mm. Hver rute fyltes med hver sin mørtel bestående av ulike delmengder av ulike tilslag. Prøverutene ble støpt ved hjelp av en murerkje og ble satt til tørking inntil de var tørre.



Figur 3.11: Med enkle hjelpemidler ble mørtelen blandet og prøvene satt. Håndmikser, murerkje og desilitermåle. Lengst til høyre: Pussprøveform.

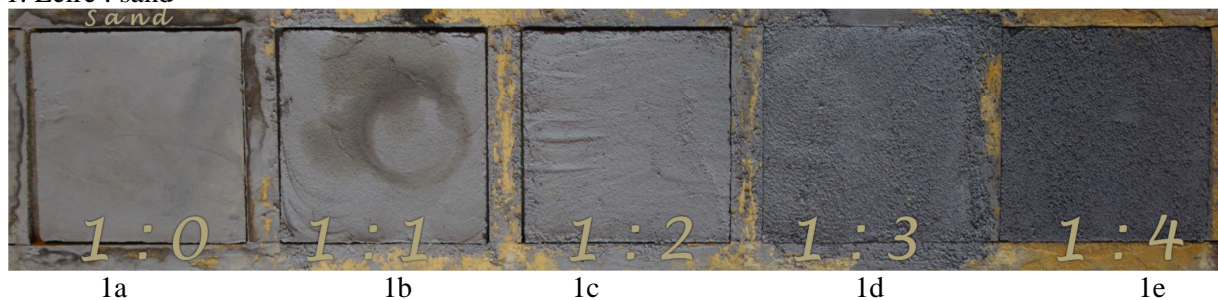
Prøvene ble vurdert på følgende måte, i henhold til Jensens metode (vedlegg 9.1.1):

- | | |
|---------------|---|
| Svinn: | Testes ved å måle (i mm) gjennomsnittlig mellomrom mellom pussprøve og ramme. For å finne snittet ble det foretatt målinger i fire tverretninger. |
| Oppsprekning: | Vurderes skjønsmessig på en skala fra 1-5 hvor 5 er dårligst. |

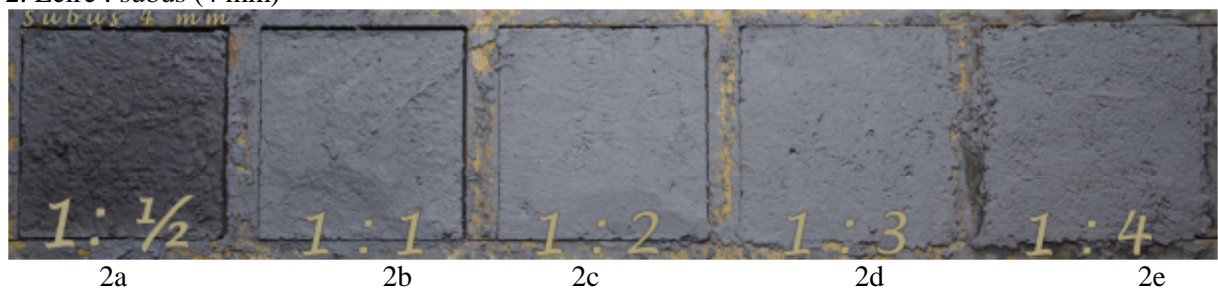
- Bruddstyrke:** Vurderes skjønnsmessig ved at to av prøvens hjørner brekkes av manuelt og bruddstyrken vurderes på en skala fra 1-5 hvor 5 er dårligst. Prøveeksemplaret kan evt. sammenlignes med pussprøven bestående av 100% leire ved å brekke et hjørne fra hver av de to prøvene for referansegrunnlag.
- Slitasje:** Vurderes skjønnsmessig på en skala 1-5 hvor 5 er dårligst. Benytter tommelen til å skrubbe 15 strøk på prøvens overflate på samme sted for deretter å se på slitasje. Slitasje viser seg ved den mengde material man klarer å skrubbe av – og blir liggende på prøven som støv – og ved å studere strukturen i det område man har skrubbet.
- Erosjon:** Vurderes skjønnsmessig på en skala 1-5 hvor 5 er dårligst. Et hjørne av prøven legges under en svak stråle av vann rennende fra 20 centimeters høyde i ti sekunder. Erosjon vurderes etter hvor stor utvasking som finner sted. Noen prøver viste seg å bli vasket helt bort, og det ble derfor ikke mulig å tallfeste dem.

3.2.2 De ulike prøvene som ble vurdert:

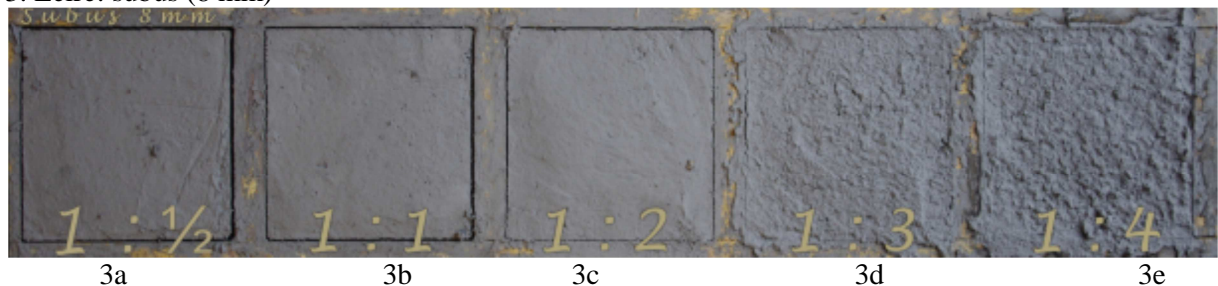
1. Leire : sand



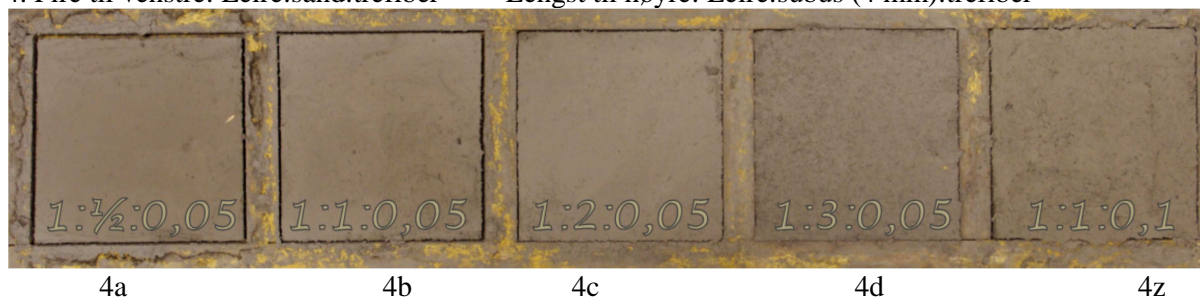
2. Leire : subus (4 mm)



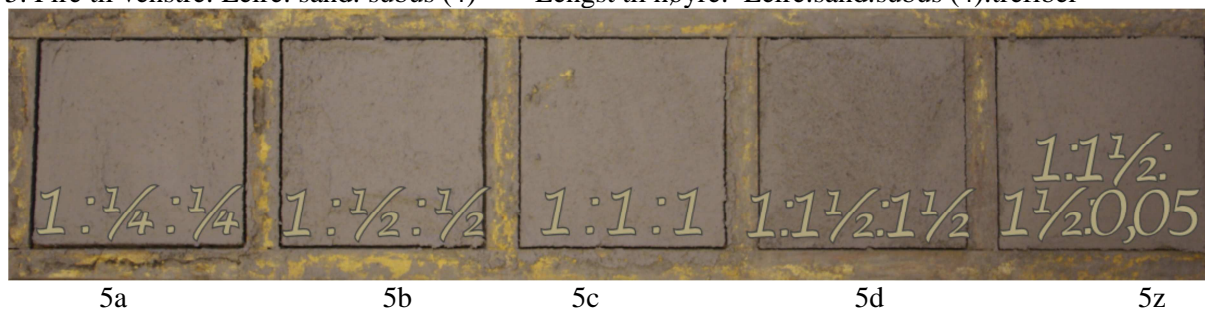
3. Leire: subus (8 mm)



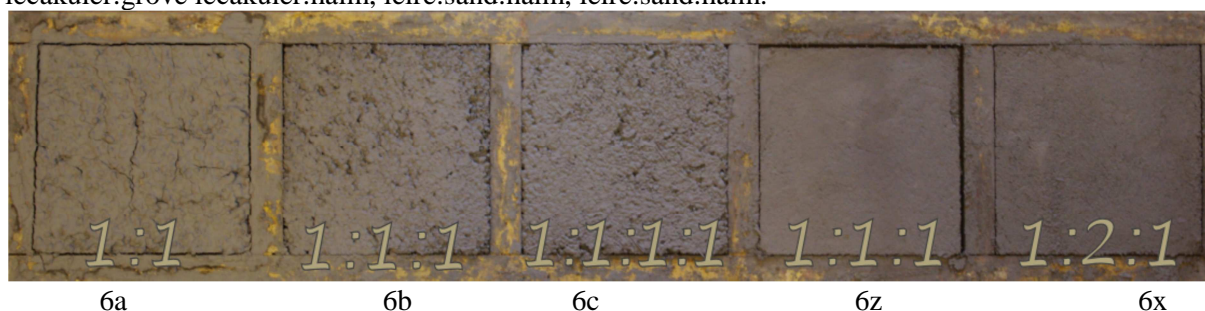
4. Fire til venstre: Leire:sand:trefiber Lengst til høyre: Leire:subus (4 mm):trefiber



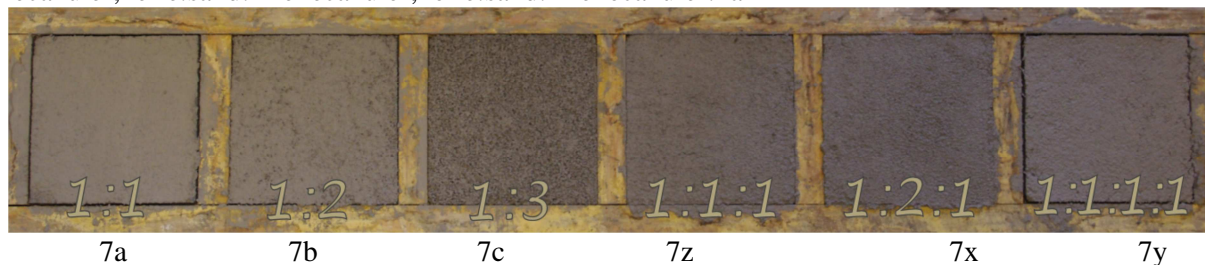
5. Fire til venstre: Leire: sand: subus (4) Lengst til høyre: Leire:sand:subus (4):trefiber



6. Fra venstre mot høyre: Leire:grove lecakuler, leire:fine lecakuler:grove lecakuler, leire:fine lecakuler:grove lecakuler:halm, leire:sand:halm, leire:sand:halm.



7. Fra venstre mot høyre: Leire:fine lecakuler, leire:fine lecakuler, leire:fine lecakuler, leire:sand:fine lecakuler, leire:sand:fine lecakuler, leire:sand:fine lecakuler:halm



3.3 Fasthetsforsøk

Opprinnelig var det tenkt å teste leirpussens fasthetsegenskaper med hensyn på skjær og trykk. Skjærttestene skulle foregå ved trykkpåkjenning av såkalte støvelprøver og trykktestene ved trykkpåkjenning av støpte kuber.

Det ble antatt at det ville være en sterk sammenheng mellom skjær- samt trykkapasitet på små feilfrie prøver og kapasiteten for en skive gjennom skivevirkning. Det var derfor interessant å studere leirpussens fasthetsegenskaper i liten skala for å kunne overføre kunnskapen til en veggskive av leire.

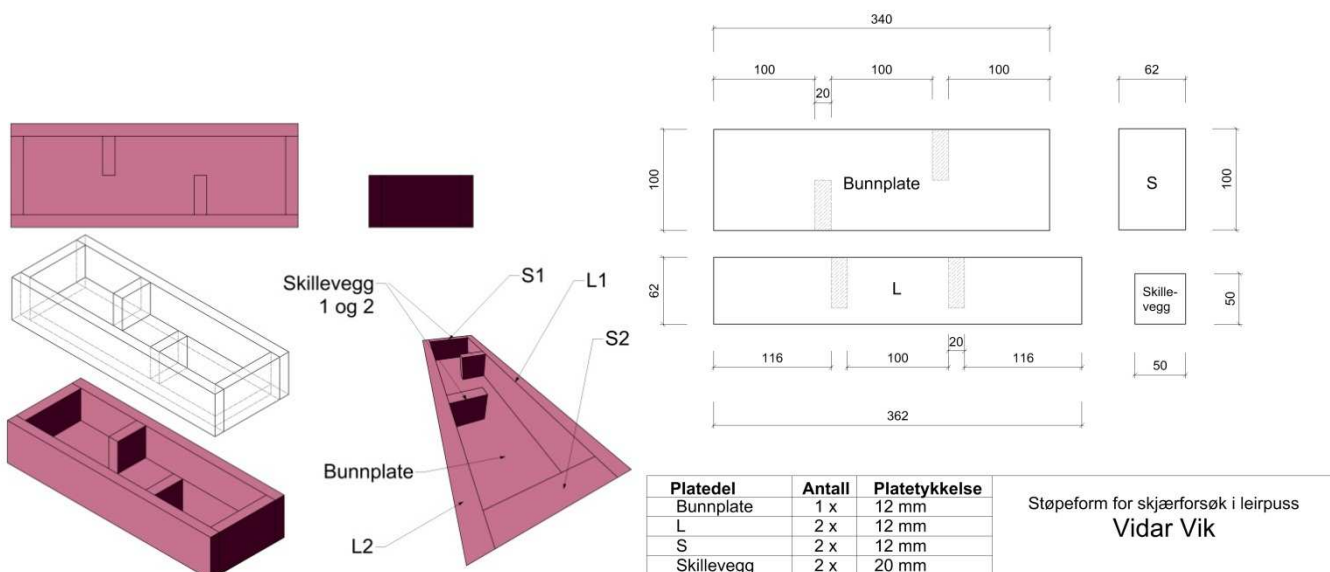
Trykktesting av leire har tidligere vært utført ved universitetet i Kassel (Minke, 1995). Andre henvisninger til lignende forsøk finnes i TLS' (2012) databaser. Det var imidlertid ønskelig å gjøre trykktester ved UMB for å finne fram til den pussen som var best egnet til forsøket basert på de spesifikke materialer vi hadde tilgjengelige. Fasthetsegenskaper for puss av ulike typer leir og fiber kan variere med store sprik (Keefe, 2005). Tallfesting av leirens styrkeegenskaper ble ansett som viktig også for å styrke forsøkets reproduksjonspotensiale.

3.3.1 Støvelprøver

Støvelprøver er S-formede prøver som blir satt i egne prøveformer. Dette er en prøvemethode som i hovedsak benyttes ved skjærttesting av betong. Trykkpåkjenning blir påført ovenifra og vil gi et skjærbrudd der «støvlene møtes» (se fig.3.12).



Figur 3.12: Støvelprøve. Man ser for seg en sammensetning av to støvler hvor skjærsonen vil gå der støvlene møtes (markert rødt).



Figur 3.13: Målsetting av støvelprøvene og former til støvelprøver.

Prøveformer ble konstruert av plastisert forskalingsflak og 8 prøver ble satt. Disse ble målsatt som i figur 3.13. Ferdige støper er vist i figur 3.14. Rapporter fra disse forsøkene ligger under vedlegg 9.1.2.

Det viste seg å være vanskelig å få til et skjærbrudd slik som ønsket med de proporsjoner støpen hadde. Det oppstod brudd som følge av momentkrefter på de to steder hvor prøvestykket var smalest. Dette tilførte prosjektet lite relevant informasjon. I stedet for å endre prøveformene og lage nye pussprøver for ny skjærttesting ble resterende tid vurdert så knapp at følgende antakelse ble gjort: Den styrkemessige sammenhengen mellom ulike mørtelblandinger med hensyn på skjær ble antatt å være lik den styrkemessige sammenhengen mellom ulike mørtelblandinger med hensyn på trykk. Dette ga rom for å fortsette med kubepøver uten å ha fullført støvelprøvene.

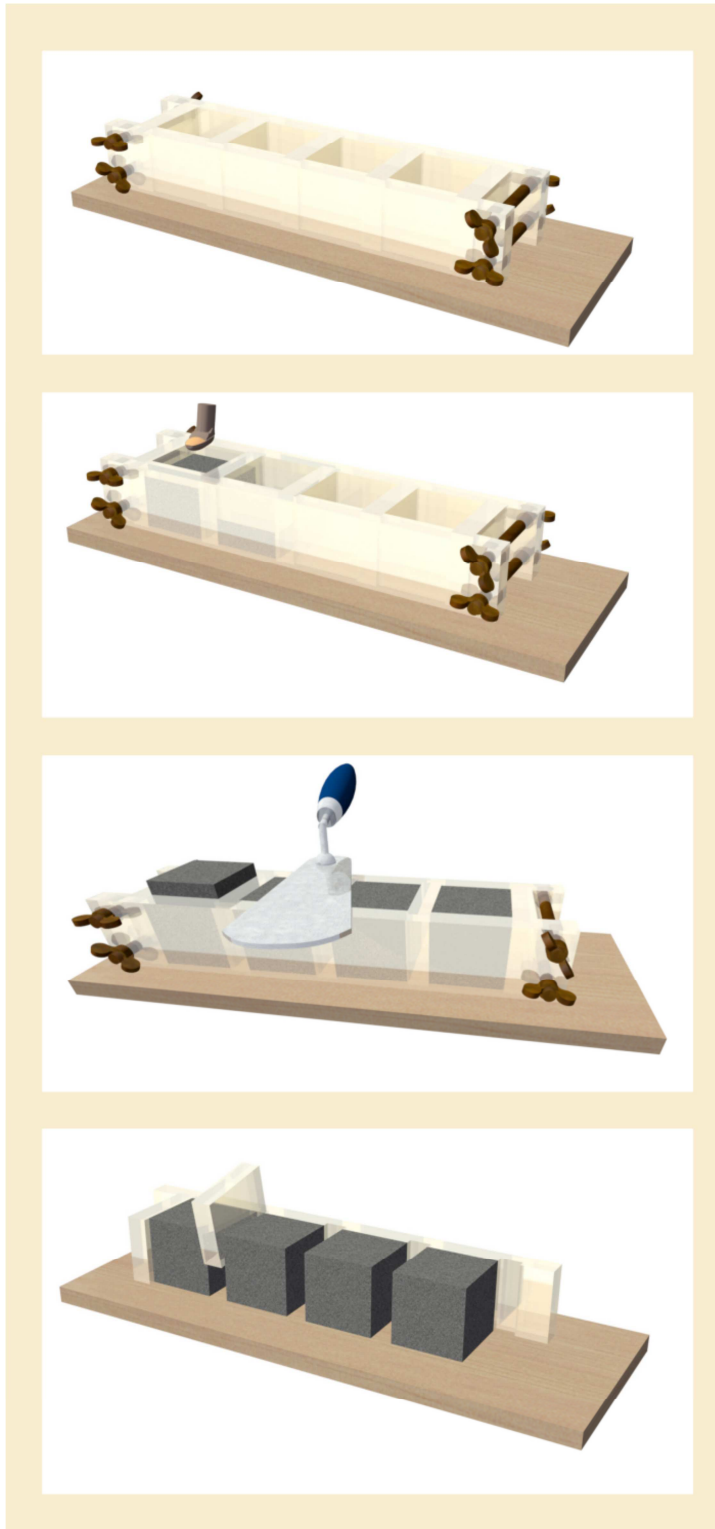


Figur 3.14: Støvelprøver av leire.

3.3.2 Kubeprøver

Kubeprøver er tørkede små kubisk formede prøver av leirpuss som utsettes for trykkpåkjenning. Basert på erfaringer fra innledende forsøk, støvelprøveforsøk og teori fra betongprøvesetting ble en prosedyre for å sette kubeprøver utviklet. Denne støpemetoden viste seg å gi formfaste prøver, jevn og hurtig uttørkning, lite oppsprekning og prøvene slapp formene lett.

3.3.2.1 Støpemetode



Kubeprøvene ble gjort i dimensjonene 5 x 5 x 5 cm. De ble satt i former av pleksiglass som hver rommet fire prøver. Prøveformene ble på forhånd smurt med motorolje på pleksiglassets innside for å unngå heft mellom leire og pleksiglass. Underlaget var voksede forskalingsflak.

Det ble tilstrebet å gjøre mørtelen tørrest mulig. Dette ble ansett som svært viktig. En tørr mørtel ville gi mindre svinn, redusere faren for at prøven fløt ut etter fjerning av formens vegger og var lettere å stampe.

Etter endt elting ble formene delvis fylt med mørtel. Mørtelen ble stampet ned i formene under trykket fra en tommel. Deretter ble formene fylt til randen hvorpå en ny runde med stamping fulgte. Overflaten ble planert med en murerskje. For å gi prøveoverflatenes overkant en fin struktur ble murerskjeen nøysomt fuktet forut for det siste strøket.

Mens mørtelen ennå befant seg i våt tilstand ble formene varsomt demontert og prøvene ble satt til tørking i temperert rom (20°C) i en uke. Etter en uke ble prøvene testet.

Figur 3.15: Støping av kubeprøver

3.3.2.2 Prøveserier av ulike leirpussblandinger

For hver mørtelvariasjon ble det gjort en serie bestående av fire prøver. Prøvekvaliteten ble vurdert på grunnlag av et førsteinntrykk hvor prøvens struktur ble iaktatt. Ikke alle tilslag egnet seg like godt for å få til en perfekt prøve med hensyn på form og struktur. De store lecakulene viste seg for eksempel å være vanskelig å stampe godt ut i formen slik at leiren fylte hulrommene mellom kulene. Under er samtlige kubep prøver presentert med bilde, prøveantall og resept. Karakteristika er kjapt kommentert. Tekst står før hvert bilde.

1. **Fine prøver. 1:2 - leire:sand. 12 prøver.**

Denne mørtelblandingen ble valgt som grunnlag for videre variasjoner i leireblandingen. For å undersøke om andre mørtelvariasjoner er signifikant forskjellig fra denne; altså om det har noe innvirkning med iblanding av fiber et cetera, ble det her satt totalt tolv kubep prøver. Valg av denne mørtelblanding som grunnlag ble basert på kvalitative pussprøver og det ble da valgt det blandingsforhold som tilsynelatende egnet seg best til puss. Svært god prøve kvalitet.



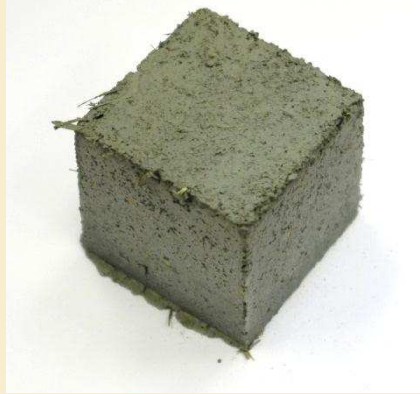
2. **Porøse prøver. 1:2 - leire:sand. 4 prøver.**

Her undersøkes stampingsens effekt på bruddstyrken. Samme blanding som over, men mørtelen ble stampet noe hurtigere, lettere og mer lemfeldig ned i støpeformen. Som bildet viser gir dette seg utslag i avrundede hjørner og klare skiller mellom hver påfylling av mørtel. Leirblandingen har i liten grad utfylt ujevnheter og hulrom har oppstått. Tiltent dårlig prøve kvalitet.



3. **Lite halm. 1:2:0,43 – leire:sand:halm. 4 prøver.**

Egenskapene til halm som armering testes. Svært god prøve kvalitet.



4. **Mye halm. 1:2:0,86 – leire:sand:halm. 4 prøver.**

Egenskapene til en stor andel halm som armerende fiber undersøkes. Svært god prøve kvalitet.



5. **Trefiber. 1:2:0,43 – leire:sand:trefiber. 4 prøver.**

Innvirkningen av trefiber som tilslag undersøkes. Svært god prøve kvalitet.



6. **Mye trefiber. 1:2:0,86 – leire:sand:trefiber. 4 prøver.**

Innvirkningen av mye trefiber som tilslag undersøkes. Svært god prøve kvalitet.



7. **Hestehår. 1:2:0,21 – leire:sand:hestehålehair. 4 prøver.**

Hestehålehair's effect on the compressive strength is examined. Individual hairs protruded and exceeded the ideal cube shape. The distribution of the horse hair lengths was evenly distributed in the space 0,5 – 3 cm. Therefore, it was not evaluated to consider the quality as reduced: Very good quality.

Because cut horse hair has a higher density than for example straw and wood fiber, the specimens got a lower volume percentage of horse hair compared to straw and wood fiber.



8. **Hestehår. 1:2:0,43 – leire:sand:hestehalehår. 4 prøver.**

Hestehalehårs effekt på bruddfastheten betraktes. Svært god prøve kvalitet.



9. **Isofiber. 1:2:0,43 – leire:sand:isofiber. 4 prøver.**

Isofiberets evne til å forsterke prøvematerialet granskes. Mørke sjatteringer langs kantsidene og veksten av krystaller på prøvens overflate vitner om at det har foregått en kjemisk prosess mellom leiren og isofiberen. Svært god prøve kvalitet.



10. **Mye isofiber. 1:2:0,86 – leire:sand:isofiber. 4 prøver.**

Isofiberets evne til å forsterke prøvematerialet granskes. Mørke sjatteringer langs kantsidene og vekst av krystaller også her. Svært god prøve kvalitet.



11. **Mye sand. 1:3 – leire:sand. 4 prøver.**

Innvirkningen av økte mengder sandtilslag studeres. Prøve kvaliteten ble vurdert som noe ring. De viste lagdelingen mellom hver mørtelpåfylling med små hulrom. Dette er noe som kan tyde på at prøvene har fått dårlig stamping. Middels god prøve kvalitet.



12. Stor subus og leir. 1:0:2 – leire:subus 8mm. 4 prøver

Sand byttes ut med tilslag som har større spredning i kornstørrelser. God prøve kvalitet.



13. Liten subus og leir. 1:0:1 – leire:subus 4mm. 4 prøver

Sand byttes ut med tilslag som har større spredning i kornstørrelser. God prøve kvalitet.



14. Stor subus og leir med sand. 1:1:1 – leire:subus 8mm. 4 prøver

Sand byttes ut med tilslag som gir middels spredning i kornstørrelser. God prøve kvalitet.



15. Liten subus og leir med sand. 1:1:1 – leire:subus 4mm. 4 prøver.

Sand byttes ut med tilslag som gir middels spredning i kornstørrelser. Middels prøve kvalitet.



16. Liten perlite. 1:1:1 – leire:sand:lecakuler, små. 4 prøver.

Lecakulers innvirkning. To av disse prøvene var dårlig stampet. Dårlig prøve kvalitet.



17. Stor perlite. 1:1:1 – leire:sand:lecakuler, store. 4 prøver.

Store lecakulers innvirkning. Generelt dårlig prøve kvalitet med store tørkesprekker.



3.3.2.3 Utførte målinger

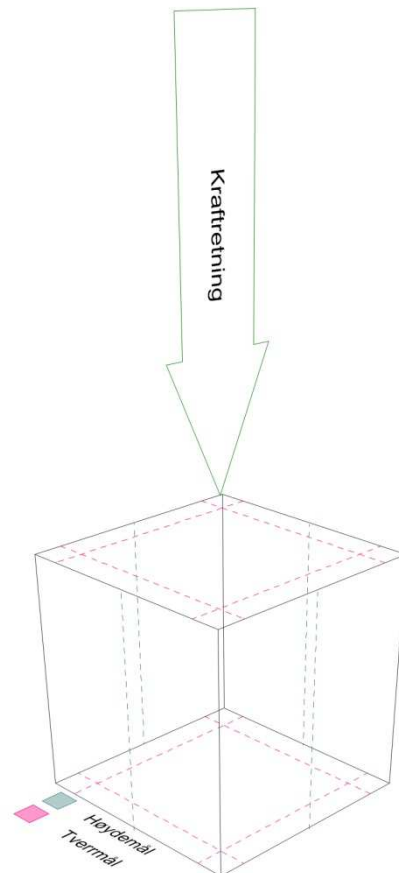
3.3.2.3.1 Form

Basert på NS-EN 12390-3:2009 ble leireprøvene målt to ganger langs hver akse vinkelrett på trykkretningen på hver trykkflate. Snittet av disse 8 målene ble brukt som mål for å regne ut gjennomsnittlig areal av trykkflaten (I NS-EN 12390-3:2009 blir dette kalt A_c). Den bruddfastheten som prøven oppnådde ble delt på dette arealet for å finne trykkfastheten (N/mm).

Gjennomsnittlig prøvehøyde ble også registrert. Denne er basert på fire høydemål; én på hver side.

Til dette ble det benyttet digitalt skyvelær med 0,03 mm nøyaktighet.

Figur 3.16: Stiplede linjer markerer steder hvor størrelsesmålinger ble utført. Grønt; høydemål. Rødt; Tverrmål. Totalt 8 tverrmål og 4 høydemål.



3.3.2.3.2 Fuktighetsinnhold

Leirprøven ble målt i fuktig og tørr tilstand. Vekten av det fordampede vannet ble uttrykt som prosent av den fuktige prøvens vekt. Luftfuktighet i rommet ble målt under prøving.

3.3.2.3.3 Trykktesting

Til trykktestingen ble det benyttet et hydraulisk testapparat produsert av Otto Wolpert Werke i 1963. Denne mekaniske testingen foregikk ved at det ble påført trykk i sakte tempo til brudd. Maksimal trykkpåføring ble avlest som bruddlast. Prøvene ble trykkbelastet loddrett i forhold til støpeformens retning. På figur 3.17 ses komplett oppstilling av maskinen. Lengst til venstre er sensorenhet med ulike kalibreringsmuligheter. Til høyre ses selve trykkpåføringsenheten.

En grafe skrives ut med prøvenes arbeidslinje; til høyre for urskiven. For anledningen er en leirkube innlagt under trykkstempelet i bildet (figur 3.17).

Det ble antatt at dersom det ble gjort målinger i dette forsøket med lavere trykkfasthet enn $0,8 \text{ N/mm}^2$ ville det bli vanskelig å fullføre fullskalaforsøket. Dette fordi veggpussen ville for svak til å fungere som en avstivende skive. Resultater presenteres i kapittel 4.2 på side 71.



Figur 3.17: Til trykktestingen ble en hydraulisk testmaskin benyttet.



Figur 3.18: Otto Wolpert maskinen i detalj. Fra venstre mot høyre: Kontrollhjul. Trykkstempel over leirkube. Grafeutskrift per penn og papir.

3.4 Skiveforsøk

3.4.1 Småskalaforsøk

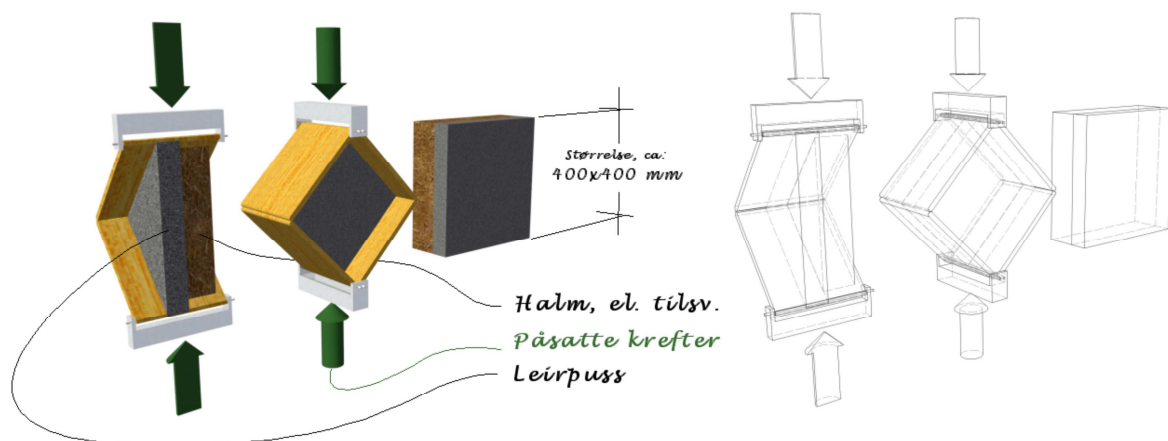
Småskala skiveforsøk ble bare vurdert teoretisk. Ulike metoder ble for å få testet skivevirkningen i ulike størrelsesformater ble diskutert. Forsøk i liten skala med mange gjennomførte målinger kunne brukes i sammenheng med et lite antall fullskalaforsøk.

Utfordringer ved småskalaforsøkene knyttet seg til spørsmål rundt materialenes egenskaper:

- I hvor stor grad ville heft mellom leire og halm ha innvirkning på leirens egenskaper som skive?
- Kunne man utføre forsøk på pussene alene, eller ville man møte på bukklingsproblematikk, med krefter ut av planet, uten halmballenens avstivende effekt?
- Hvordan beskriver man heft mellom tteramme og leire, og hvordan påvirkes denne av leiras krymping?

3.4.1.1 Småskala skiveforsøk 1

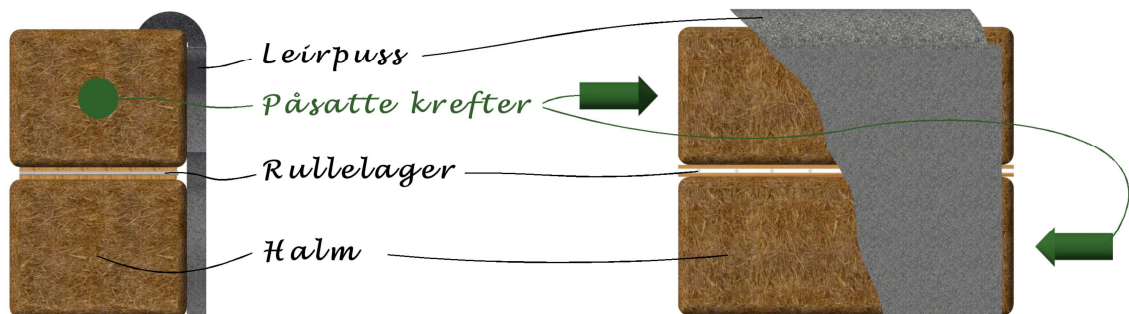
En kvadratisk ramme av tre, som er leddet i rammens hjørner, påføres en last i diagonal retning. Et heftemateriale av halm, rockwool eller tilsvarende forhindrer utknekkning av skiven. Heftematerialet bidrar også til til å skildre sammenhengen mellom heft og leirskivens styrke. Den kvadratiske skiven ble tenkt utført i størrelse 400 x 400 mm.



Figur 3.19: Skisse til småskala skiveforsøk 1.

3.4.1.2 Småskala skiveforsøk 2

To halmballer plasseres over hverandre adskilt av et rullelager. Kraftinnføringen skjer direkte i halmballene med to motsatt rettede krefter. Dette ville skildre en kombinasjon av skjærstyrke og skivevirkning. Heftvirkningen ble antatt å bli godt skildret.



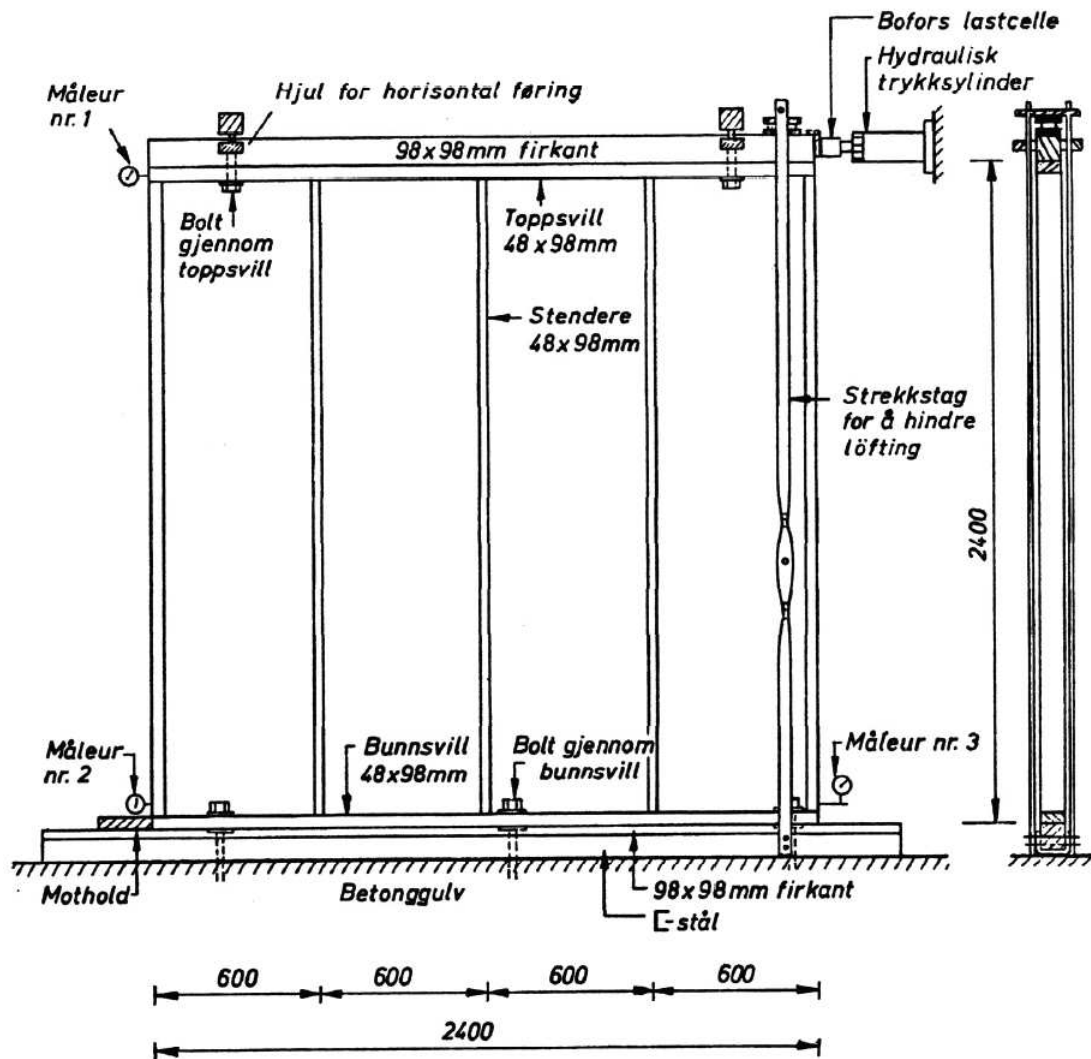
Figur 3.20: Skisse til skiveforsøk 2.

3.4.2 Fullskalaforsøk

Ett fullskalaforsøk på skivevirkning ble utført i forbindelse med denne oppgaven. For å utføre fullskalaforsøk ble en testjigg tegnet og konstruert ved UMB til formålet. Arbeidet med konstruksjonen av jigggen ble utført av det tekniske verkstedet ved IMT.

3.4.2.1 Testjiggens konstruksjon

Prinsippet for testjiggens konstruksjon baserte seg på ASTMs prøvemethode nr E-72-66 som også benyttes i prosjekter i regi av SINTEF (Byggforsk Prosjektrapport 2, 2007). Belastningen foregår her ved hjelp av en hydraulisk sylinder i ett av veggens øvre hjørner. Veggen konstrueres i en fleksibel ramme som forhindrer oppløft. I ASTMs blad er dette illustrert slik:



Figur 3.21: Prinsippskisse for testing av skivevirkning i en trevegg. Hentet fra Byggforsk Prosjektrapport 2 (2007).

Rammen i dette prosjektet skiller seg noe fra figuren. Imidlertid er prinsippet i hovedsak det samme.

3.4.2.1.1 Konstruksjonsdetaljer

Testjiggen er, enkelt forklart, satt sammen av fire elementer:

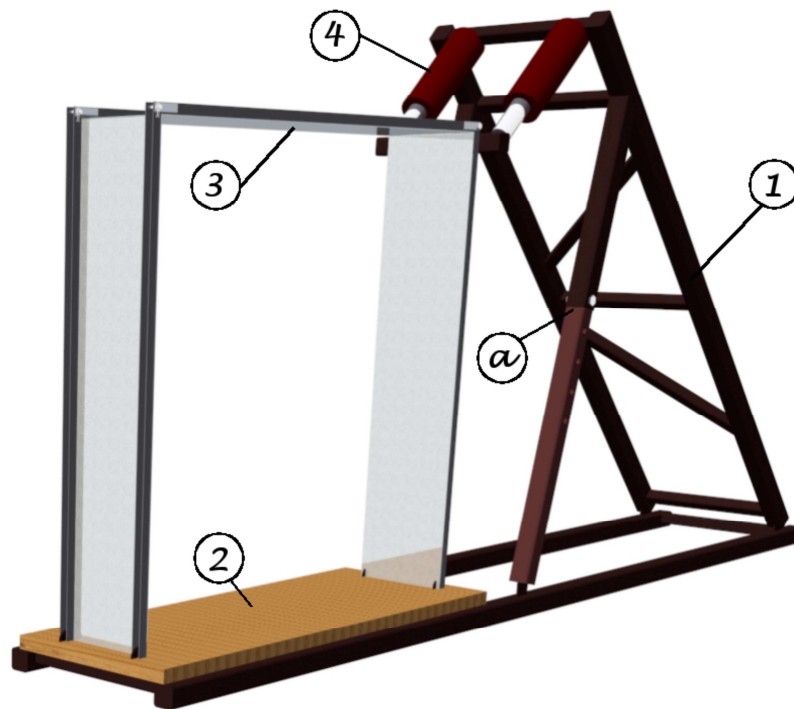
1. Tårn
2. Gulv og underramme av stål.
3. Stålramme som omkranser veggen.
4. Trykksylindre med trykksensor.

Tårnet (1) med trykksylindere er en konstruksjon som allerede fantes ved UMB. Den var tidligere uanvendt og dannet grunnlaget for hvordan resten av konstruksjonen fikk se ut. Beina nærmest den fleksible rammen er regulerbare i høyden (figur 3.22, pkt a).

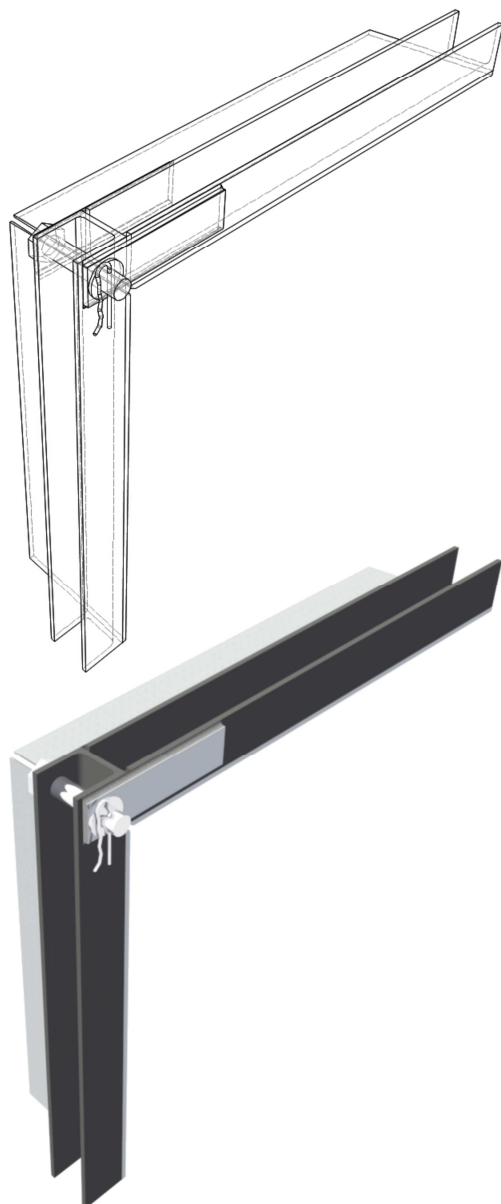
Gulv (2) under veggramme er bygget opp av trebjelker i dimensjon 2 x 8". Disse skaper et heldekkende gulv under området hvor veggen ble bygget.

To bunnsviller av 120 HUP-bjelker forbinder tårnet og den veggomkransende stålrammen.

Stålrammen har innvendig mål 2500 x 2500 x 550 mm. Den er hengslet i alle sine hjørner. Det tillater rammen den bevegelse som er nødvendig for å måle trykkfastheten. Veggen konstrueres på sin plass i rammen.



Figur 3.22: Skisse av testjiggen som ble benyttet til fullskalaforsøkene. Den består i all hovedsak av fire hovedelementer; 1: Tårn. 2: Gulv og underramme av stål. 3: Stålramme som omkranser veggen. 4: Trykksylindre med trykksensor.



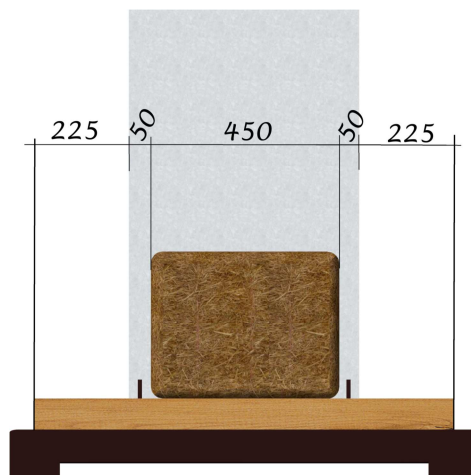
Forankring av skiven skjer gjennom stålrammen. Den øvre, liggende, delen av stålrammen forhindrer oppløft og sørger for en skivedeformasjon av halmveggen. ASTMs anvisning inkluderer et strekkstag for å forhindre oppløft (fig 3.21). Anordningen for å forhindre oppløft er en vesentlig forskjell mellom ASTMs prinsippskisse og jiggen som ble konstruert til dette formålet. ASTMs strekkstag forblir vertikal gjennom hele deformasjonsprosessen. Med en stålramme slik som det her er skissert vil rammens stående deler – som tar strekkbelastningen forbundet med oppløft – få en vinkelforskyvning. Dette vil føre til at høyden inne i stålrammen reduseres og at deler av lastpåføringen vil gå med til å trykke veggen sammen i vertikal retning. Ved 150 mm vertikal forskyvning av stålrammens øvre ledd og en vinkelforskyvning på $3,44^\circ$ av stålrammens stående ledd vil høyden reduseres med 4,5 mm. I denne målestokken utgjør det 1,8 ‰. Det finnes øvrige variabler med større måleusikkerhet og denne høydereduksjonen anses derfor som neglisjerbar.

Rammen består av 5 mm stålplater. 50 mm U-profil av stål stiver denne av langsmed kantene. Innhengslingen i hjørnene skjer via bolter som går gjennom påsveiste stålplater. Disse stålplatene ligger utenpå hulkantprofilene.

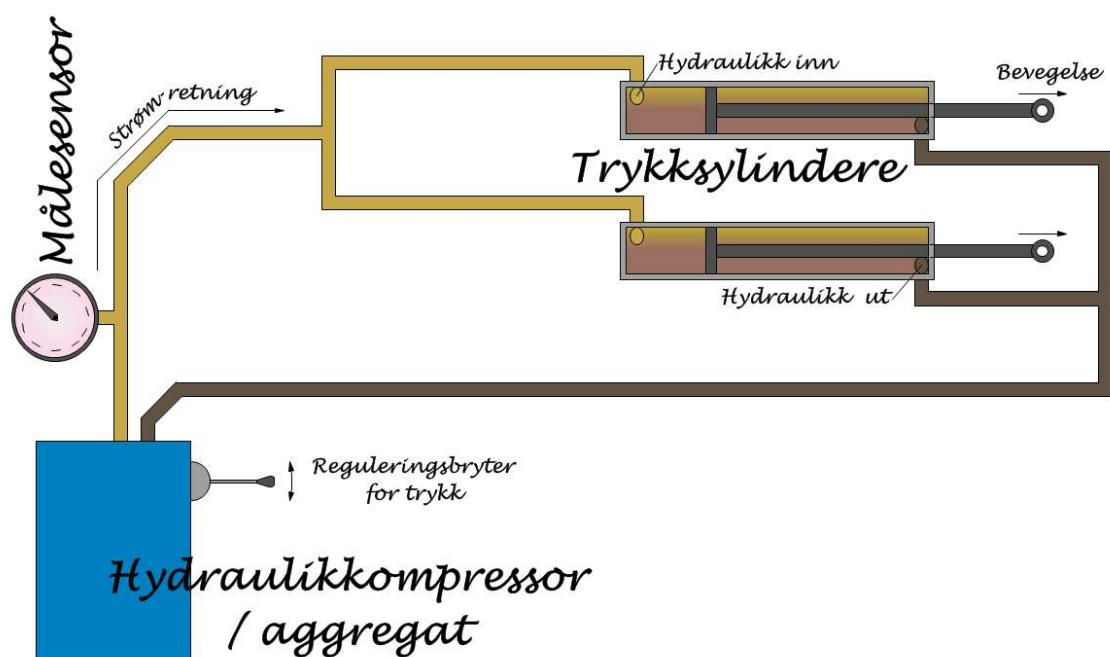
Hulkantprofilene er plassert med 450 mm mellomrom – samme bredde som en halmball liggende på flasken – langs stålrammens ytterkant. Dette ble gjort for å sikre at mest mulig av kraftoverføringen skjer via leirpussen.

Figur 3.23: Hjørnedetalj av rammen.

Figur 3.24, til høyre: En halmball er lagt inn i stålrammen og et tverrsnittsbilde er laget.



3.4.2.2 Hydraulisk testanlegg



Figur 3.25: Prinsippskisse over det hydrauliske anlegget tilknyttet testjiggen.

Testjiggens trykksylinder ble koplet til et allerede eksisterende hydraulisk aggregat. Denne fordelte trykket likt på begge sylindere via en åpen t-kopling. Trykkmålinger ble utført ved hydraulikkompressorens utgang på trykksiden. Kraftpåføringen var regulerbar i styrke og i retning. Målingene ble gjort på det opptredende statiske trykket på systemet som helhet; altså sylindere, aggregatet og slangene. Dette skjedde når belastning ikke fant sted. I praksis betød det at trykkbelastningen ble påført med regelmessige mellomrom, avbrutt av korte pauser. Under pausene ble det opptredende trykket i systemet avlest. Dette skiller seg fra en dynamisk avlesning hvor lastpåføringen og avlesning skjer kontinuerlig – uten avbrekk i belastningen. Ved å avlese det statiske trykket kan man se bort ifra feilkilder grunnet trykkfall i slangene og systemet forøvrig. Dette var en fordel. Man står dermed friere i plasseringen av målesensoren, hvilket var hensiktsmessig i forhold til prosjektets økonomiske og tidsmessige rammer. En statisk trykkavlesning fordrer imidlertid at testlegemet tåler den kraft som blir påført – også over tid.

3.4.2.3 Veggens kraftinnføring

Kun en vegg skulle konstrueres og testes. Hvordan kraftinnføringen skulle finne sted ble diskutert.

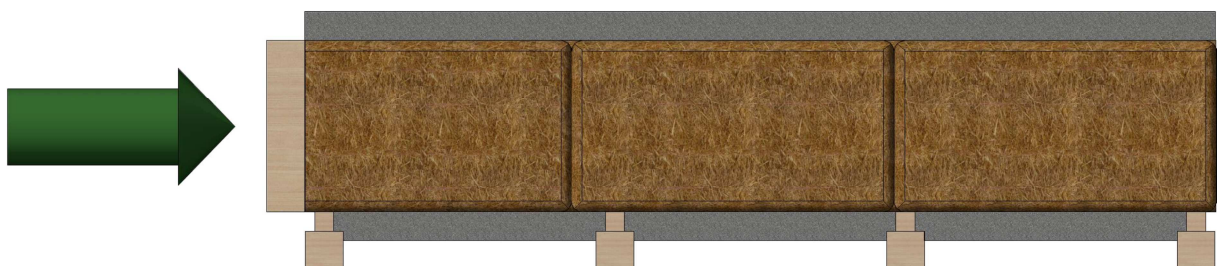
En vegg in situ vil være et sammensatt system av ulike bygningselementer hvor det er vanskelig å redegjøre presist for hvordan kraftoverføringen fra vindlast til fundament skjer. Når dette skulle modelleres i et fullskala skiveforsøk ble det skissert to måter å sørge for kraftinnføringen på:

1. Tenkt lastinnføring i leirpussen: Gitt den konstruksjonen som beskrives i kapittel 2.1.2 tar rammeverket av tre i første fase tar opp vindlasten gjennom tak og vegger. Det kan tenkes at denne kraften overføres, i all hovedsak, direkte til leirpussen og at halmballene er for lite stive til å inneha en avstivende rolle.



Figur 3.26: Lastinnføringen direkte i leirpussen. Øverst vises leirpuss på utsiden og nederst vises veggens innsidige leirpuss. Kraften påføres i senter av hvert pusslaget via fleksible stående stendere.

2. Lastinnføring direkte i halmballene. Kanskje er kraftoverføringen mer komplisert enn beskrevet ovenfor og halmballene har mye å si for veggens stivhet. Dette forholdet er tenkt utforsket ved dette forsøket hvor kraftinnføringen skjer direkte langs veggens senterakse i halmballene. Man ser her for seg at en andel av den påførte lasten vil finne veien ut i leirpussen.



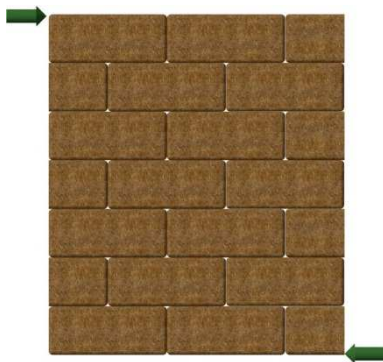
Figur 3.27: Halmballenes lastpåkjenning påføres via en høy stående limtrebjelke.

Kraftspillet mellom halmball og leire kan tenkes være komplisert. Dette forholdet burde derfor være interessant å utforske for fullt ut å kunne beskrive veggens kapasitet. Det var imidlertid nødvendig å gjøre en avgrensning. Det ble derfor antatt at all avstivning i hovedsak ville skje gjennom leirpussen,

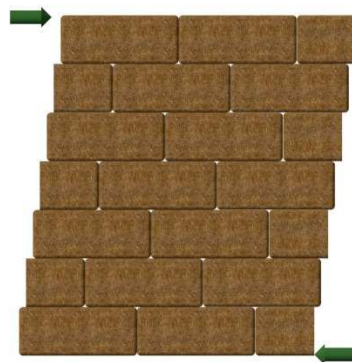
uavhengig hvordan kreftene overføres dit. Lastinnføringen ble derfor gjennomført som skissert i scenarie 1.

3.4.2.4 Forventet bruddutvikling i stablede halmballer

Hvilken bruddform man får som resultat av forsøket ble forventet å avhenge av ulike faktorer. Her ble antatt at halmballenes deformasjon ville ha betydning. Man kunne både se for seg at halmballene enten deformerte seg ved enkeltvise halmballers tøyning eller at de formfast ville forskyve seg i forhold til hverandre. De ble altså forutsett to ulike scenarier.



Figur 3.28: Veggen utsettes for tøyningsskrefter.



Figur 3.29: Scenarie 1



Figur 3.30: Scenarie 2

Scenarie 1: Halmballene forskyves lagvis i forhold til hverandre, men beholder hver sin opprinnelige form.

Scenarie 2. Halmballene forskyves ikke i forhold til hverandre, men hver halmball deformeres til å få en profilfigur som i et parallelogram.

3.4.2.5 Utførelse

Proessen for å få bygget én halmvegg inn i jiggeren består av følgende faser som beskrives i detalj i de følgende underkapitler:

- Bygging av to trerammer: 3.4.2.5.1 s. 61.
- Stable halmballer: 0 s. 62.
- Trimme halmballer: 3.4.2.5.3 s. 63.
- Påføre tynt leirlag: 3.4.2.5.4 s. 63.
- Påføre første lag med puss: 3.4.2.5.5 s. 64.
- Påføre andre lag med puss: 3.4.2.5.6 s. 65.
- Tetting av tørkesprekker: 3.4.2.5.7 s. 66.

3.4.2.5.1 Trerammer

To trerammer bestående av 2 x 4 ” bjelker, liggende på flasken, ble konstruert slik at den passet med stålrammens indre mål på 2,5 x 2,5 m. Deretter ble disse trerammene plassert i stålrammen med stor nok avstand imellom hverandre til å romme en halmball. Det var ingen mekanisk forbindelse mellom trerammen og stålrammen. Argumentasjonen for å installere slik en treramme er å skape et uttrykk for den heft som kan tenkes å oppstå mellom treramme og leire under belastning.

Trerammens sammenføyninger består av to 5” spikre i hvert hjørne. Den stivhet som skapes av trerammen med forbindere – festet inn mot stendernes endeved - antas å være neglisjerbar i denne sammenhengen.

I overkant av trerammene ble det satt inn fire gjengestag med gjennomføring gjennom trerammens bjelker. Disse var tiltenkt å besørge stabilitet med hensyn på avstand mellom trerammene og loddrett posisjonering av stenderne.



Figur3.31, over: Trerammene som omkranset leirpussen. Her vist med en halmball imellom.



Figur 3.32, til venstre: Gjengestag som holder trerammene på plass i forhold til hverandre og bidrar til å holde trerammene oppreist i loddrett posisjon. Fire punkter markerer gjengestagens posisjoner.

3.4.2.5.2 Stabling av halmballer

Halmballene ble stablet lagvis. Horisontalt ble de lagt svært tett slik at det ble en viss sammenpresning i lengderetningen. Hvert omfar som ble lagt med halmballer ble knegått for å besørge vertikal sammenpresning av halmballene. Eventuelle hulrom som måtte oppstå ble tettet med strøhalm.

En tett pakket halmballvegg er viktig både for heften mellom halm og leirpuss samt for å oppnå en stabil vegg med lite setninger.

Halmballene ble hele tiden vatret for å få en mest mulig loddrett vegg.

Figur 3.33, til høyre: Lagvis oppstabling av halmballer i stålrammen.



Det ble besluttet å slå ned dymlinger som forbandt halmballene. Dette er vertikale lekter av gran som har en lengde like to-tre ganger en liggende halmballs høyde. Disse ble drevet inn med hammer.

Det var ikke mulig å slå dymlinger inn i de øverste halmballene. På grunn av stålrammen som omkranset halmballkonstruksjonen kom man ikke til med en hammer ovenifra. Det medførte at konstruksjonen ble lite ensartet med dymlinger i nedre del og ikke i de to øvre omfar. Det ble likevel valgt å gjøre det slik for å øke samvirke mellom halmballene mest mulig og å hindre at halmballene fikk forskyvning ut av skivens plan. Fra et forsøksmessig standpunkt ville det vært gunstig om veggens var mest mulig lik slik den oppsettes i virkeligheten.

Figur 3.34, til venstre: Dymlingene som ble benyttet. Her vist halvveis neddrevet i en halmball.

Med halmballer med 350 mm høyde vil en halmballvegg stablet av syv halmballrader få en teoretisk høyde på 2450 mm. Dette ville gi et lite hulrom øverst mellom halmballer og stålrammen og sørge for at stålrammens bevegelse ikke ble forhindret ved sammentrykning av halmen.

For det øvre omfaret av halmballer ble det benyttet halmballer som var, relativt sett, dårlig pakket. Dette ble gjort ettersom alle ballene viste seg å være høyere enn antatt, og det ble dermed vanskelig å få inn det øverste laget dersom det ikke ble benyttet dårlig pakkeballer som var formbare. Det ble forventet at dette ville bidra til å redusere veggens samlede stivhet noe. Videre ble det antatt at mer av kraftoverføringen ville gå via leirpussen, hvilket var hensikten med forsøket.

3.4.2.5.3 Trimming av halmen

Etter at halmen var stablet i full høyde ble veggens to fasader trimmet plane. Løs strøhalm ble skåret bort og halmballene ble frisert slik at kjernen av de hardpakkede stråene ble eksponert. Dette ble gjort ved hjelp av en vinkelsliper. Hensikten er å få fram et godt underlag for leirpussen som gir god heft. Et plant underlag av halm vil også gi et tykkelsesjevnt lag av leirpuss.

Målepinner ble banket inn i veggen etter trimming for å måle gjennomsnittet av leirpussens tykkelse.



Figur 3.35, over: Halmveggen ferdig stablet, før trimming.



Figur 3.36, over: Halmveggen etter frisering. Det ble anvendt en rettelekte for å sørge for at halmveggen ble planest mulig.

3.4.2.5.4 Påføring av tynt leirlag

Forut for påføring av selve pussen ble et tynt lag med ren leir arbeidet inn i halmveggen for hånd. Dette ble gjort på bakgrunn av praksis på byggeplass¹. Hensikten er å få til en sterk heft mellom halm og leirpuss ved å påføre et tynt lag av selve bindemiddelet i mørtelen.

Figur 3.37, til høyre: Målepinne innsatt i halmveggen. Den svarte stripen markerer 10 cm fra halmveggen slutt.



3.4.2.5.5 Påføring av første pusslag

Mørtelblanding med høy andel isofiber ble valgt (kap. 4.2). Dette ble påført med en pussprøyte drevet av en trykkluftkompressor som ytte 300 bar / minutt. Underlaget, det tynne leirlaget, var fremdeles fuktig da mørtelen ble påført.

Pussprøyten består av en mørtelbeholder med fire dyser av dens bunn og en bryter som regulerer trykket.

For å få en mørtel som egner seg for slik sprøyting er det nødvendig å gå noe opp i fuktighetsinnhold i mørtelen. Dette vil påvirke styrken til den tørkede leiren og evne til å motstå oppsprekning. Fordelene man får med en slik sprøyte er effektivitet og høytrykkspåføring. Påføring under høyt trykk vil minimere risikoen for luftflommer i pussen og sikre god heft mellom de ulike lagene.



Figur 3.38,over: Pussprøyten som ble anvendt.



Figur 3.39: To faser i halmveggen liv.

*Til venstre: Ren leir er arbeidet inn i halmen for å virke som en god heftende grunning.
Til høyre: Første lag leire er ferdig påført og glattet plan med murerkje. Veggen er fortsatt fuktig.*

3.4.2.5.6 Påføring av andre pusslag



Figur 3.40: Stor grad av oppsprekning i første pusslag. Etter tørking i 14 dager.

Før påføring av annet pusslag fikk veggen tørke innendørs i 14 dager. Leirpussen viste etter dette en høy grad av oppsprekning. Dette var større og flere sprekker enn ventet. Til bruk som kllimaskall i et halmhus ville den vært klassifisert som lite egnet, ettersom oppsprekningen fører til mye ekstraarbeid i form av sprekketetting.

En endring av resepten for neste pusslag ble vurdert. Det ble antatt at en større andel tilslagsmaterialer, mindre tilsatt fuktighet og endring av tørkeforholdene ville redusere oppsprekningstendensen. Det var imidlertid lite ønskelig å endre blandingsforholdet mellom leir, sand og fiber, ettersom dette ville gi to ulike sjikt av ulik kvalitet. Med en slik reseptvariasjon mellom sjiktene ville man innført en ny variabel – og med det også et nytt usikkerhetsselement.

Beslutningen ble å fortsette med samme resept, men med redusert vanninnhold. Etter tørking skulle tørkesprekker tettes der det var nødvendig. Dette ville gi en sikrere metode for å anslå leirpussens stivhet.



Figur 3.41: Til venstre; vegg etter påføring av andre pusslag. Til høyre; vegg etter tørking av andre pusslag.

På grunn av en reduksjon av vanninnhold i mørtelen kunne man ikke fortsette å bruke pussprøyten. Mørtelen ble derfor arbeidet inn i underlaget med murereskje.

Forut for påføring av andre pusslag ble første pusslag oppfuktet. Dette er i tråd med praksis på byggeplass og utføres for å sikre god heft mellom første og andre pusslag.

3.4.2.5.7 Tetting av tørkesprekker

Etter tørking av andre pusslag ble tørkesprekker tettet med samme resept for leirmørtelen som tidligere. Sprekker ble oppfuktet før påføring.

Målepinner ble nedmontert, og hullene etter dem ble også tettet.

Figur 3.42, til høyre: Ferdig vegg. Første og andre pusslag er lagt. Målepinner er fjernet. Sprekkene er tettet og fugene tørker.



3.4.2.6 Målinger av veggens ulike måleredskaper

3.4.2.6.1 Måling av veggens tykkelse

Veggens tykkelse ble dels målt ved å innsette målepinner (jfr. kap. 3.4.2.5.3) forut for pusspåføring og dels ved boring av målehull i leirpussen. Ved boring målte man dybden ved innstikk av et måleapparat.

3.4.2.6.2 Måling av trykkpåføring

Måling av trykket ble gjort med en Osisense XM, type XML P. Denne er avbildet i nedenstående figur. Den foretar målinger opp til 250 bar og har en oppgitt nøyaktighet på $\pm 1\%$ (Schneider Electric Industries SAS, s.a).



Figur 3.43: Kontrollenheten på hydraulikkompressoren.



Figur 3.44: Trykksensoren vist tilkople, via et t-stykke, på hydraulikkompressorens trykkutgang.

3.4.2.6.3 Måling av bevegelse

Veggens resulterende forskyvning horisontalt, forskyldt av kraftpåføringen, ble registrert med tre målesensorer. Disse ble montert i et frittstående måletårn og utelater derfor at eventuelle bevegelser i trykktårnet (fig. 3.22 (1)) påvirker måleresultatet. Målesensor 1 og 2 ble montert i 2360 mm høyde og målesensor 3 ble montert i 1236 mm høyde. I forhold til trykkstemplenes bevegelsesretning ble sensor 1 plassert på styrbord side, og sensor 2 på babord side. Disse målte begge på innsiden av hulkantprofilene (se fig. 3.23). Sensor 3 ble plassert midt på veggens kortsida i horisontal retning. Etter praksis på IMT ble sensorene festet med såkalt patentbånd.

Forskyvningsregistratorene består grovt sagt av en målepinne som følger jiggens bevegelse og en enhet som omgjør dette til datasignaler. Målepinnens lengde var 120 mm. Det ble antatt at dette var tilstrekkelig for denne type forsøk og et brudd var antatt å opptre innen 120 mm horisontal forskyvning.



Figur 3.45: Frittstående måletårn for horisontal forskyvning. Figur 3.46: Øverst: Sensor 1. Nederst: Sensor 3.

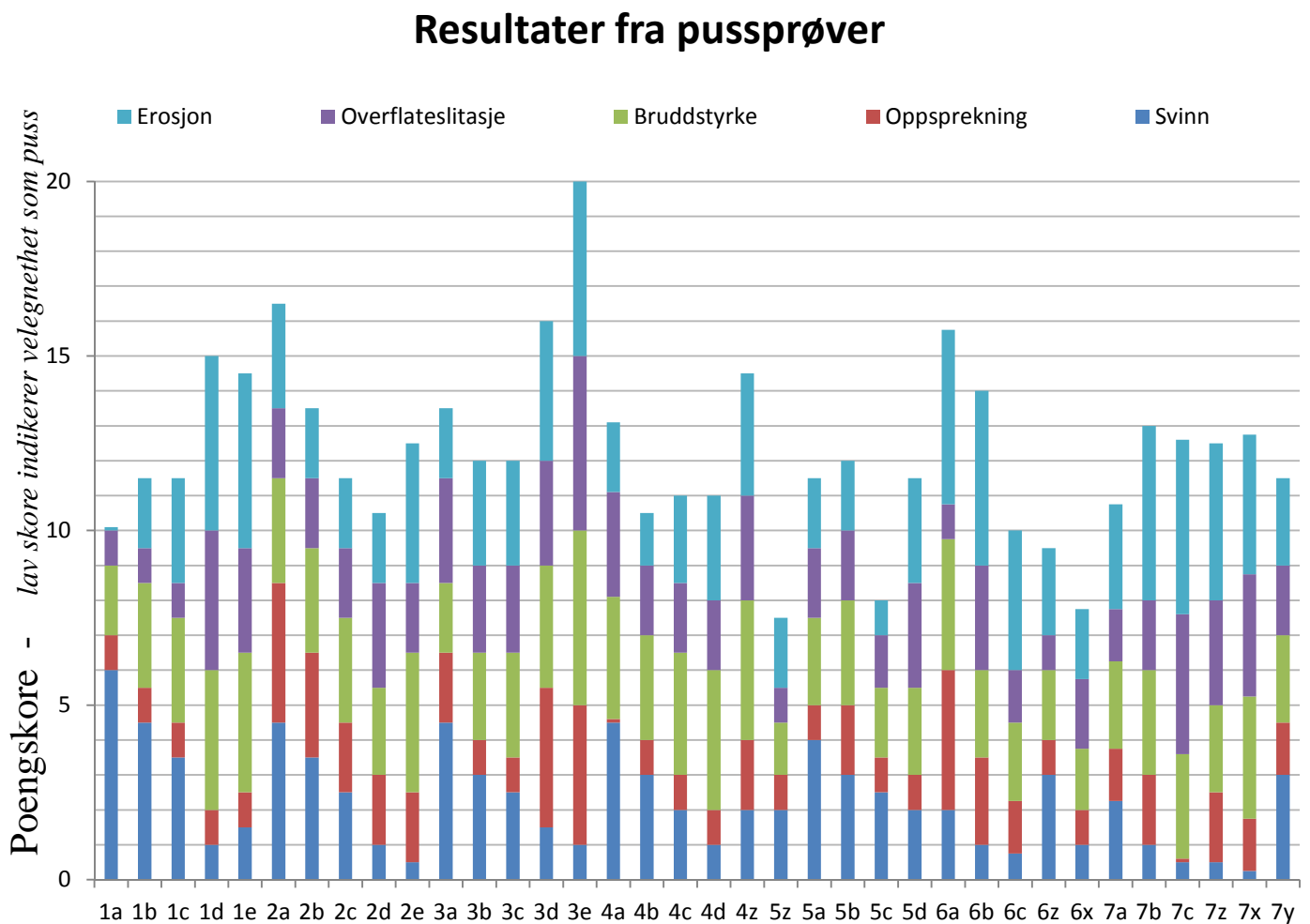
3.4.2.6.4 Måling av trykkstyrke

Det ble underveis i konstruksjonsperioden tatt prøver av den mørtelen som ble anvendt som veggpuss. Disse ble tørket i former og trykktestet i henhold til kapittel 3.3.2.

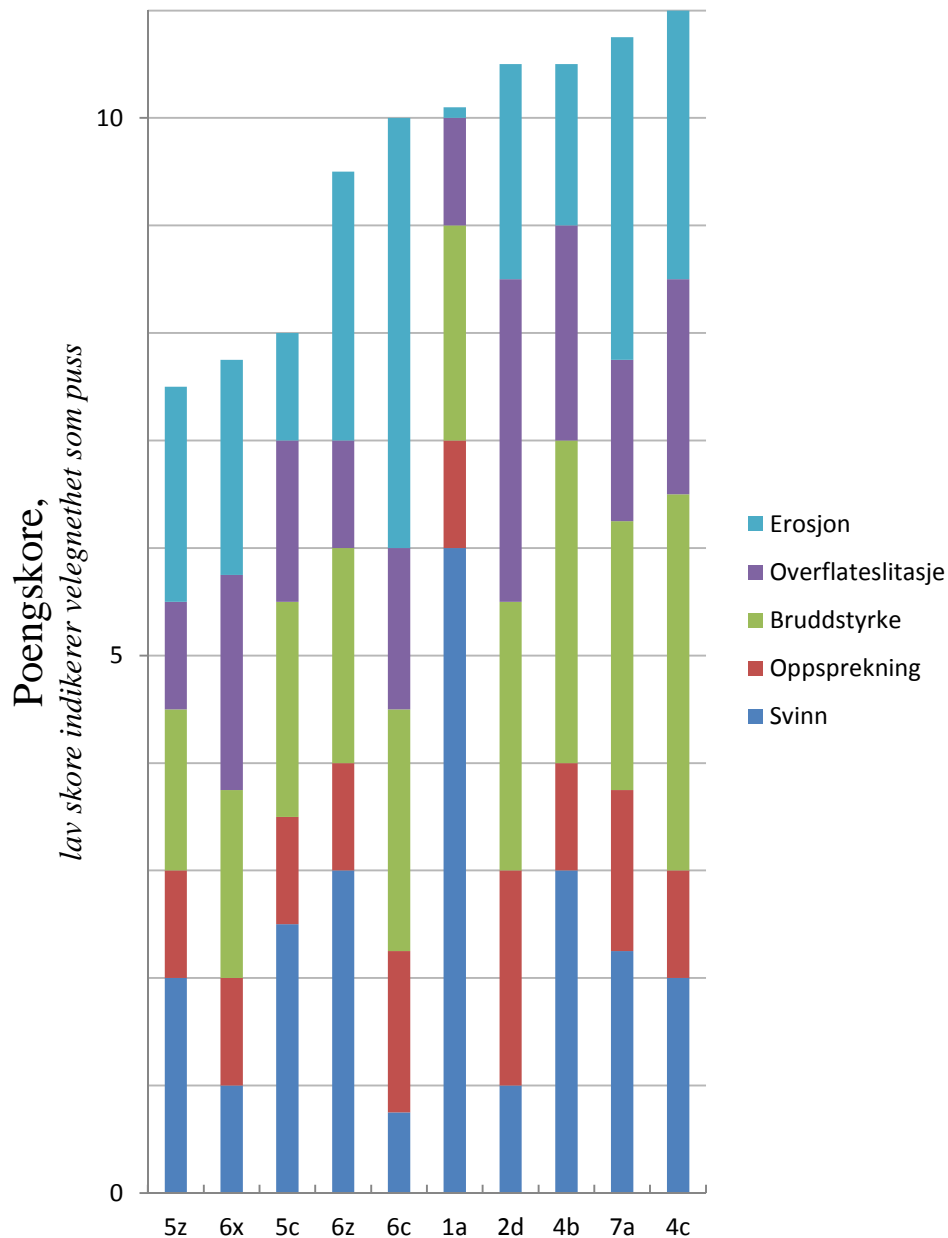
4 Resultater

4.1 Pussprøver – kvalitative egenskaper til ulike mørtelblandinger

Pussprøvene ble kontrollert hver for seg og gitt en kvalitetsbeskrivende tallverdi innen fem ulike kategorier: Svinn, erosjon, overflateslitasje, bruddstyrke og oppsprekning. Lav tallverdi indikerer en velegnet pussresept. Dataene ble kontinuerlig samlet i et regneark sammen med oversikt over mørteltilsetninger og merknader for pussprøven. Denne ligger vedlagt bakerst under vedlegg 9.2.1. Tallmaterialet er forsøkt framstilt grafisk i nedenstående figur. Hver pussprøve er der framstilt med en søyle hvor høyden av denne angir totalt oppnådde poeng. De fem ulike kvalitetsbeskrivende kategoriene har fått hver sin farge som er angitt oppe til høyre i figuren. Det er brukt samme benevnelser på prøvene som i kapittel 3.2.2 om pussprøvebilder. Denne bildeserien i nevnte kapittel kan brukes som referanse.



Figur 4.1: Vurderinger av pussprøvene. Sortert etter prøvetype.



Figur 4.2: De ti prøvene som kom best ut fra forsøket. Prøvetypene er sortert etter poengskore.

Det er flere forhold som tilsynelatende ser ut til å ha en sammenheng ved pussprøveforsøkene. Her nevnes noen som var av interesse for det videre arbeidet.

Andelen leir har en sterk sammenheng med prøveeksemplarenes bruddstyrke og svinneegenskaper. Ren leir var svært sterk og krympet mye.

Tilsats av fiber bidro til å redusere poengsummen med hensyn på bruddstyrke, erosjon og svinn.

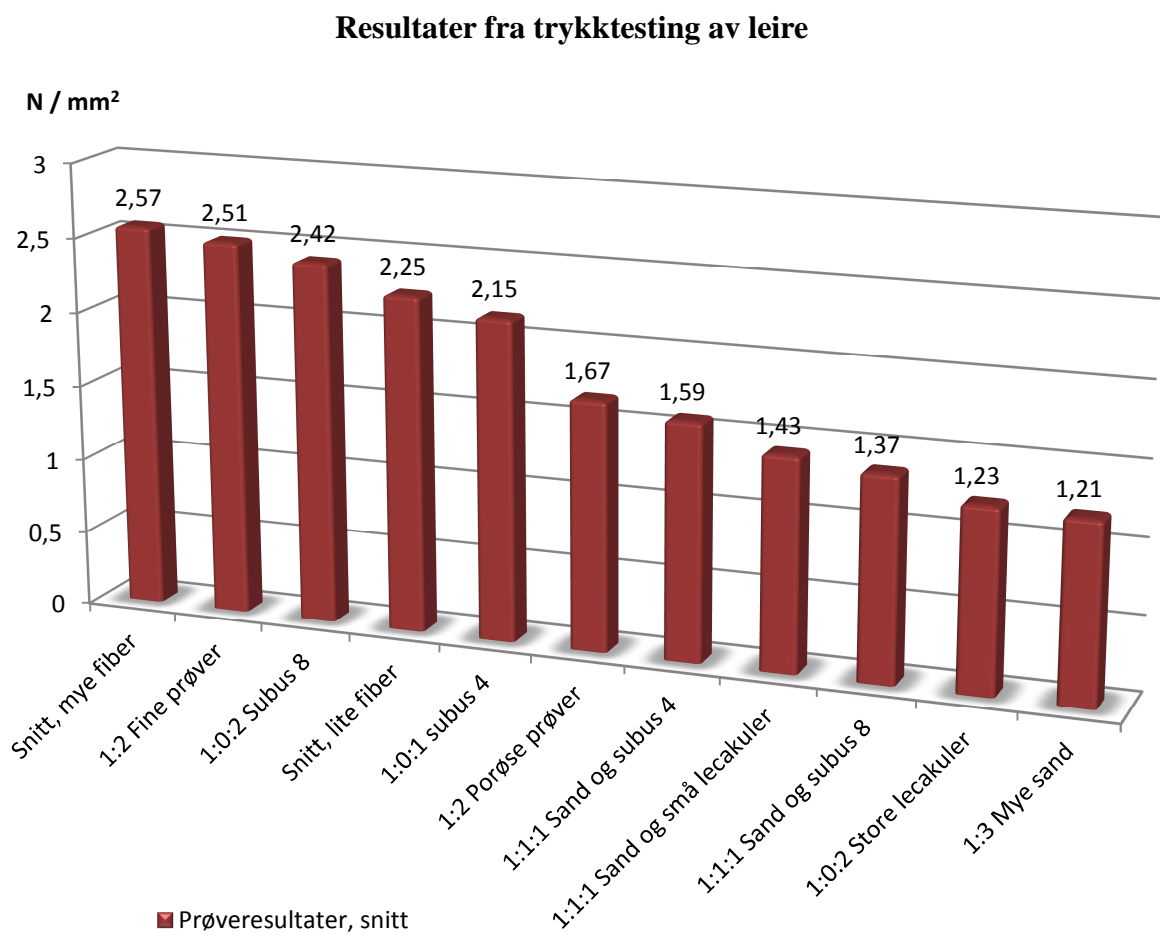
Mineralske tilsetninger med store dimensjoner ga dårligere bruddstyrkeverdier enn tilsetninger med størrelsesmessig mindre tilslag. Mindre dimensjoner medfører imidlertid mer svinn.

Blant de tre beste prøveresultatene hadde to et blandingsforhold på 1:2 leire:mineralsk tilslag. Et blandingsforhold på rundt 1:1-3 skoret høyt.

Generelt var de beste allround-pussblandingene de med et moderat blandingsforhold (1:1-3), tilsats av fiber og finkornet mineralsk tilslagsmateriale.

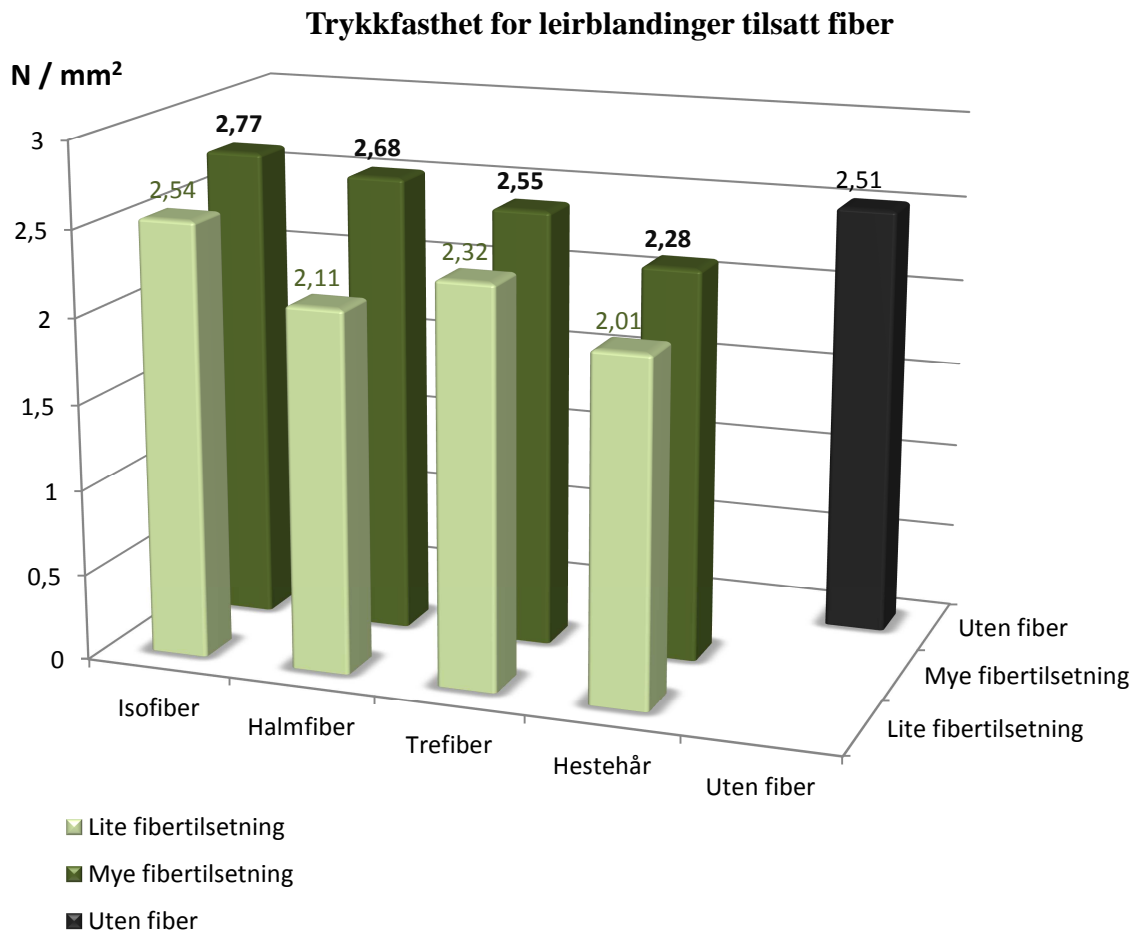
4.2 Små trykkprøver – tallfesting av ulike mørtelblandingers trykkfasthet

Snittet for hver av de ulike prøveseriene ble regnet ut innenfor hver kategori. Dette presenteres i nedenstående figur. Resepten for de ulike blandingene er skildret under metodekapittelet 3.3.2.



Figur 4.3: Resultater fra trykktesting av kubeformede prøvestykker. Verdier er vist i N / mm².

Prøvene som innehar en stor grad av fibertilsetning i mørtelblandingen viser stor trykkfasthet. Generelt fører andre typer tilslag enn sand til en redusert trykkfasthet. Med bakgrunn i at fibertilsetning scorerer så høyt er de individuelle fibertilslagene presentert i følgende diagram:

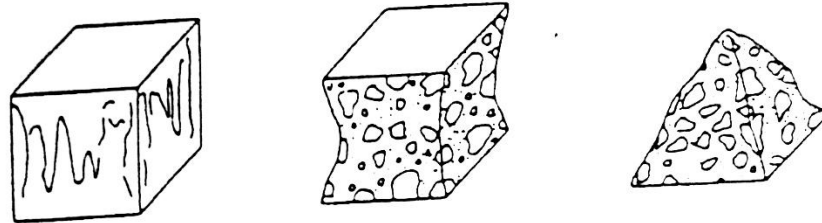


Figur 4.4: Prøver tilsatt ulike former for fiber. Verdier er vist i N/mm^2 .

Prøver med henholdsvis høy andel og liten andel tilsatt isofiber, oppnår høyere fasthetsverdier enn en pussblanding helt uten fiber. Pussblandingen med halm og trefiber oppnår først en høyere trykkfasthet ved tilsats av mye fiber. Forsøkets absolutt høyest målte verdier ble gjort med prøver med mye tilsatt isofiber (jfr. vedlegg 9.2.2).

4.2.1 Bruddform

Prøvestykkenes bruddform var utelukkende pyramide- eller timeglassformet. Dette er i samsvar med de bruddformer som er ønskelig i henhold til NS-EN 12390-3:2009 og man kan slutte at brudd har oppstått som følge av jevnt fordelt trykkpåkjenning og at prøvematerialet har vært relativt homogent.



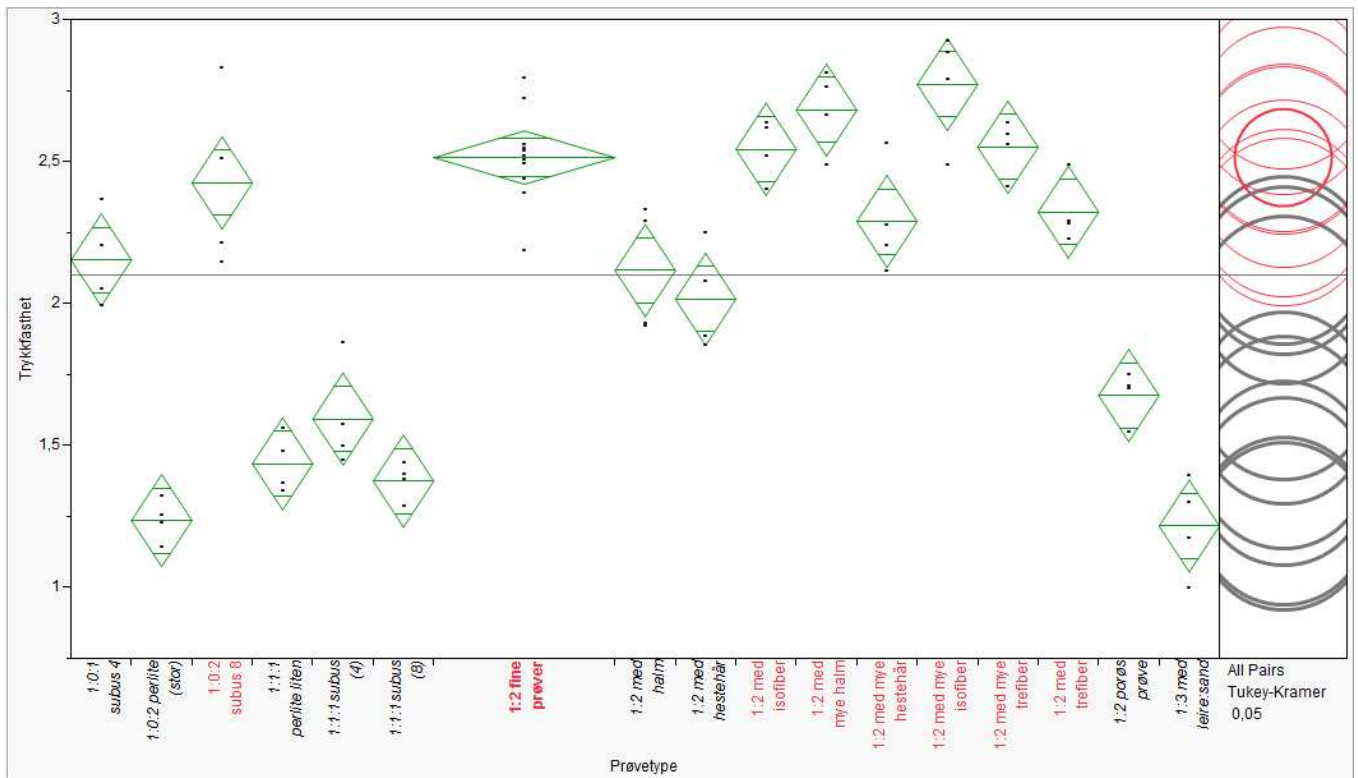
Figur 4.5: Ønskede bruddformer for betongprøver etter NS-EN 12390-3:2009.



Figur 4.6: Bruddformer oppnådd under trykktesting. Tre av de sterkeste prøvene.
Fra venstre: 1. mye isofiber. 2. mye isofiber. 3. mye halm.

4.2.2 Resultater av statistisk analyse av tallmaterialet

Tallmaterialet fra kubeforsøkene ble kjørt i analyseprogrammet JMP. Dette ble gjort gjennom en enveis anova-analyse (vist til venstre i fig. 4.7) og en Tukey-Kramer-analyse (til høyre i fig. 4.7). Disse analysene er visualisert nedenfor. Målingene som ble utført er markert med en svart prikk i anova-analysen. Snitt og standardavvik er inntegnet som grønne boksploot. Antall gjentak for hver av prøveseriene er på fire, bortsett fra *fine prøver* som har gjentak på 12.



Figur 4.7: Trykkløstet fordelt på prøvetype. Til venstre enveis anova-analyse og til høyre Tukey-Kramer analyse. Trykkløstet er her målt i N/mm.

Fine prøver har fått et mindre standardavvik, ettersom gjentaket i prøveserien er større. Til høyre i ovenstående figur er standardavvikets størrelse symbolisert som radien i en sirkel rundt gjennomsnittet. Dersom to sirkler ikke overlapper, altså at verdiene på standardavvikene er forskjellige, vil de være signifikant forskjellige. I figuren er *fine prøver* markert med en mørk rød farge. Den vil altså være signifikant forskjellig fra prøver som er markert med grå sirkler.

I de prøveseriene hvor antall forsøk $n=4$ blir anova-analysens standarddeviasjon 0,08108 N/mm. For *fine prøver* er standarddeviasjonen på 0,04681 N/mm. P-verdien «Prob > F» er under disse forholdene på mindre enn 0,0001 og under ønsket signifikansnivået på 0,05.

Oneway Anova					
Summary of Fit					
Rsquare		0,925699			
Adj Rsquare		0,905549			
Root Mean Square Error		0,162159			
Mean of Response		2,102007			
Observations (or Sum Wgts)		76			
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Prøvetype	16	19,328996	1,20806	45,9416	<,0001*
Error	59	1,551440	0,02630		
C. Total	75	20,880436			
Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
1:0:1 subus 4	4	2,15329	0,08108	1,9910	2,3155
1:0:2 perlite (stor)	4	1,23577	0,08108	1,0735	1,3980
1:0:2 subus 8	4	2,42441	0,08108	2,2622	2,5867
1:1:1 perlite liten	4	1,43564	0,08108	1,2734	1,5979
1:1:1subus (4)	4	1,59342	0,08108	1,4312	1,7557
1:1:1subus (8)	4	1,37488	0,08108	1,2126	1,5371
1:2 fine prøver	12	2,51382	0,04681	2,4201	2,6075
1:2 med halm	4	2,11614	0,08108	1,9539	2,2784
1:2 med hestehår	4	2,01480	0,08108	1,8526	2,1770
1:2 med isofiber	4	2,54310	0,08108	2,3809	2,7053
1:2 med mye halm	4	2,68093	0,08108	2,5187	2,8432
1:2 med mye hestehår	4	2,28895	0,08108	2,1267	2,4512
1:2 med mye isofiber	4	2,77102	0,08108	2,6088	2,9333
1:2 med mye trefiber	4	2,55013	0,08108	2,3879	2,7124
1:2 med trefiber	4	2,32190	0,08108	2,1597	2,4841
1:2 porøs prøve	4	1,67598	0,08108	1,5137	1,8382
1:3 med leire:sand	4	1,21634	0,08108	1,0541	1,3786

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Tabell 4.1: Tilhørende datasett til Anova-testen.

Tukey-Kramer-analysen rangerer de ulike prøvegruppene i bokstavkategorier. Hver prøvetype kan havne i flere kategorier og er signifikant forskjellig fra de prøver den ikke deler bokstav med. Dette betyr at *fine prøver* i med bokstavkategorien AB er signifikant forskjellig fra gruppene med bokstavkategorier BCD, CD, D, DE, EF, FG og G. I nedenstående tabell er de ulike prøvetypene listet opp med bokstavkategorier og tilhørende gjennomsnittsverdier.

Level		Mean
1:2 med mye isofiber	A	2,77
1:2 med mye halm	A B	2,68
1:2 med mye trefiber	A B C	2,55
1:2 med isofiber	A B C	2,54
1:2 fine prøver	A B	2,51
1:0:2 subus 8	A B C D	2,42
1:2 med trefiber	B C D	2,32
1:2 med mye hestehår	B C D	2,28
1:0:1 subus 4	C D	2,15
1:2 med halm	D	2,11
1:2 med hestehår	D E	2,01
1:2 porøs prøve	E F	1,67
1:1:1subus (4)	F G	1,59
1:1:1 perlite liten	F G	1,43
1:1:1subus (8)	F G	1,37
1:0:2 perlite (stor)	G	1,23
1:3 med leire:sand	G	1,21

Levels not connected by same letter are significantly different.

Tabell 4.2: De ulike bokstavkategoriene fra Tukey-Kramer-analysen.

4.3 Skiveforsøk

4.3.1 Leirpussens trykkstyrke

I henhold til metoden som ble anvendt for små kubeprøver ble det også av veggens leirpuss gjort trykkstyrkemålinger. Totalt 8 målinger ble gjort fra to ulike batcher. Fire gjentak på hver batch. Snittet av den første batchen viste en gjennomsnittlig trykkfasthet på $2,0 \text{ N/mm}^2$. Den andre batchen ga trykkfasthet på $1,6 \text{ N/mm}^2$.

4.3.2 Pusstykkelse

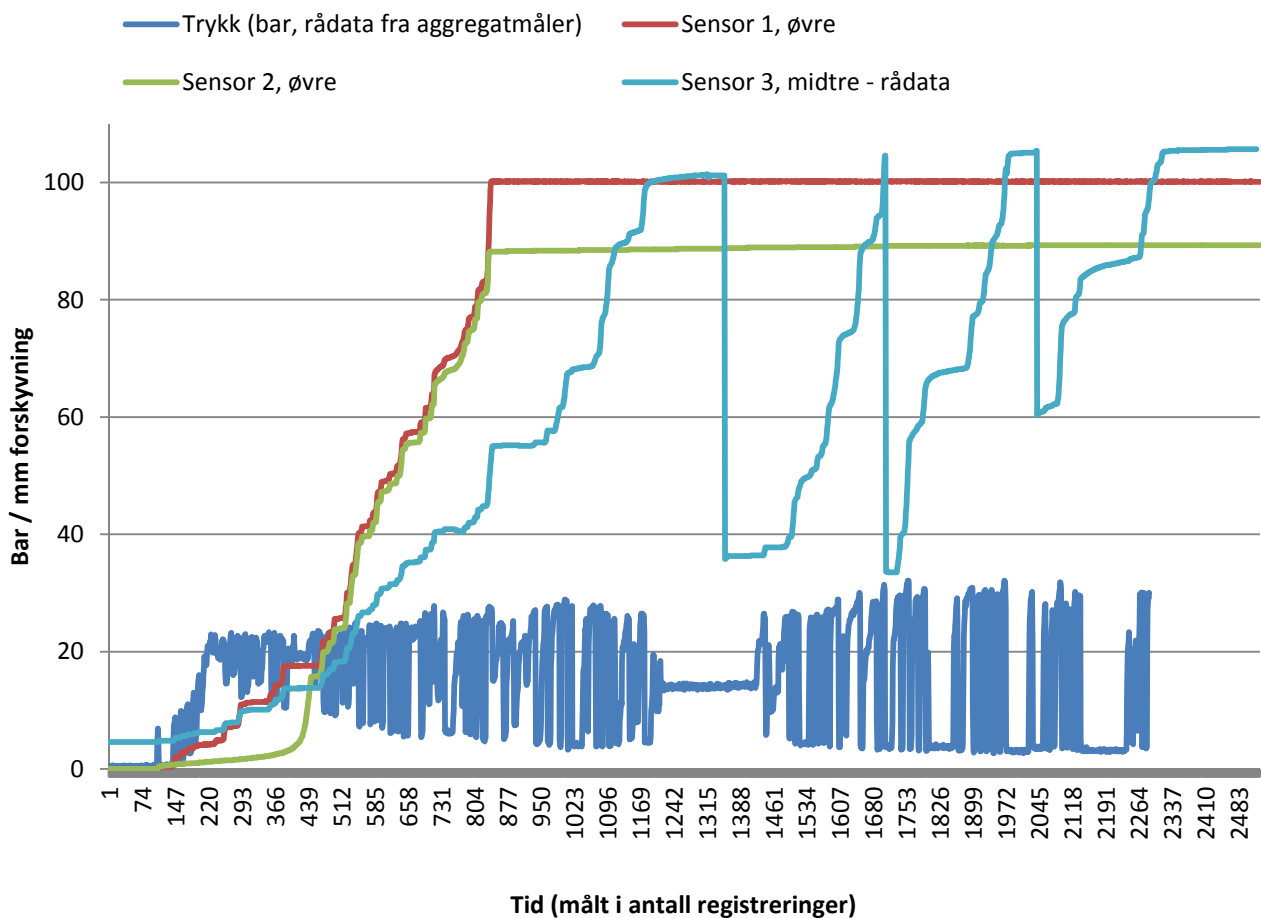
Pusslaget ble målt til å ha en gjennomsnittlig tykkelse på henholdsvis 44 og 42 mm langs veggens trykkutsatte diagonalakser. Veggen som helhet, på begge sider, hadde en gjennomsnittlig pusslagtykkelse på 40 mm. Dette gjennomsnittet gjaldt også individuelt for hver av veggene. Målingene finnes i vedlegg 9.1.3. Inspeksjon etter at forsøket var over viste at denne tykkelsen hadde lokalt svært store variasjoner.

4.3.3 Data fra skivetest

Dataene som ble innhentet underveis i skiveforsøket var fra fire ulike kilder. Forskyvningen ble målt på tre punkter med tre ulike sensorer. Trykket ble målt ved trykkkompressoren.

Den kontinuerlige datastrømmen fra disse målepunktene ble logget i en txt-fil og plottet ut underveis på en datamskin. Arbeidsplottet som man hadde å forholde seg til underveis i forsøket så slik ut:

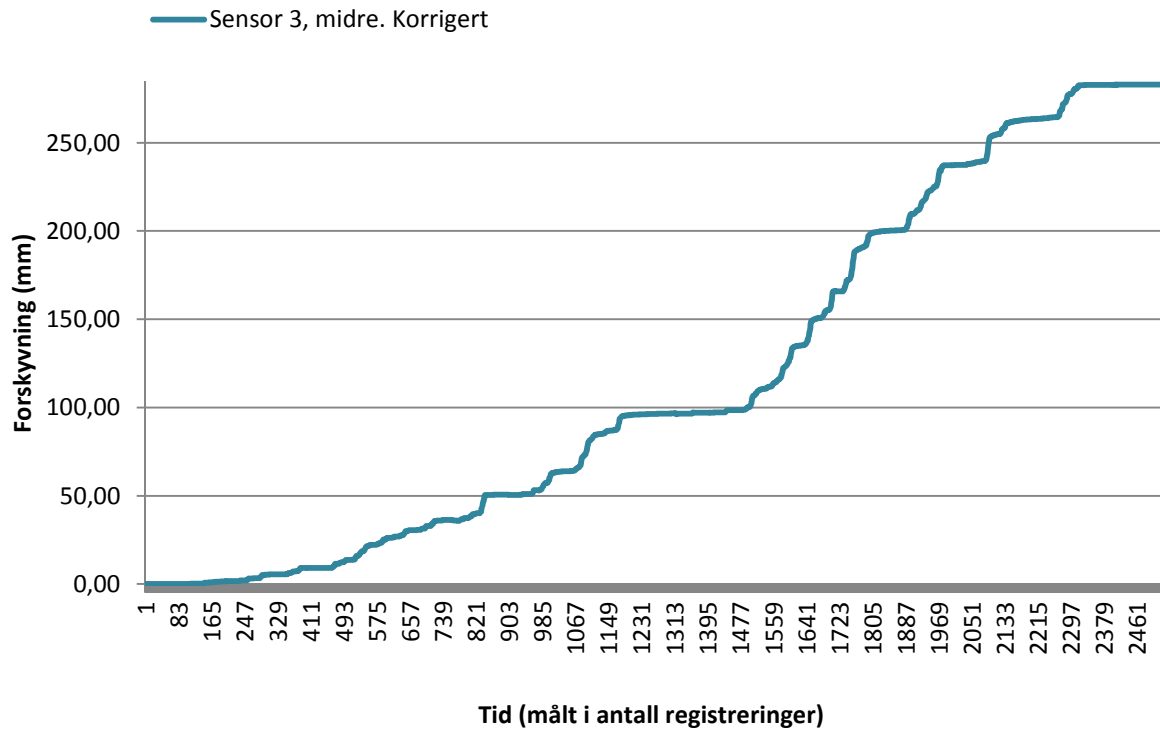
Rådata fra skivetest



Figur 4.8: Plottet slik det kom ut underveis i forsøket.

Plottet viser at målesensor 1 og 2 stoppet på henholdsvis 100,2 og 94,5 mm. Dette betyr at den totale forskyvningen var større enn sensorene var istand til å registrere. Forskjellen mellom der målesensorenes sluttet å registrere kan forklares ulik med ulikt nullpunkt. Sensor 3, som var plassert lengre ned på rammen, fortsatte målingene. Det ble underveis i forsøket besluttet å flytte denne nærmere veggen etterhvert som veggen beveget seg ut av måleområdet. Slik ville videre bevegelse bli tallfestet i målepunkt 3. Ved å korrigere denne videre bevegelsen i forhold til tidligere bevegelse fikk man en sammenhengende bevegelseskurve for målesensor 3 (jfr. nedenstående figur).

Korrigert forskyvning ved sensor 3

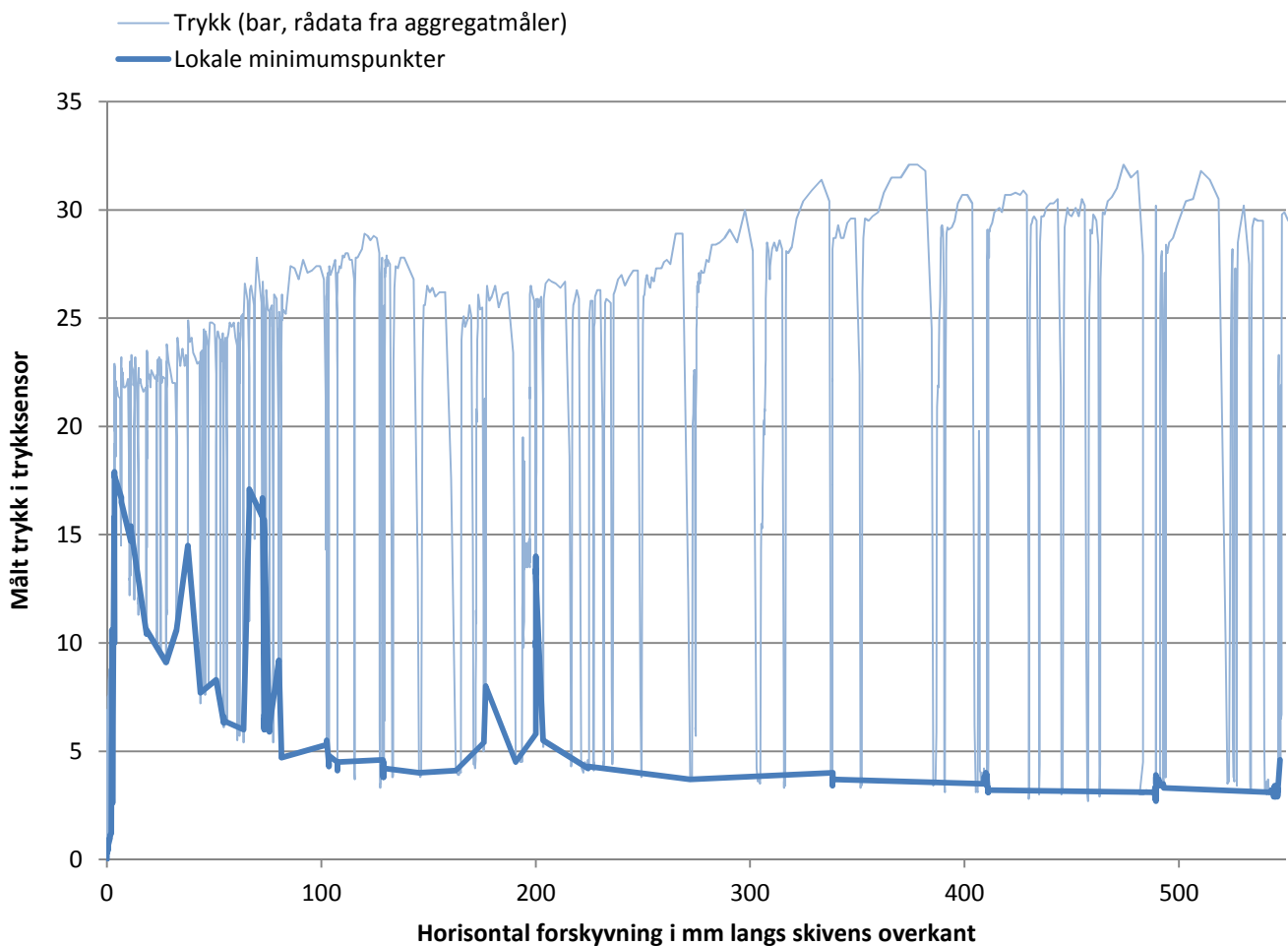


Figur 4.9: Målesensor 3 satt opp som en kontinuerlig kurve.

Data fra bevegelsessensorene ble uttrykt som vinkelforskyvningen på veggens vertikale rammedeler i forhold til en loddrett linje. Dette ble gjort for å ha en sammenlignbar størrelse for forskyvningen, uavhengig av hvor målepunktet befant seg langs vegg. Denne vinkelforskyvningen ble uttrykt som horisontal forskyvning langs skivens toppunkt; altså 2500 mm over bakkenivå.

Trykkdata ble både satt opp mot data fra målesensor 3 samt 1 og 2 i ulike grafer. Disse følger i detalj etterhvert. Først var det hensiktsmessig å se på hvilke data som skulle anvendes fra trykksensoren. Rådataene fra trykkaggregatet ble plottet ut mot måledata fra sensor 3 og gitt en lys blå farge i følgende tabell.

Hydraulisk arbeidskurve



Figur 4.10: Arbeidsdiagram for trykksensor. Satt opp mot måledata fra bevegelsessensor 3.

Målingene skulle gjøres på det statiske trykket i systemet etter trykkavlastning. Trykklasten ble påført vekselvis via en kontrollspake. Svingningene i den lyseblå grafen gjenspeiler pulsslagene i denne vekselvise lastpåføringen. Bunnpunktene i svingningene angir det statiske trykket, altså når kompressoren ikke utøvde arbeid på anlegget. Forut for forsøket var det bestemt at disse bunnpunktene skulle benyttes som uttrykk for veggens skivefasthet. Det som kjennetegnet disse aktuelle målepunktene var som følger:

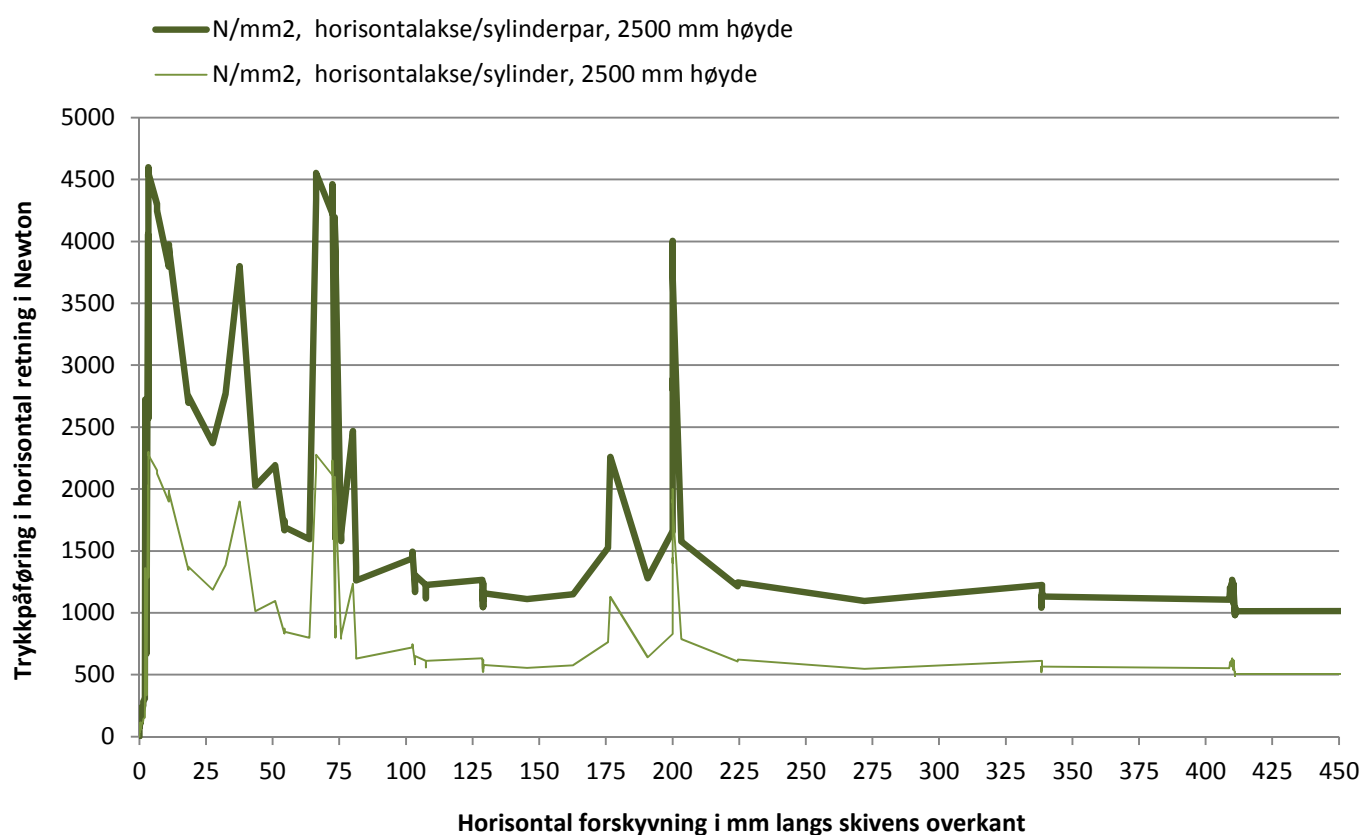
- Et lokalt minimumspunkt. Trykkbelastningen skulle være større, eller likt, på begge sider av målepunktet.
- Bevegelsen skulle være lik null. Målesensoren skulle ikke ha registrert bevegelse mellom gjeldende punkt i forhold til punktet før og etter, ettersom det ikke skjedde noen ytterligere belastning.

Dette ble lagt inn som kriterier i regnearket med bestemte grenser for hva som skulle anses som likt og ulikt. Den mørkeblå linjen i figur 4.10 plottes kun de verdier som samsvarer med de to ovennevnte

kriterier. Noen manuelle korrigeringer ble i tillegg gjort. Den mørkeblå linjen ble benyttet til videre dataanalyser som en arbeidslinje for det statiske trykket.

Rådataene forteller om det statiske trykket i et system med to sylindre, hver med en diameter på 80 mm. Trykket inne i sylindren (bar) ble omregnet til den kraft (N) sylindrene ga. Denne kraften ble så uttrykt som en horisontal kraft i høyde med skivens overkant, i henhold til momentlikevektsberegninger og trigonometriske regelmessigheter. På dette grunnlaget ble det laget et arbeidsdiagram mellom horisontal kraft og horisontal bevegelse ved 2500 millimeters høyde. I følgende figur markerer den mørke grønne linjen den statiske kraft som ble målt på begge sylindre ved ulike forskyvninger av veggen.

Kraftpåføring mot forskyvning - Veggens arbeidslinje

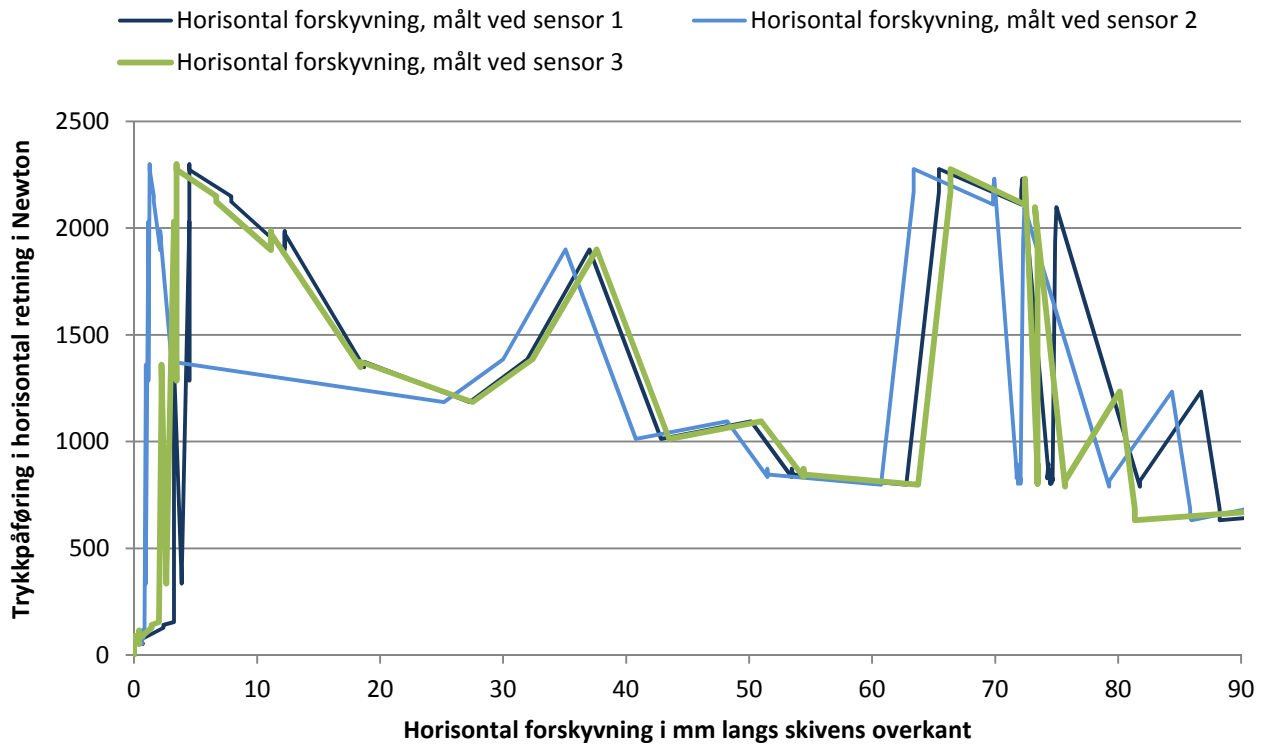


Figur 4.11: Veggens arbeidslinje. Vist både per sylinder og per sylinderpar.

Det foreligger mest nøyaktig måledata for horisontal forskyvning opp til 106 mm langs skivens toppunkt. Etter 106 mm forskyvning skjer målinger bare på målesensor 3 – halvveis nede på veggen. Etter en forskyvning på 195 millimeter ble målesensor 3 rigget opp på nytt. Dette kan ha medført noen unøyaktige målinger, ettersom sensoren først ble flyttet etter at den sluttet å registrere forskyvning (jfr. fig 4.8). Dataene for en forskyvning opp til 105 mm er vist i følgende grafe.

Forskyvning målt ved ulike sensorer

Alle måledata viser forskyvningen langs skivens toppkant



Figur 4.12: Trykk- / forskyvningskurve opp til 105 mm forskyvning. Alle tre målesensorer er vist.

Denne grafen synliggjør at bevegelse i forhold til trykkbelastning har vært ujevn i toppen av veggen. Forskjellen spriker mest i begynnelsen, men jevner seg ut etterhvert. Dette samsvarer også med fig. (4.8 første graf) og kan ha noe å gjøre med en innledende slark i systemet.

4.3.4 Bruddform etter skivetest

Følgende to bilder viser veggen etter endt belastning. Forskyvningen er her på over 588 mm.



Figur 4.13: Veggen ved maksimal forskyvning. Sett fra babord side i forhold til kraftretning.



Figur 4.14: Veggen ved maksimal forskyvning. Sett fra styrbord side i forhold til kraftretning.

Bildene viser tydelig oppsprekking diagonalt i underkant av veggens trykkdiagonal. Ingen oppsprekning på overkant av trykkdiagonalen.

I hjørnene av trykkdiagonalen (eller trykkstaget, jfr fig. 2.6) var det store områder med knusning av pussen.

Noen andre forhold som synliggjorde seg underveis i trykktesten er også verdt å bemerke:

- Oppløftning. Summen av alle hulrom i vertikal retning gjorde at skiven fikk et oppløft før det ble registrert skivebelastning. Oppløftet var i størrelsesorden 1-3 cm ved nedre hjørner.
- Forskyvning ut av planet. Pusslaget – samt veggen som helhet – fikk en forskyvning i babord retning. Dette skjedde gradvis. Pusslagets øvre hjørne mot kraftinnføringen trengte seg inn bak trestenderen. Dette gjorde at trykkreftene ikke ble overført direkte i pusslagets øvre hjørne under hele forsøket.
- Halmballenes forskyvning var tilsynelatende ulik enn forutsett. Halmballene beholdt i stor grad sin utgangsposisjon, men med sammenpresning i hjørnene.

4.3.5 Teoretisk skivekapasitet beregnet med gjeldende forutsetninger

Det følgende er beregnet i henhold til metoden presentert under kapittel 2.3.7. Følgende variabler er byttet ut:

- Veggtykkelse: 40 mm
- Leirpussens trykkfasthet: 1,6 N/mm².

Dette gir:

- Skivens kapasitans skivelast (Q_r): 13,6 kN
- Skjærkapasitet (F_v): 5,4 N/mm.

5 Diskusjon

5.1 Pussprøver

5.1.1 Diskusjon rundt metoden

Pussprøvene syntes å gi en god førstehånds indikasjon på ulike mørtelresepters kvaliteter. Den synliggjorde virkningene av ulike tilsatser og blandingsforhold. Pussprøvenes store overflate i forhold til tykkelse gjorde oppsprekningstendenser og svinn lett å oppdage.

Det er imidlertid en metode som er sårbar for varierende prøve kvalitet ettersom det ikke gjøres gjentak på hver enkelt prøve.

Nøyaktigheten rundt oppmålingen av tilslag framsto som lite tilfredsstillende. Flere prøver virket påvirket av et varierende blandingsforhold i mørtelen. Dette ga tidvis uventede resultater som spriker fra teorien som har blitt presentert om leir. For eksempel gir 1:4 leir:sand mer krymping enn 1:3 leir:sand. Dette skyldes trolig et ulikt vanninnhold eller et unøyaktig tilmålt leirinnhold. Det ville for liknende framtidige forsøk vært spesielt interessant å registrere fuktighetsinnholdet i mørtelen mer nøyaktig. Det bør også vurderes om man i større grad burde benyttet vekt for tilmåling av korrekt andel tilslag i motsetning til volumberegning.

For dette prosjektet var ikke overflateslitasje- og erosjonsegenskaper av størst interesse, men det var viktig å ha fokus også på dette, ettersom det beskriver leirblandingens egnethet som puss.

Det ligger i metodens natur at rangeringsformen av pussprøvenes egenskaper er noe diffus. Et referansegrunnlag i form av en standard pussprøve ville hjulpet på å kalibrere følelsen for leiren mellom hver utprøving. Utprøvingformen er imidlertid også noe vag. Dette gjør at nøyaktighetsnivået rundt rangeringen passer fint med nøyaktighetsnivået til utprøvingen. Å heve nøyaktighetsnivået rundt utprøvingmetode og rangeringsskalaen antas å tilføre forsøket lite ny informasjon.

Formålet med forsøket var først og fremst å samle noen grove karakteristika ved ulike pussblandinger. Det største hinderet for å oppnå dette var unøyaktigheten rundt tilsats av vann og tilslag. Forsøkene dannet et godt grunnlag for videre arbeider med leira og setting av kubepøver. Poengskalaen ga en formålstjenlig indikasjon på omtrentlige verdier og sammenhenger mellom ulike tilslag.

5.1.2 Diskusjon rundt resultater

Resultatene fra pussprøveforsøkene samsvarer i stor grad med den teori som knytter seg til leiras oppførsel og styrkeegenskaper. Der resultatene unntaksvis viser uoverensstemmelse med leirteori antas det at dette har bakgrunn i unøyaktigheter ved metoden.

Det ble besluttet å legge funnene i pussprøveforsøket til grunn for videre arbeid og forsøk. Et blandingsforhold på 1:2 leir:mineralsk tilslag så ut til å gi et fint forhold mellom bruddstyrke og svinn. Reduserte man leireinnholdet ytterligere falt bruddstyrken drastisk, samtidig som svinn bare ble moderat redusert. Med tanke på et endelig fullskalaforsøk var det viktig å finne fram til en puss som var sterk og ga lite svinn. Styrken trengtes til å ta imot skivelasten. Svinntendensen måtte være lav for å få en sammenhengende veggskive som ble liggende tett inntil veggstendere.

Ulike leirtyper oppfører seg ulikt. Det var derfor viktig å ha gjort disse pussundersøkelsene for å vite hvordan den innhentede leiren ville oppføre seg på veggen i forskjellige blandingsforhold. Dette gjelder spesielt for de forhold som ikke direkte eller indirekte undersøkes videre, som erosjon, overflateslitasje. I hovedsak bruddstyrke, men også svinn og oppsprekking, vil undersøkes ved videre forsøk.

Undersøkelser på byggeplass skjer i hovedsak gjennom pussprøveforsøk ettersom tilgangen på annet prøveutstyr som regel vil være begrenset. En slik pussprøveundersøkelse som denne kan brukes som tillegg til data fra videre undersøkelser for å gi et bedre sammenligningsgrunnlag til undersøkelser på byggeplass.

5.2 Små trykkprøver

5.2.1 Statistiske betraktninger

Basert på resulterende datasett fra trykktesting ble det kjørt en Anova variansanalyse av oppnådd trykkfasthet vurdert etter prøvetype. En resulterende P-verdi på mindre enn 0,01 % gir en sannsynlighet mindre enn 0,0001 for at gjennomsnittet for alle prøvetypene skal være likt (forkasting av null-hypotesen). Det er dermed med statistisk grunnlag at man kan si at prøvetypene var forskjellige. Dette ga grunnlag for å kjøre en Tukey-Kramer-analyse som ser på hvilke prøvetyper som er signifikant forskjellige fra hverandre. Tukey-Kramer-testen sammenligner to og to prøvesnitt for å se om forskjellen mellom dem er større enn forventet tillatt standardavvik. (Graphpad FAQ, s.a og Tukey-Kramer (s.a.)

På den statistiske analysen scorer den ordinære pussblandingen i forholdet 1:2 leire:sand høyt. 9 pussblandinger er signifikant dårligere enn 1:2-mørtelen. Ingen leireblanding kan med statistisk sikkerhet sies å være bedre enn denne mørtelen uten fibertilsetning; *fine prøver*.

Til tross for manglende signifikans er det en forskjell i gjennomsnittlig trykkfasthet mellom de fem beste prøvene. Man kan tenke at dette synliggjør en tendens hvor tilsats av fiber øker trykkstyrken. Forskjellene mellom snittet av disse fem beste prøvene er imidlertid så små at den ikke gir statistisk utslag med en α -verdi på 0,05. Man kan altså ikke på vitenskapelig grunnlag, basert på disse forutsetningene, konkludere med at tilsats av fiber øker pussens trykkstyrke.

Et høyere antall gjentak i hver prøveserie, med tilsvarende spredning i oppnådd trykkfasthet, ville gitt et større statistisk datagrunnlag og ha redusert standardavvikets størrelse. *Fine prøver* viste seg å ha en spredning slik at standardavvik ble redusert ved 12 gjentak. Dersom dette også gjelder de øvrige prøveserier kunne man, etter mange nok gjentak, konkludere med at fiber bidrar til en signifikant styrkeforbedring av leirpussen.

Dersom man antar at de ulike prøveseriene vil ha den samme spredning av målte verdier, ved flere gjentak enn her utført, kan man konkludere med at tilsetning av mye fiber øker trykkstyrken. Det antas at et slikt konklusjonsgrunnlag vil være tilstrekkelig for de fleste halmbyggere.

5.2.2 Vurdering av kvaliteten på forsøket

Kubeprovne ble satt i to omganger med en dags mellomrom. Prøver med fibertilsetning ble satt dag én og øvrige prøver ble satt dag to. Det er påfallende hvor mye større fuktinnholdet var i mørtelblandingen fra dag to enn fra dag én. Dette høye fuktinnholdet gjorde at noen av prøvene fra dag to var mindre formfaste. Høyt fuktinnhold under prøvesetting er forøvrig heller ikke gunstig med tanke på oppnådd tørrfasthet. Dette er begge faktorer som kan tyde på at målte verdier fra prøver satt dag to er uforholdsmessig lave. Imidlertid var det ventet at oppnådd trykkfasthet skulle være dårligere for prøver tilsatt henholdsvis lecakuler og mye sand enn prøver med lite sand og tilsatt fiber. Teoretisk fuktinnhold i en 1:2 leire:sand-prøve, basert på tall fra kapittel 3.1 er 10,62 %. Det kan tenkes to forklaringer på det høye fuktinnholdet fra dag to:

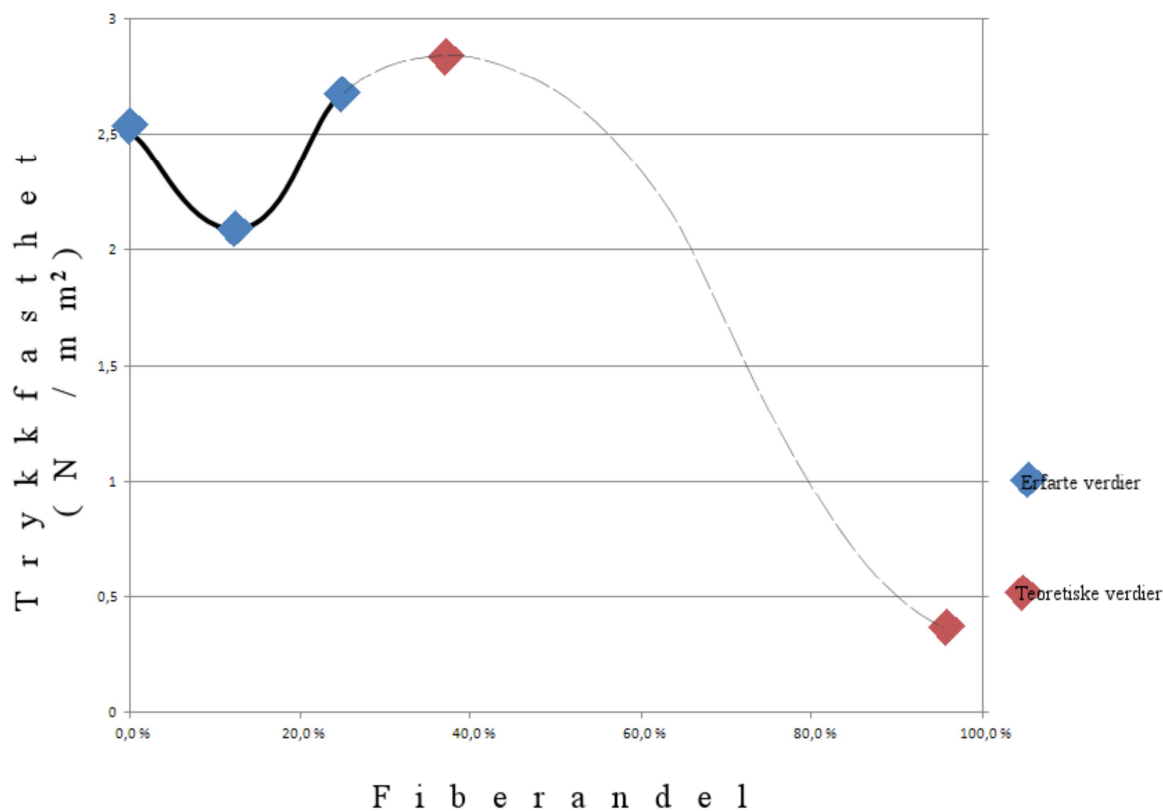
1. Prøver fra dag to ble satt uten fiber. Muligens øker fiberet prøvens evne til å holde på fuktighet i tørr tilstand. Med en tørke-veie-metode, som anvendtes, vil dette vil gi utslag i et høyere registrert fuktighetsinnhold. Dette fordi det kun vekten av det fordampede vannet ble målt. Ifølge dette resonnementet vil prøvene med fiber bli målt til å ha en liten fuktighetsdifferanse mellom tørr og plastisk tilstand. Dette virker i liten grad sannsynlig ettersom vektdifferansen mellom tørre og våte prøver fra dag 1 lå svært nært opptil den differansen som var ventet, basert på det fuktighetsinnhold som var initielt i hver av mørtelens ingredienser.
2. Ujevnt vanninnhold i leira: Leira som ble brukt i prøvene ble eltet sammen med vann i store batcher forut for lagring. Forholdet mellom leir og vann ble ikke målt med hensyn på vekt, men ble vurdert skjønnsmessig etter plastisiteten til blandingen. Kanskje har dette vært en metode som har vært for unøyaktig og gjort at vanninnholdet mellom de ulike batchene har hatt en stor variasjon.

Ettersom det var ventet at prøvene fra dag to skulle være dårligere enn fra dag én, ble denne forskjellen i prøve kvalitet ikke vektlagt i stor grad, ettersom det overordnede målet var å finne fram til den mest solide leirpussen for anvendelse i fullskalaforsøket.

5.2.3 Betraktninger rundt tilsetning av fiber

Det var forventet at tilsetning av fiber ville styrke leirpussen med hensyn på trykk. Kubeforsøkene viser imidlertid at sammenhengen er mer kompleks og at mengden fiber har en stor innvirkning på fastheten. Det er store forskjeller mellom prøvene med henholdsvis 0,43 (12,5 %) og 0,86 (22,3%) deler tilsatt fiber per del leire. Forsøkene med 0,43 deler fiber har konsekvent en lavere gjennomsnittlig trykkfasthet. Forskjellen mellom mye og lite halm er så stor at den er statistisk signifikant. Den generelle trenden er altså at litt fiber (12,5) reduserer styrken, mens mye fiber (22,3%) gjør det motsatte. Det kan tenkes at det finnes en optimal fibermengde som kan finnes gjennom forsøk. Hvis man tar utgangspunkt i at en prøve med stor mengde tilsatt fiber (nærmere 100%) har svært lav trykkfasthet vil man få en kurve som i nedenstående figur. Gitt at det forholder seg slik som i nedenstående kurve ville det vært interessant å se hva slags resultater man kunne oppnådd med høyere fiberandel. Det kan tenkes at kubeprovne har inneholdt for lite fiber i forhold til hva som er optimalt, og at man med økt fiber kunne oppnådd en større trykkfasthet.

Forhold mellom tilsats av fiber (halm) og trykkfasthet



Figur: Trykkfasthet satt opp mot andel iblandet fiber i et prøvestykke.

Resultater som gikk fram av forsøkene er i ovenstående figur markert med blått. Dette er snittet av prøver med henholdsvis 0; 12,5 og 22,3 prosentinnhold av halmfiber.

Verdiene som ble målt i forsøket viser at trykkstyrken først synker for deretter å stige, etterhvert som iblandingen av fiber øker.

For figurens skyld påstås det her at en leirprøve med tilnærmet 100% fiberinnhold har en relativt lav trykkstyrke (markert som rødt punkt i ytterste høyre av figur). Dette indikerer at det finnes, med hensyn på trykkstyrke, en optimal mengde av tilsatt fiber.

Prøvene iblandet hestehår fikk en lav volummessig andel tilsatt fiber. Disse scoret begge lavere enn prøven uten fibertilsetning. Trenden er forøvrig lik som de andre fibertilsetningene: Lite fiber gir lav styrke. Mye fiber øker styrken ytterligere. Her ville det vært interessant å utforske en større fiberandel for å se om hestehår hadde evne til å styrke leirpussen og ikke bare reduserte den.

5.3 Skiveforsøk

5.3.1 Diskusjon rundt leirpussens trykkstyrke.

Målte trykkfasthetsverdier for leirpussen var betydelig lavere enn de som ble målt gjennom kubeforsøkene på tilsvarende mørtel. Noe av dette kan nok forklares med et pussmørtelen hadde et høyere væskeinnhold enn kubeprovne. Høyt vanninnhold virker inn på tørkeprosessen og antas å gjøre prøven mer porøs enn en forholdsvis hardt stampet prøve med mindre vanninnhold. Det er usikkert hvorvidt alt kan forklares med ulikt væskeinnhold. Muligens er en blandingsmetode basert på volum lite egnet i forskningsøyemed. Dette gir unødvendig høye usikkerhetsmomenter rundt blandingsforholdene. Et alternativ kunne vært å utføre tilmålingen av tilslag basert på vekt. Dette ville gitt en større nøyaktighet.

På den annen side er noe av hensikten med et fullskalaforsøk å studere hvordan et teoretiske grunnlag arter seg i praksis under virkelige forhold. I praksis på byggeplass blandes en mørtel basert på oppmåling av volum. Det er lite tenkelig at denne praksisen vil endre seg. Følger man dette resonnementet videre kan man se på det som gunstig at verdiene er såpass lave. Dette gir grunnlag for å anta at verdiene ligger i nedre ytterkant av hva som kan anses som forventet trykkapasitet basert på volummåling. Slik vil testen representere en god minimumsverdi, ettersom veggen sannsynligvis normalt vil være sterkere. Det statistiske grunnlaget for å gjøre en slik konklusjon er imidlertid ikke til stede, og man må anta at veggpussen har en representativ gjennomsnittlig trykkfasthet.

5.3.2 Bruddform

Bruddformen var svært lik antatt. Lokal knusning i hjørnene markerer hvor lastinnføringen finner sted. Stor oppsprekning langsmed skivens trykkdiagonal skyldes tverrkontraksjoner og bestemmes av veggens skjærstyrke. Begge deler vitner om at en modellering av veggpussen som et fagverk ikke er helt urealistisk.

5.3.3 Statisk vs dynamisk trykkmåling.

Forskjellen var stor mellom det målte statiske trykket og det trykket som krevdes for å besørge bevegelse og deformasjon av veggen; det dynamiske trykket. Dette opptredende gapet var ikke ideelt. Dersom den store forskjellen skyldtes trykkfall i slanger og anlegg forøvrig vill det teoretisk sett vært mulig å redusere denne trykkforskjellen ved å redusere tempoet av væsketilstrømmingen i det hydrauliske anlegget noe. Det var imidlertid ikke mulig i praksis.

Dersom den store forskjellen mellom målt dynamisk og statisk trykk kun skyldtes trykkfall i slangene skulle det videre være grunn til å tro at det var en form for skalerbart forhold mellom dem. Grafen tyder på at det motsatte var tilfelle. En økende dynamisk trykkbelastning – i forhold til forskyvning – skjer eksempelvis samtidig med at det statiske trykket reduseres. Dette reiser spørsmålet om statisk trykkmåling var en fullgod metode for å tallfeste veggens kapasitet.

Den største verdien som kan avleses på den statiske arbeidslinjen gir en skivelast på 4,56 kN. Dette er den første registrerte toppen i kurven og finner sted etter en forskyvning lik 1 mm og 3 mm i sensorene 2 og 1. Gitt forskyvningens størrelse er det derfor ikke snakk om et brudd. Ved en

forskyvning av denne størrelsen vil det være mer nærliggende å anta at det er snakk om en initiell slark som gir seg. At ingen laster større enn denne kan leses ut fra den statiske arbeidslinjen virker besynderlig.

Forholdet mellom statisk og dynamisk trykkmåling ble derfor overfladisk undersøkt ved å bruke Otto-Wolpert-maskinen (kap.3.3.2.3.3) på et lite utvalg av kubepøver. Trykkpåføringen i dette forsøket ble gitt en pause underveis i sammentrykningen og stempelet ble låst i en gitt posisjon. Dette ble gjort før maksimal bruddlast var oppnådd. I samtlige tilfeller fortsatte bruddutviklingen etter at stempelet var blitt låst. Dette ga seg til kjenne ved en fortsatt smuldrende lyd i prøvestykket og kontinuerlig trykkfall i det posisjonslåste trykkstempelet. En lignende reaksjon var ikke registrert underveis i forsøket.

Her er omtalt indisier som tyder på at statisk trykkmåling er en dårlig metode for å måle bruddstyrke i tørket leire og at målingene gjort med aggregatet ikke viser leirpussens trykkstyrke. Et annet alternativ til å benytte det statiske trykket er å betrakte den lyseblå kurven i figur 4.10 sine toppunkter. Det kan tenkes at disse forteller mer om trykkapasitet enn det statiske trykket. Den ville gitt en mer forventningstro kurve med to toppunkter; ett for leirskivens brudd og et annet for sammentrykning av selve halmballkjernen.

Det ble totalt ansett å være fire muligheter for måledataenes videre behandling:

1. Anta at de statiske trykkmålinger er korrekte og konkludere på grunnlag av disse.

Dette vil gi verdier som lite trolig vil være overdimensjonerte. Det ble ikke registrert noen bevegelse i vegg under statisk belastning. Det betyr at veggkonstruksjonen kan tåle en slik last også over tid. Etersom avstivning av et hus i siste instans handler om sikring mot kollaps er det et poeng at man ikke konkluderer på grunnlag av urealistisk høye verdier. Argumente imot bruk av disse data er at de later til å fortelle lite om veggens oppførsel.

2. Anta at det avleste dynamiske trykket ligger svært nært opptil selve trykket i sylindren.

Man bruker altså den dynamiske trykklasten direkte, som veggens arbeidslinje. Faren er her at registrerte verdier er for høye. Det vil være lite gunstig. Argumenter for å bruke disse dataene er at de tegner en arbeidslinje som virker realistisk i forhold til forventet oppførsel.

3. Kalibrere sensoren ved aggregatet.

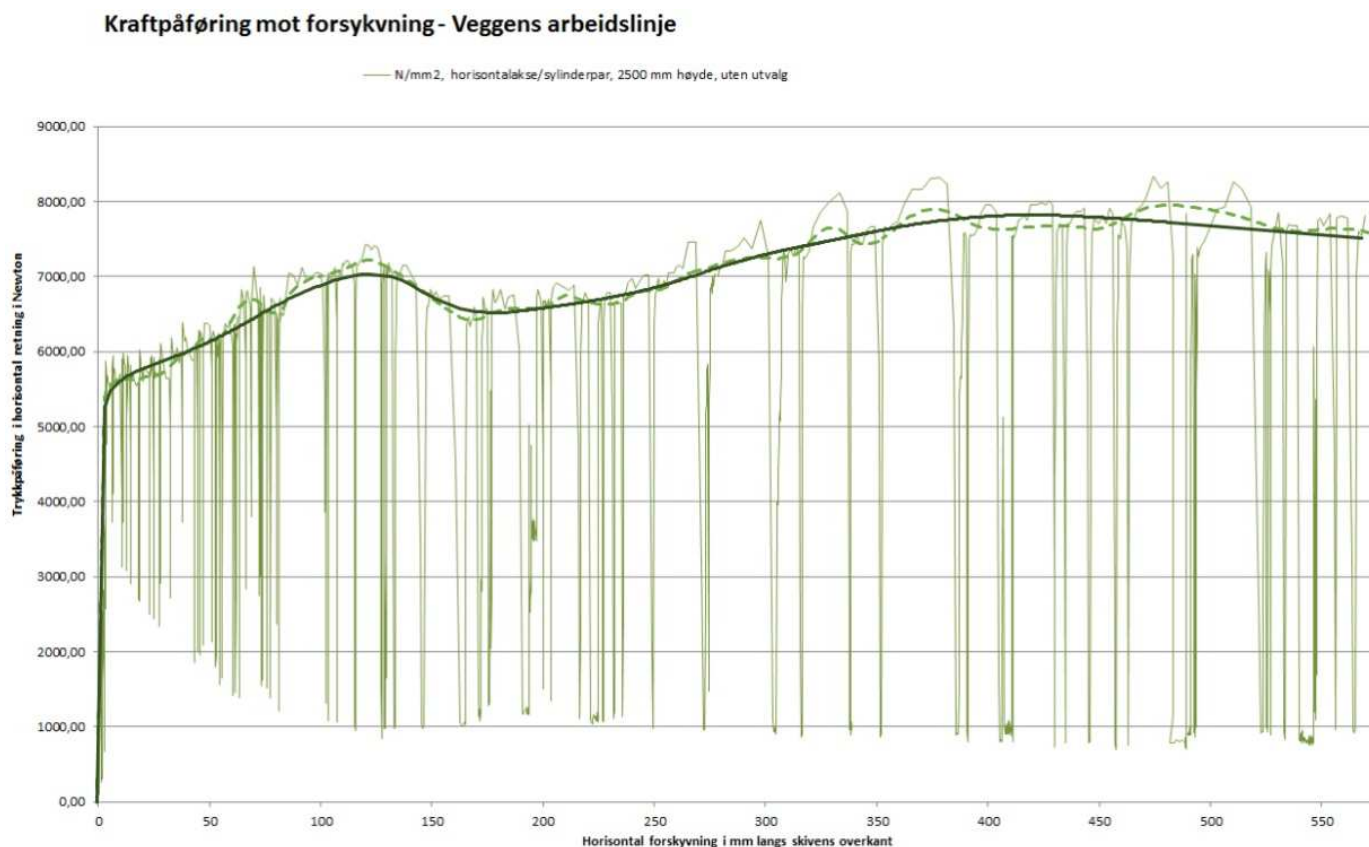
Med hjelp av etterinstallerte trykksensorer kunne man se for seg å registrere forskjellen mellom avlest trykk på aggregatets trykkmåler og de etterinstallerte trykksensorene. Dette gir grunnlag for å si noe om forventningene til det reelle opptredende trykket i stemplens innfestning basert på avlesninger fra aggregatets trykkmåler. Forholdene ved IMT lå imidlertid ikke til rette for etterkalibrering

4. Forkaste tallmaterialet.

Alternativ 2 ble valgt.

5.3.4 Diskusjon – dersom dynamiske måledata anvendes

Det ble forsøkt å gi en grafe som skildrer den dynamiske trykkbelastningen. Snittet av lokale maksimumspunkter i datasettet ga grunnlag for dette. Grafen ble tegnet basert på visuelle vurderinger av tallmaterialet.



Figur 5.1: Mørk grønn kurve viser en tilnærming til den dynamiske lastpåføringen.

Veggens statiske arbeidslinje har en form som til en viss grad kan minne om den i fig. 2.7. Erfaring fra kubeprovne viste at denne kurven stemte bra for små kuber av leirpuss, det er derfor grunn til å tro at den også vil bære visse likhetstrekk med arbeidslinjen for en leirskive.

Grafen viser to toppunkter. Gitt halmballenes bruddform, som skjedde ved sammenpressning heller enn forskyvning, er det grunn til å tro at toppunkt nummer to inntreffer som følge av motreaksjoner i halmballkjernen. Dette er lite interessant som avstivningsfenomen mot vindlast, ettersom toppunktet på rundt 7750 N inntreffer ved 400 mm forskyvning.

Det første toppunktet viser sannsynlig leirpussens brudd. Utstyret som ble satt til å filme sekvensen sviktet. Det var derfor ikke mulig i etterkant å sammenligne tidspunktet for dette toppunktet med evt. bruddutvikling. Første toppunkt inntreffer etter 120 mm forskyvning og måler ifølge gjeldende vurderinger 7000 N. Per skive av leirpuss blir dette 3500 N. Veggens skjærkapasitet (F_v) blir: 2,8 N/mm.

Dette er rundt en halvering i forhold til teoretisk utregnet skivekapasitet (kap. 4.3.5)

Noe av denne forskjellen kan muligens tilskrives at trykkinnføringen kun foregikk på én av veggens to skiver under store deler av forsøket. Hvorvidt beregningsmetoden presentert i kapittel 2.3.7 er

hensiktsmessig, er uvisst. Dette synliggjøres først ved flere gjentak av skiveforsøket. Men det kan antas at den gir en slags pekepinn om forventninger.

Veggen som helhet yter et stort arbeid mot forskyvning. Majoriteten av dette arbeidet ligger etter at den største oppsprekningen har funnet sted i leirpussen. Store flak av leirpussen var fortsatt intakte etter at leirpussen hadde mistet sin maksimale styrke. Dette har antakelig gitt grunnlag for et samvirke mellom halm og leirpuss i deler av konstruksjonen. Hvilket stivhetsbidrag som kommer fra halmballene alene er ukjent. Man kan imidlertid si at veggkonstruksjonen som helhet viser tendenser til å oppføre seg som et seigt materiale. Det vil være sikkerhetsmessig gunstig at tiden mellom brudd i avstivende konstruksjonselementer til total kollaps av hele bygget er lengst mulig.

5.3.5 Tilfredsstillende leirskiven forskriftenes krav til avstivning?

Dersom man går utifra at ovennevnte tall stemmer vil leirskivens forsøksbestemte skjærkapasitet overstige den dimensjonerende belastningen fra det moderat vindutsatte eksempelhuset i kapittel 2.3.5. Dette gjelder imidlertid for sammenhengende skiver uten gjennomføringer i form av dører og vinduer og hvor veggskiven får virke over en sammenhengende høyde tilsvarende 2500 mm. Som regel vil dette være lite gunstig.

Leirpussens skjærkapasitet på 2,8 N/mm ligger svært nært opptil den for 9 mm gipsplater på 3,0 N/mm. Bruk av gipsplater gjør at det, som beskrevet i kapittel 2.3.5, ikke kreves beregninger på stabilitet ved horisontal vindbelastning.

Det antas at en økning av leirpussens tykkelse vil bidra til en styrket leirskive. Dersom kravene skal innfris med tilbørlig god margin bør det vurderes om det er mulig å gå opp i leirtykkelse. Flere forsøk som ser på dette bør gjennomføres.

5.3.6 Diskusjon rundt utførelse og metode

Forut for destruksjonen av halmveggen var flere fra referansegruppen (jfr. kap. 1.4) på befarig.

Pusskvaliteten ble vurdert generelt som svært god, med en spesielt sterk overflate og puss. Flere av halmbyggerne var forbløffet over hardheten i pussen, hvilket kan tyde på at den er styrkemessig lite representativ for resten av halmhusene som allerede er blitt oppført.

Det var usikkert hvordan det ville fungere med tetting av sprekker. Forsøket viste imidlertid at leirpussen oppførte seg som en homogen skive, med lite gjenoppsprekning av tette sprekker. Det var videre svært lite tegn til delaminering mellom de to ulike pusslagene.

Selve testjiggen ga den bruddutvikling man var ute etter, og egnet seg godt til skiveforsøk.

I lys av de erfaringer som ble høstet fra forsøket var det ønskelig at noen ting var blitt gjort annerledes:

- I større grad forhindre oppløft av skiven. Dette kunne vært gjort ved å rette mer fokus mot en tett overgang mellom veggen og stålrammen.

- Vurdere om bruken av trestendere var hensiktsmessig. Forsøket resulterte innledningsvis med et løft av veggens to leirpusskiver. Resultatet av et slikt oppløft var forskyvning av skivene i forhold til trestenderne og dermed også en nedbrytning av heftsonen mellom dem. Stivhetsbidraget fra heften mellom trevirke og leire framsto dermed som minimal. Dessuten kompliserte trestenderne modellen, ved at det ene pusslaget beveget seg bak trestenderen og ikke tok imot trykkrefter.
- Vurdere en tilmålingsprosess som baserer seg på vekt framfor volum. Dette bør isåfall kombineres med nøye overvåking av fuktinnholdet i både leir og tilslag.
- Vurdere en mørtel med mindre iblandet leir. Dette vil gi mindre oppsprekning og en vegg som antakeligvis er mer representativ for de hus som allerede er bygget.
- Sikte tilslaget dersom sprøyte anvendes.
- Lengre bevegelsessensorer. Målesensorenes bevegelsesmarginer var for små. En benyttelse av sensor 3 er blitt gjort, men anses som ugunstig. Dette fordi den var plassert så langt unna veggens lastinnføring.
- Bedre trykkmåling. Trykkbelastningen burde vært målt ved innfestningen av sylindere i stålrammen.
- Undersøke vegger med tykkere leirpuss.

6 Konklusjon

6.1 Pussprøver

Formålet med pussprøvene var å skape en enkel oversikt over ulike tilsags effekter på leira. Dette med tanke på forestående fullskalaforsøk.

Blant de pussprøver som ble satt viste det seg å fungere godt med et leirinnhold som tilsvarte en halvpart av iblandet sandinnhold. Dette blandingsforholdet ble derfor valgt som utgangspunkt for videre undersøkelser.

I tillegg til å undersøke egnet leirinnhold i mørtelen var det også interessant å notere seg følgende tendenser:

- Reduksjon av leire reduserer oppsprekning og svinn.
- Tilslag av subus reduserer svinn i større grad enn tilslag av sand.
- Sand gir mindre oppsprekning enn Subus.
- Tilsats av fiber reduserer svinn og oppsprekning.

6.2 Små trykkprøver

Formålet med små trykkprøver var å finne fram til en sterk mørtel som ville være velegnet til bruk i en leirskive. Videre var det viktig å tallfeste mørtelens styrkemessige egenskaper for å bedre se sammenhengen mellom trykk- og skjærkapasitet i forhold til styrke gjennom skivevirkning i et veggssystem.

Forsøket ga nyttige resultater som var anvendelige til fullskalaforsøket. Trykkprøvingen ga en bruddform som indikerte vellykkede målinger i samtlige prøvestykker. Sammenhenger mellom ulike tilslag ble tilstrekkelig synliggjort og ga et grunnlag for å velge pussblanding fullskalaforsøket.

Innledningsvis var forventningene til kubeprovne i størrelsesorden $0,8-2 \text{ N/mm}^2$. Middelerdiene for prøvene var slik å betrakte som relativt høye. Gode resultater – opptil $2,77 \text{ N/m}^2$ kunne oppnås med riktig mørtelresept. Antall prøver som ble utsatt for trykktesting var for lavt til å gjøre konklusjoner om styrkemessige forskjeller på statistisk grunnlag. Likevel kunne prøveresultatene tyde på at det var klare tendenser som pekte mot at ulike pussblandinger var bedre enn andre.

Med bakgrunn i trykktesting av kubeprovne ble resepten med en høy andel tilsatt isofiber valgt som mørtel for fullskalaforskene. Denne mørtelen ga de beste fasthetsverdier. Den var også lett å bearbeide. Tidligere undersøkelse viste at tilsats av fiber bidro til å redusere svinn. Det ble antatt at dette også ville gjelde isofiber. Videre ville en mørtel uten tilsats av store fiber eller store mineralske tilsetninger være mer anvendelig i kombinasjon med pussprøyte, hvor store gjenstander kan tette igjen dysene.

6.3 Skiveforsøk

Hensikten med skiveforsøket var å se om leirpussen kunne stive av en konstruksjon slik at det tåler påkjenningene fra horisontallaster.

Under gjeldende testforhold viste leirskiven en skjærkapasitet (F_v) på 2,8 N/mm. Dette viser at leirpussen innehar en betydelig styrke. For eksempelhuset som nevnes i kapittel 2.3.5 yter veggen en styrke større enn dimensjonert lastpåkjenning. Marginene er imidlertid så små at det vil være ønskelig å øke disse.

Statisk måling, som ble anvendt som målemetode i dette forsøket, viste seg å være en dårlig målemetode for leir. Datamateriale fra trykksensoren under dynamisk økende trykkbelastning ble derfor anvendt med de begrensninger det innebærer.

Metoden for å studere skivevirkning i en leirpuss var, bortsett fra de måletekniske detaljer, tilfredstillende. Bruddform antydte at man fikk målt kreftene forbundet med skivevirkningen i leiren. Noen justeringer vil imidlertid anbefales for videre forsøk. Dette er nevnt i kap 5.3.

Usikkerhet rundt måledataene og uheldig utførelse av selve halmveggen gjør at dette forsøket bør betraktes kun som preliminært for framtidige forsøk av samme sort.

7 Videre arbeid

Måledataene i dette forsøket kan tyde på at det er realistisk at leirpussens avstivningsbidrag møter forskriftenes krav til vindbelastning. Det vil derfor være interessant med videre forsøk. Her er pekt ut noen mulige veier videre:

1. Dokumentasjonsmengden rundt avstivningseffekten bør økes. Flere vegger av samme sort bør testes for å gi et forventningsrett gjennomsnitt for leirpuss av en gitt type. Disse undersøkelsene bør ta hensyn til erfaringer som er nevnt i kap. 5.3.
2. For å gjøre dette forsøkets måledata gyldig bør sensoren i jiggen kalibreres.
3. Forsøk med bare halmballer. Skiveforsøk bare på halmballer vil kunne si noe om avstivningsbidraget fra halmballene alene. Sett i sammenheng med prøver på vegger med halm og leire kan samvirket mellom halm og leire bedre tallfestes.
4. Vurdere om små skiveprøver er mer hensiktsmessig. Små skiveprøver ble vurdert teoretisk i kap. 3.4.1. Arbeidet involvert med byggingen av en fullskalavegg var nærmere 60 timer og materialbruken var stor. Det vil være interessant å redusere begge deler.
5. Studere fibertilsetninger i leirmørtler for å finne fram til et optimalt blandingsforhold med hensyn på styrke (jfr kap. 5.2).

8 Litteratur og referanser

8.1 Referanser

- i Piet Jensen, byggmester og daglig leder i Panda Bygg, med bred erfaring innen halm- og leirbygg. Kontinuerlige samtaler underveis i prøveperioden.
- ii Etter samtale med Knut Vaage, Weeber Leca, Rælingen.
- iii Etter samtale med Sascha Böhme

8.2 Litteratur

Arbeidstilsynet (s.a.) ”Orientering om jordarter m.v.” Sist lokalisert den 18. mai 2012 på <http://www.arbeidstilsynet.no/artikkel.html?tid=78665>

Bovim, Nils-Ivar (2011) “Skivekonstruksjoner, Forutsetninger og Beregninger” Powerpointpresentasjon presentert i faget TBA320 høsten 2011

Byggforsk (2003) Byggforsk detaljblad: 770.115 *Leire som byggemateriale. Muring, pussing og annen bruk* Oslo (?): Sintef Byggforsk

Byggforsk (2007) Prosjektrapport 2: *Forankring av avstivede skivekonstruksjoner av tre og trebaserte materialer* Oslo (?): Sintef Byggforsk. Sist lokalisert 18. mai på <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Publikasjoner/Prosjektrapport2.pdf>

Byggforsk (2011) Byggforsk detaljblad: 471.043 *Vindlaster på bygninger. Forenklet beregning av vindkasthastighetstrykk*. Oslo (?): Sintef Byggforsk

Byggforsk (2011) Byggforsk detaljblad: 520.238 *Skivekonstruksjoner av tre* Oslo (?): Sintef Byggforsk

Carling, O. et al (1992) *Dimensjonering av träkonstruksjoner*. Solna: Svensk byggtjänst

clay (s.a) I *Wikipedia* lokalisert sist 26. april 2012 på <http://en.wikipedia.org/wiki/>

EN 1995-1-1:2004 *Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Comité européen de normalisation.

European Environment Agency (2011) “CO₂ per kWh in 2009” Sist lokalisert 18. mai 2012 på www.eea.europa.eu

Graphpad FAQ (s.a), På *Graphpad.com* lokalisert sist 26. april 2012 på <http://www.graphpad.com/faq/browse.cfm?page=3&sort=1>

Gunnar Raade (s.a.) ”Feltspat” *Store Norske Leksikon* lokalisert sist 26. april 2012 på <http://www.snl.no>

- Gunnar Raade (s.a.) "Leirminerale" *Store Norske Leksikon* lokalisert sist 26. april 2012 på <http://www.snl.no>
- Gunnarsjaa, Arne (1999) *Arkitekturleksikon* Gjøvik: Abstrakt forlag as
- Halmhus i Nebraska-stil* [bilde, internett]. Lokalisert på <http://www.buildinggreen.com/auth/article.cfm/1995/5/1/Straw-The-Next-Great-Building-Material/>
- ISO 14688-1:2002 *Geotechnical investigation and testing. Identification and classification of soil. Part 1: Identification and description* International Organization for Standardization
- Isofiber Isolasjon (2012) "FDV Dokument Isofiber isolasjon Standard E" *Isofiber isolasjon*. Sist lokalisert 27. april på <http://www.isofiber.no>
- Jacobsen, Rolf (1999) *Halm som byggemateriale* Tjøme: Jacobsen/Litera publikasjon
- Keefe, Laurence (2005) *Earth building. Methods and materials, repair and conservation*. Abingdon: Taylor & Francis
- Källsner, Bo (1984) *Skivor som vindstabiliserende element ved träregeleväggar. TräteknikRapport nr 56*. Stockholm: Träforskningsinstitutets avdelning för träteknik
- Leake, Simon (s.a.) "Clay shrinkage" Sist hentet fra <http://www.kazegamas.com/GIFs/Clay%20Shrinkage.htm>
- Leir (s. a.) I *Nynorskordboka og Bokmålsordboka*. Universitetet i Oslo: Institutt for lingvistiske og nordiske studier. Sist lokalisert 19. april på <http://nob-ordbok.uio.no/>
- Minke, Gernot & Mahlke (2005) *Building with straw* Basel, Sveits: Birkhauser
- Minke, Gernot (1995) *Lehmbau – Handbuch. Der Baustoff Lehm und seine Anwendung*. Freiburg: ökobuch [1994]
- Nartey, James Narh (2005) *Vurdering av forbindelse for trebasertre skivekonstruksjoner basert på forsøk*. Upublisert masteroppgave, Universitetet for miljø og biovitenskap, Ås.
- Nils Spjeldnæs (s.a.) "Leire" *Store Norske Leksikon* lokalisert sist 26. april 2012 på <http://www.snl.no>
- Norsk Jord- og Halmbyggerforening (2012) "Norske halmhus" *Norsk Jord- og Halmbyggerforening* Sist lokalisert den 27. april 2012 på <http://www.njh.no/>
- Norton, F. H. (1975/76) "Clay. Why it acts the way it does" *Studio Potter*. 4(2)
- NS-EN 12390-3:2009 *Prøving av herdnet betong - Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet* Standard Norge
- perlitt (s.a.) I *Store Norske leksikon* Lokalisert sist 27. april 2012 på <http://www.snl.no>
- Riksantikvaren & Norsk Handverksutvikling (2006) *Prøving av leire. Til tradisjonell bruk i leiremuring*. Lånt fra Maihaugens samlinger.
- Schneider Electric Industries SAS (s.a), *Pressure transmitters, OsiSense XMLP for industrial applications* Sist lokalisert 11. juli på <http://www.schneider-electric.it/documents/prodotti-e-servizi/Automazione-e-Controllo/catalogue-osisenseXMLP-en.pdf>

Selvig, Eivind (2012) ”Nyheter i *www.klimagassregnskap.no* . *Smakebiter fra ny versjon 4.*”
Presentasjon under NAL Ecobox’ frokostmøte ”Brød og miljø” 11. april 2012. Sist lokalisert
18. mai 2012 på <http://www.arkitektur.no/?nid=233709&lcid=1044>

silt (s.a.) I *Wikipedia* lokalisert sist 26. april 2012 på <http://en.wikipedia.org/wiki/>

Time for change (s.a) ”What is a carbon footprint definition?” Sist lokalisert 18. mai 2012 på
www.timeforchange.org

TLS (2012) *The last straw* Lokalisert sist 27. april 2012 på <http://www.thelaststraw.org>

Tukey-Kramer (s.a), I *Wikipedia* lokalisert sist 26. april 2012 på <http://en.wikipedia.org/wiki/>

What is the hourly fuel consumption of a 330 cat excavator (s.a.) I *Answers.com* lokalisert sist 18.
mai på wiki.answers.com/Q/What_is_the_hourly_fuel_consumption_of_a_330_cat_excavator

9 Vedlegg

9.1 Vedlegg A

9.1.1 Jensens metode:

PROSJEKT: "UTV. LEIREPUSS"

PARAMETERE FOR EVALUERINGSSKJEMA

Prøvenes egenskaper er vurdert og satt opp i skala fra 0 – 5; hvor 0 er best.
Blandingsforholdet er angitt i volum og forkortelsene refererer til liste over tilslagsstoffer.

KAN FORM TESTES ETTER 3-4 DG

SVINN Oppgitt i mm langs kantene.

SPREKK Beskriver antall revner i prøven.

BRUDDSTYRKE Testes ved med håndkraft å brette minst 2 av prøvenes hjørner og forsøke smuldre disse med fingrene.

- 0 kan ikke brykkes
- 1 kan med stor kraft brykkes, men ikke smuldres
- 2 brykkes med middelkraft og er vanskelig å smuldre
- 3 brykker lett og kan smuldres
- 4 brykker av seg selv
- 5 ingen sammenheng

I tillegg kan dette utdypes med:

SPRØ porøs og knuses lett

SEIG bindes sammen av armering el. limstoffer

**OVERFLATE-
HARDHET**

Mekanisk overflatebearbeiding med fingertupp.

- 0 upåvirket
- 1 ubetydelig effekt
- 2 mindre effekt
- 3 middels effekt
- 4 stor effekt
- 5 ingen sammenheng

EROSJON

Testes med dusjen på nedre halvdel av prøven.

- 0 upåvirket
- 1 ubetydelig effekt
- 2 mindre effekt med ujevn utvasking
- 3 middels effekt med jevn utvasking
- 4 stor effekt med jevn utvasking
- 5 oppløses

9.1.2 Støvelprøver – labrapporter

Støvelprøver

Forsøk 1: Første støvelstøp

*Bilde F1.1:
Venstre bilde
viser stående
prøves
forside. Øvre
bilde viser
støpen i
støpeformen.
Nedre bilde
viser prøvens
underside.*



Bakgrunn

Ny støpeform fra maskinverkstedet.

Hensikt

Teste formens funksjonalitet. Det er spesielt interessant å se på tørketid samt tørkesprekker rundt innslissede plater.

Tørkeforhold

Varmt. Plassert inntil radiator. Makstemperatur målt til 30° C.

Blandeforhold

Leire: 1
Sand: 1
Subus 4 mm: 1

Resultat og vurdering

Til dels store sprekker i støp rundt innslissede plater. Dette skjer tidlig i tørketiden. Støpen slipper formen lett i ett stykke.

Forøvrig lang tørketid. Støpeformen holder godt på fuktigheten og later ikke til å puste mye. Prøven tas ut av formen etter 6 dager.

Sprekkene er store i overflaten eksponert mot friluft. Prøvestykket virker forøvrig som det er i en forfatning god nok for å trykktestes.

Konklusjon

Lang tørketid. Dette bør utbedres. Ujevn tørking bidrar til tørkesprekker.



Bilde F1.2: Detaljutsnitt fra prøvens underside.

Støvelprøver:

Forsøk 2: Andre støvelstøp

Bakgrunn

Nye støpeform fra treverkstedet er ervervet. Disse er mer nøyaktige enn tidligere støpeform og har bredere innlissede plater.

Hensikt

Hensikten er å teste formene. Støpen settes i støpeform med de innlissede plater skrudd fast som i tidligere forsøk. Umiddelbart etter at støpen er satt til tørking, fjernes skruene fra de innlissede plater. Formålet er at platene kan bevege seg fritt, følge støpens krymping og redusere tørkesprekker. Fire prøver settes.

Tørkeforhold

Stabilt temperert. Plassert på bord. Maksimumstemperatur målt til 20,4° C, minimumstemperatur til 19,2°C.

Blandeforhold

Leire: 2
Sand: 1
Subus 4 mm: 1



Bilde F2.1: Venstre bilde viser oppsprekking på underside. Høyre bilde viser oversidens oppsprekning

Resultat og vurdering

Svært store sprekker i støp rundt innlissede plater. Dette skjer tidlig i tørketiden.

Forøvrig lang tørketid. Formen holder godt på fuktigheten og later ikke til å puste mye.

For to av forsøkene tas formen ut etter 4 dager. Leirefargen er mørk og preget av et høyt fuktighetsinnhold. Formene slipper lett, men i to stykker. Oversiden er preget av store tørkesprekker. Undersiden også. Sprekkene strekker seg enkelte steder fra oversiden og ned til undersiden.



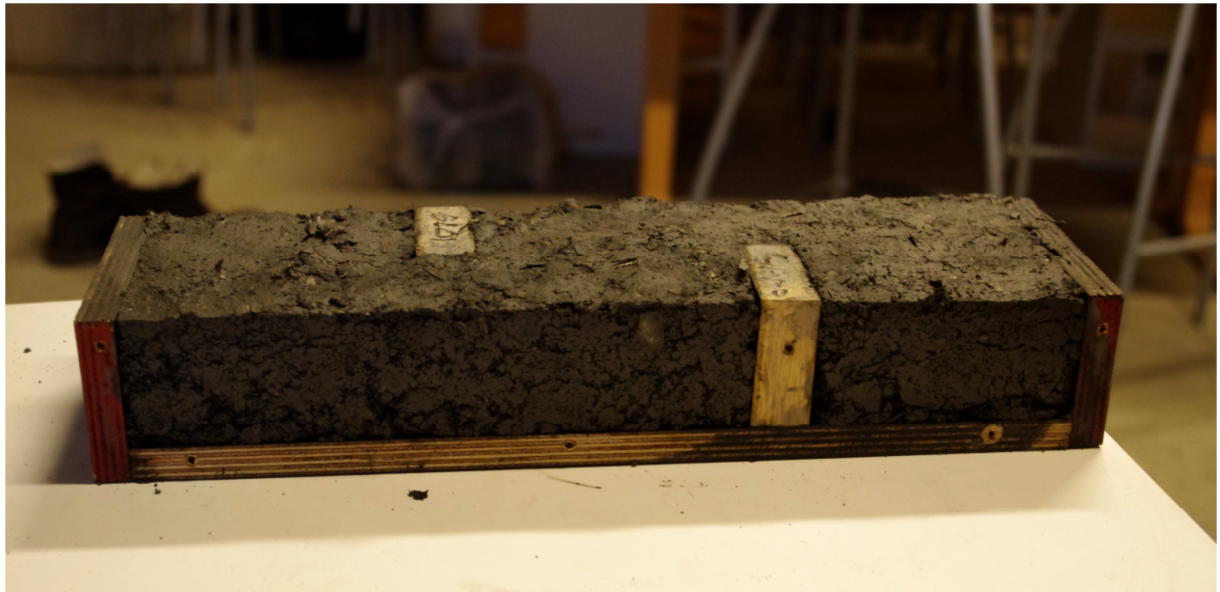
Konklusjon

Lang tørketid. Dette bør utbedres. Ujevn tørking bidrar til tørkesprekker. Leireinnholdet er for høyt i forhold til støpeformens fasong. Kan det være hensiktsmessig å redusere fuktighetsinnholdet i leiremørtelen?

Tidlig uttatte former: Ubrukelige til fasthetsprøving.

Bilde F2.2: Bildet viser hvordan sprekken går fra overside til underside.

Forsøk 3: Tredje støvelstøp



Bilde F3.1: Tørr prøve satt i støpeform "Gloppen". Vegger fjernet for å effektivisere tørking.

Bakgrunn

Tidligere forsøk med støper har vist at prøvene er vanskelige å tørke. Store tørkesprekker oppstår og støpene egner seg dårlig til å teste fasthetsegenskaper.

Hensikt

Redusert væskeinnhold i leiremørtelen vil gi mindre krymping i tidligfasen av leirens tørkeprosess. Jevnere tørking vil redusere interne spenninger i støpen under tørking. Jevn tørking og lavt væskeinnhold er faktorer som reduserer oppsprekking.

Slik ble det gjort i dette forsøket:

- Minimalt tilsatt fuktighet. Setter to prøver, basert på den samme leirpussblandingen:
 - 1; Gloppen – prøve basert på svært tørr mørtel.
 - 2; Gulen – Prøve basert på samme mørtel tilsatt 2,5 dl vann.
- Fjerner støpeformens langsidsvegger under tørking, for større eksponert overflate mot friluft. Kilene sitter fortsatt på plass.
- Tilsetter kutterspon helt mot slutten av eltingen. Her antas det at trefibrene vil ha noe å si for tørkeprosessen. Kanskje vil trefiberen absorbere fuktighet under leiretørkningens første fase og slik sørge for at støpen tørker jevnere? Dessuten vil nok også trefiberens armeringseffekt også ha noe å si for oppsprekking.

Usikkerhetsmomenter:

- Vil en tørr leiremørtel ha dårligere intern heft enn en fuktig?
- Vil graden av stamping ha stor betydning for intern heft?
- Vil man, ved å fjerne to av formveggene, få et dråpeformet tverrsnitt som egner seg dårlig til testing?

Tørkeforhold

Stabilt temperert. Plassert på bord. Maksimumstemperatur målt til 20,7° C, minimumstemperatur til 18,4°C.

Blandeforhold

Leire: 1
Sand: 1
Subus 4 mm: 1
Trefiber: 45 ml (1,5 dl per tilsatt del hvor 1del = 1 form)
Vanninnhold:

Resultat og vurdering

Lite sprekkdannelse. Det var trolig av stor betydning å fjerne langskipsveggene. Prøven beholdt sin opprinnelige form etter fjerning av disse. Tilsats av trefiber virket fordelaktig på oppsprekningstendensen. Begge prøver var tilfredsstillende. Noe hulrom i formen vitner om delvis dårlig stamping.

Konklusjon

Tilfredsstillende prøve kvalitet. Denne metoden vil være aktuell å bruke videre. Bør vurderes om innslissede plater også skal fjernes. Bedre stamping bør etterstrebes.

9.1.3 Prøveveggenes tykkelse, målinger

Prøveveggstykkelse

Vegg, Nord, styrbord:	Diagonal:	5,5 cm	Øvrige punkter:	3,4 cm
		4,1 cm		3,7 cm
		5,1 cm		3,5 cm
	Fra vegg-ens lastinnføring	3,5 cm		3,8 cm
		3,6 cm		3,6 cm

Snitt:	4,36 cm	3,6 cm
--------	---------	--------

Snitt over hele flaten: 3,98 cm

Vegg, syd, babord:	Diagonal:	3,7 cm	Øvrige punkter:	4 cm
		4,5 cm		3,9 cm
		4,4 cm		4,2 cm
	Fra vegg-ens lastinnføring	4,6 cm		3,8 cm
		4 cm		3 cm

Snitt:	4,24 cm	3,78 cm
--------	---------	---------

Snitt over hele flaten: 4,01 cm

ⁱ Piet Jensen, daglig leder i Panda Bygg. Kontinuerlige samtaler underveis i prøveperioden.

ⁱⁱ Etter samtale med Knut Vaage, Weeber Leca, Rælingen.

9.2 Vedlegg b

9.2.1 Logg fra pussprøveforsøk

Småprøveportefølje

Små (ca 100x100x4mm) tørre pussprøver i støpeform

Data

Prøvenavn.	Leire	Prosent- andel leire	Sand	Subus 4mm/ fine lecauler	Subus 8 mm/grove lecauler	Trefiber (ml/del) / Halm (del)	Score					
							Svinn	Sprekker (vurdering, ikke etter ant.)	Bruddstyrke	Overflateslitaj	Erosjon	Sum
1a	Sand – start	1	100,0	0	0	0	6	1	2	1	0	4
1b	Sand – start	1	50,0	1	0	0	4,5	1	3	1	2	7
1c	Sand – start	1	33,3	2	0	0	3,5	1	3	1	3	8
1d	Sand – start	1	25,0	3	0	0	1	1	4	4	5	14
1e	Sand – start	1	20,0	4	0	0	1,5	1	4	3	5	13
2a	Subus 4 – start	2	66,7	0	1	0	4,5	4	3	2	3	12
2b	Subus 4 – start	1	50,0	0	1	0	3,5	3	3	2	2	10
2c	Subus 4 – start	1	33,3	0	2	0	2,5	2	3	2	2	9
2d	Subus 4 – start	1	25,0	0	3	0	1	2	2,5	3	2	9,5
2e	Subus 4 – start	1	20,0	0	4	0	0,5	2	4	2	4	12
3a	Subus 8 – start	2	66,7	0	0	1	4,5	2	2	3	2	9
3b	Subus 8 – start	1	50,0	0	0	1	3	1	2,5	2,5	3	9
3c	Subus 8 – start	1	33,3	0	0	2	2,5	1	3	2,5	3	9,5
3d	Subus 8 – start	1	25,0	0	0	3	1,5	4	3,5	3	4	14,5
3e	Subus 8 – start	1	20,0	0	0	4	1	4	4 n/a	n/a		
4a	Sand og trefiber	2	66,7	1	0	0	4,5	0	3,5	3	2	8,5
4b	Sand og trefiber	1	50,0	1	0	0	3	1	3	2	1,5	7,5
4c	Sand og trefiber	1	33,3	2	0	0	2	1	3,5	2	2,5	9
4d	Sand og trefiber	1	25,0	3	0	0	1	1	4	2	3	10
4z	Sand, subus, trefiber	1	33,3	1	1	0	2	2	4	3	3,5	12,5
5z	Sand, subus, trefiber	1	25,0	1,5	1,5	0	2	1	1,5	1	2	5,5
5a	Leire og tils. Bland.	1	66,7	0,25	0,25	0	4	1	2,5	2	2	7,5
5b	Leire og tils. Bland.	1	50,0	0,5	0,5	0	3	2	3	2	2	9
5c	Leire og tils. Bland.	1	33,3	1	1	0	2,5	1	2	1,5	1	5,5
5d	Leire og tils. Bland.	1	25,0	1,5	1,5	0	2	1	2,5	3	3	9,5
6a	Grove lecauler	1	50,0	0	0	1	2	4	3,75	1	5	13,75
6b	Grove og fine lecauler	1	33,3	0	1	1	1	2,5	2,5	3	5	13
6c	Grove og fine lecauler med halm	1	33,3	0	1	1	0,75	1,5	2,25	1,5	4	9,25
6z	Sand og halm	1	50,0	1	0	0	3	1	2	1	2,5	6,5
6x	Sand og halm	1	33,3	2	0	0	1	1	1,75	2	2	6,75
7a	Fine lecauler	1	50,0	0	1	0	2,25	1,5	2,5	1,5	3	8,5
7b	Fine lecauler	1	33,3	0	2	0	1	2	3	2	5	12
7c	Fine lecauler	1	25,0	0	3	0	0,5	0	3	4	5	12
7z	Fine lecauler med sand	1	33,3	1	1	0	0,5	2	2,5	3	4,5	12
7x	Fine lecauler med sand	1	25,0	2	1	0	0,25	1,5	3,5	3,5	4	12,5
7y	Fine lecauler med fiber	1	33,3	1	1	0	3	1,5	2,5	2	2,5	8,5

9.2.2 Logg fra forsøk med kubepøver av leirmørtel

Testing av små kubep prøver

Prøve-nummer	Prøvetype	Leire (del)	Sand (del)	Annet tilslag (del)	Annet tilslag, spesifisert	Fiber (del)/ ferdig-blandet (puss)	Fiber, spesifisert	Vekt av tørkeprøve med plate (fuktig)	Vekt av plate (tør)	Vekt av tørr prøve	Innendørs luftfuktighet	Innendørs temperatur	Innendørs fuktprosent i prøve (fra plastisk til)	Målsetting:								Merknader	Dato	Snittar maks eal av malt terning oppn ens belast	Trykkfas øde brudd fc (N/mm²)	Statistiske	Verdier					
														Y-akse,		X-akse, øvre		Y-akse,		X-akse, nedre								h1	h2	h3	h4	
														a	b	a	b	a	b	a	b											
1	1:2	1	2	0		0		346,42	53,41	263,16	32,5	20	10,19%	51,3	51,6	50,4	50,4	51,4	50,5	50,5	50,6	50	50,4	50	49,5	Porøs prøve, L	12.03.2012	2584,4	4000	1,50	Snitt:	1,67598338
2	1:2	1	2	0		0								49,46	49,5	51,7	51,8	51,2	50,9	49,5	49,5	50,3	49,5	50,5	49,04	Porøs prøve, V	12.03.2012	2544,7	4320	1,70	Standardd	0,08853092
3	1:2	1	2	0		0								51,3	51,5	49,5	49,5	49,9	50	51,2	51,3	49,3	49,1	49,8	48,8	Porøs prøve, V	12.03.2012	2552,8	4360	1,71	Relativ std.	5,3 %
4	1:2	1	2	0		0					30,2	22,6		51,7	50,5	50	50,3	50,2	50,7	50,3	51	49,9	49,8	49,6	50	Porøs prøve, V	12.03.2012	2559,1	4480	1,75	Estimator X:	Snittet
5	1:2	1	2	0		0					30,2	22,6		50,3	50,3	50	50,1	50,9	51	50,3	49,9	49,2	49	49,1	49,3	Fin prøve	12.03.2012	2535,1	6900	2,72	Snitt:	2,53488401
6	1:2	1	2	0		0					30,2	22,8		49,8	50	50,3	50,5	51,1	51,2	50	50,1	48,6	48,8	48,8	49,3	Fin prøve	12.03.2012	2537,6	6440	2,54	Standardd	0,1392609
7	1:2	1	2	0		0								50,9	50,8	49,7	49,8	49,7	49,8	51,7	51,2	49,8	49	49	48,9	Fin prøve	12.03.2012	2545,2	6080	2,39	Relativ std.	5,5 %
8	1:2	1	2	0		0								50,5	50,8	51,1	50,6	51,4	51,8	50,8	50,7	48,5	48,9	47,5	48	Fin prøve	12.03.2012	2597,2	6470	2,49	Estimator X:	Snittet
9	1:2	1	2	0		0					29,3	23		51,1	50,6	50,1	50	50,5	50,4	51,7	51,4	48,7	48,6	48,4	49,1	Fin prøve b	12.03.2012	2573,0	6580	2,56	Snitt:	2,51343688
10	1:2	1	2	0		0								50,7	51,2	50,6	50,7	50,7	50,9	51,5	50,6	48,8	48,2	48,1	48,4	Fin prøve b	12.03.2012	2587,0	6580	2,54	Standardd	0,0541369
11	1:2	1	2	0		0					29,2	23,3		51,3	50,2	50,6	51,2	51,2	51	48,8	48,5	49,4	49,4	48,4	48,4	Fin prøve b	12.03.2012	2535,1	6380	2,52	Relativ std.	2,2 %
12	1:2	1	2	0		0								51,3	51,4	49,7	50	51	51,3	49,4	49,8	49,7	49	49	48,2	Fin prøve b	12.03.2012	2549,0	6210	2,44	Estimator X:	Snittet
13	1:2	1	2	0		0					28,6	23,6		51,4	51,4	50	50	52,4	49,6	49,8	49,2	49,2	50,9	49	49,3	Fin prøve C	12.03.2012	2585,7	6440	2,49	Snitt:	2,49313073
14	1:2	1	2	0		0					26	24,5		51,6	51,8	49,9	49,6	50,1	50,3	52,5	52,6	49,4	49,2	49	49,1	Fin prøve C	12.03.2012	2606,1	6530	2,51	Standardd	0,2472318
15	1:2	1	2	0		0					24,1	24,7		51,3	50,5	50,6	50,8	50,9	51	52,3	51,2	48	49	48,5	47,3	Fin prøve C	12.03.2012	2608,6	7280	2,79	Relativ std.	9,9 %
16	1:2	1	2	0		0					24,2	24,7		51,4	51,8	50	50,1	50	50	51,4	51,7	49,6	49,1	51,1	49,3	Fin prøve C	12.03.2012	2580,6	5640	2,19	Estimator X:	Snittet
17	1:2 med halm	1	2	0		0,43 Halm		165,12	32,71	117,38	24,2	24,6	11,35%	50,5	50,2	50,3	49,7	51,1	50,7	50,5	50,9	50	51	49,8	48,8		12.03.2012	2549,0	5940	2,33	Snitt:	2,11613642
18	1:2 med halm	1	2	0		0,43 Halm					24,2	24,6		49,6	49,5	50,3	50,6	50,6	50,7	50,2	49,9	49,5	50	51,3	50,8		12.03.2012	2517,5	5760	2,29	Standardd	0,22358837
19	1:2 med halm	1	2	0		0,43 Halm								50,8	50,2	49,6	49,9	49,6	49,7	50,9	50,5	50	49,9	49,9	50,5		12.03.2012	2515,0	4850	1,93	Relativ std.	10,6 %
20	1:2 med halm	1	2	0		0,43 Halm								50,8	50,8	50	49,6	50,8	50,3	51,5	51,4	49,9	49,7	50	49,8		12.03.2012	2565,4	4920	1,92	Estimator X:	Snittet
21	1:2 med mye halm	1	2	0		0,86 Halm		342,6	115,94	201,25	24,1	24,9	11,21%	51,1	50,8	51,2	50,5	50,7	50,3	50,9	50,6	50,3	50,6	50,7	50,3	ett litt avrunde	12.03.2012	2576,8	6860	2,66	Snitt:	2,68092654
22	1:2 med mye halm	1	2	0		0,86 Halm					23,9	24,7		50,8	50,4	50,2	50,4	50	50	50,2	50,6	51,1	50,4	50,8	50,7		12.03.2012	2532,6	7120	2,81	Standardd	0,14339225
23	1:2 med mye halm	1	2	0		0,86 Halm								49,9	49,8	50,6	50,5	50,5	50,5	50,2	50	51,1	51,7	51	51,2		12.03.2012	2525,1	6280	2,49	Relativ std.	5,3 %
24	1:2 med mye halm	1	2	0		0,86 Halm								50,6	50,3	50,5	50,7	49,9	50,1	50,8	51,2	50,4	50,4	50	50,2		12.03.2012	2551,5	7050	2,76	Estimator X:	Snittet
25	1:2 med trefiber	1	2	0		0,43 Trefiber		164	13,84	134,79	24,9	24,7	10,24%	50	50,2	51,4	51,4	50,4	50,5	51,4	51,7	50,5	50,9	49,3	48,7		12.03.2012	2588,3	6440	2,49	Snitt:	2,32189845
26	1:2 med trefiber	1	2	0		0,43 Trefiber					35,9	24,7		51,4	51,7	49,8	49,6	49,5	50	51,5	51,3	50,4	51	50,5	50,5		12.03.2012	2560,4	5700	2,23	Standardd	0,11449325
27	1:2 med trefiber	1	2	0		0,43 Trefiber					23,8	24,5		50,9	50,8	50,5	50,8	50,9	50,3	50,9	50,3	50,2	50	49,8	50,7		12.03.2012	2567,9	5860	2,28	Relativ std.	4,9 %
28	1:2 med trefiber	1	2	0		0,43 Trefiber								49,5	49,9	51	51,2	50,8	50,8	50	50	50,7	50	49,6	50,3		12.03.2012	2540,2	5820	2,29	Estimator X:	Snittet
29	1:2 med mye trefiber	1	2	0		0,86 Trefiber		302,2	37,98	237,35	23,7	24,2	10,17%	50	50,2	50,6	51,4	51,3	51,1	50	50	51	51,6	51	51,2		12.03.2012	2557,8	6740	2,64	Snitt:	2,55012926
30	1:2 med mye trefiber	1	2	0		0,86 Trefiber								50,9	50,8	50,8	51,1	51	50,7	51	51,3	51,3	51,3	51,7	51,5	sprekk i ene h	12.03.2012	2595,9	6640	2,56	Standardd	0,09741226
31	1:2 med mye trefiber	1	2	0		0,86 Trefiber					24,5	24,4		49,9	49,7	51,2	50,6	51,1	50,4	50,2	50,3	51,5	51,4	51,4	51,4		12.03.2012	2542,7	6600	2,60	Relativ std.	3,8 %
32	1:2 med mye trefiber	1	2	0		0,86 Trefiber					23,7	25,5		49,8	49,7	51	51,1	51,1	51	50,2	50,4	51	51,1	51,3	51,5		12.03.2012	2554,0	6160	2,41		
33	1:2 med hestehår	1	2	0		0,21 Hestehår 1-3cm		206,7	39,77	149,78			10,27%	50	49,7	50,7	51,7	50,6	52,3	52,2	50,6	50,2	50	48,5	48,7		12.03.2012	2598,4	5840	2,25	Snitt:	2,01479729
34	1:2 med hestehår	1	2	0		0,21 Hestehår 1-3cm					20	27,1		50,2	50,5	50,5	50,6	48,9	49	50	50,1	48	49,5	50,5	49,5	luftfuktighetsm	12.03.2012	2497,5	4630	1,85	Standardd	0,18386612
35	1:2 med hestehår	1	2	0		0,21 Hestehår 1-3cm								51,7	51,7	49,8	49,7	49,8	49,7	51,5	51,8	50	51	49,7	49,6		12.03.2012	2571,8	4840	1,88	Relativ std.	9,1 %
36	1:2 med hestehår	1	2	0		0,21 Hestehår 1-3cm					20,5	26,6		50,8	50,9	51,3	51,7	48	48,8	50,3	48,6	49	50,2	48,9	48		12.03.2012	2505,0	5200	2,08		
37	1:2 med mye hestehår	1	2	0		0,43 Hestehår 1-3cm		178,7	39,2	123,43			11,52%	50,3	50,1	50,6	50,4	50	50,2	51,5	51,5	49,8	49,3	48,7	48,7		12.03.2012	2557,8	5640	2,20	Snitt:	2,28894934
38	1:2 med mye hestehår	1	2	0		0,43 Hestehår 1-3cm								51,3	51,7	50	50	52,3	52,1	50	50	48,1	48,3	48	49		12.03.2012	2593,4	5900	2,28	Standardd	0,19494729
39	1:2 med mye hestehår	1	2	0		0,43 Hestehår 1-3cm					22,1	25,1		49,9	49,9	51,5	51,9	52,1	52,8	49,8	49,6	49,6	49,7	49,3	48,9		12.03.2012	2594,6	5480	2,11	Relativ std.	8,5 %
40	1:2 med mye hestehår	1	2	0		0,43 Hestehår 1-3cm								50,8	50,8	50,9	51	51,3	51,2	52,3	52,5	48,1	48,5	47,9	47,8		12.03.2012	2636,8	6760	2,56		
41	1:2 med isofiber	1	2	0		0,43 Isofiber		249,3	38,28	188,14			10,84%	51,1	51,4	49,4	49,4	51,1	51,8	50	49,8	50,5	49,4	50,2	49,7		12.03.2012	2550,2	6680	2,62	Snitt:	2,54309588
42	1:2 med isofiber	1	2	0		0,43 Isofiber					24	23,8		49,8	49,8	51,3	51,1	51,4	51	51	51,2	49,5	49,7	49,3	49,9		12.03.2012	2583,2	6500	2,52	Standardd	0,10787939
43	1:2 med isofiber	1	2	0		0,43 Isofiber								50	49,9	50,7	50,2	50,5	50,1	50,1	50,1	50	50,9	48,8	49,7		12.03.2012	2520,0	6640	2,63	Relativ std.	4,2 %
44	1:2 med isofiber	1	2	0		0,43 Isofiber					25,7	23,8		49,4	49,6	51,4	51,2	52,2	51,7	50,2	50,1	49,6	50,4	49,9	50,3		12.03.2012	2573,0	6180	2,40		
45	1:2 med mye isofiber	1	2	0		0,86 Isofiber		249,3	38,22	188,1																						

9.2.3 Vindlastberegninger for et lite villahus på Nesodden.

Vindberegninger for et lite villahus på Nesodden

I henhold til Byggforsk detaljblad 471.044 av januar 2001

Husets karakteristika:

Lengde:	12 m
Bredde:	8 m
Rafthøyde:	3 m
Høyde:	9,7 m
Tak:	Saltak
Takvinkel	30 °

Generell formel for vindkasthastighetstrykk: $q_p = q_{pz0(z)} * k_1 * k_2 * k_r$

Formel for flatt terreng, nærme strandsone: $q_p = q_{pz0(z)} * k_r$

Aktuelt vindkasthastighetstrykk: $q_p = 1003 \text{ N/m}^2$

Anvendte tabellverdier:

$q_{pz0(z)}$, Akershus:	850 N/m^2
k_r	1,18
Terrengtype:	Flatt
Terrengruhetskategori:	II

Dimensjonerende vindlast

I henhold til Byggforsk detaljblad 471.043 av 2003

C_{pe10} :

H:

a	b
0,6	0
0	-0,2

l:

C_{pi} :

-0,3

Z_e :

h =

9,7 m

C_d :

1

A_{ref} :

116,4

arealet av konstruksjonen projisert vinkelrett på vinden.

Generell formel for resultantkraft: $F_w = C_d * C_{pe10} + C_{pi} * A_{ref} * q_p$

Aktuell vindresultantkraft: $F_w = 35024,76$

$Y_F =$

1,5

$k_L =$

0,8

Dimensjonerende vindlast: $F_Y = Y_F * k_L * F_w$

Aktuell dimensjonerende vindlast: 42,0 kN

Fordelt på to mønevegger gir dette: 21,0 kN / mønevegg

Hvilket, med en vegg høyde på 2,5 m, gir en skjærstrøm tilsvarende: 2,626857 N / mm

9.2.4 Datasett for fullskalaforsøket

Ikke komplett. Data for alle 2529 målinger er ikke tatt med, kun de første.

